



**HAL**  
open science

# Étude de l'impact de traitement de Magnésie et de Fer sur la physiologie de la vigne, son rendement et sa qualité

Coline Sicard

► **To cite this version:**

Coline Sicard. Étude de l'impact de traitement de Magnésie et de Fer sur la physiologie de la vigne, son rendement et sa qualité. *Agronomie*. 2020. dumas-03641198

**HAL Id: dumas-03641198**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03641198v1>**

Submitted on 14 Apr 2022

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

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

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE**

**Présenté pour l'obtention du**

**DIPLÔME d'INGÉNIEUR AGRONOME**

**Option: Viticulture/Oenologie**

*Étude de l'impact de traitement de Magnésie et de Fer  
sur la physiologie de la vigne, son rendement et sa qualité*



**Par SICARD Coline**

**Année de soutenance : 2020**

**Organisme d'accueil : SAS Gonfrier Frères**



**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE**

**Présenté pour l'obtention du**

**DIPLÔME d'INGÉNIEUR AGRONOME**

**Option: Viticulture/Oenologie**

*Étude de l'impact de traitement de Magnésie et de Fer  
sur la physiologie de la vigne, son rendement et sa qualité*

**Par SICARD Coline**

**Mémoire préparé sous la direction de :**  
Anne Pellegrino

**Organisme d'accueil :**  
SAS Gonfrier Frères

**Présenté le :** 04/11/2020

**Maître de stage :**  
GONFRIER Paul

**Jury :** Anne Pellegrino et Alain Deloire



## **REMERCIEMENTS**

Dans un premier temps, je tiens à remercier Eric Gonfrier de m'avoir offert la possibilité de réaliser ce stage de fin d'études au sein des Vignobles Gonfrier.

Je souhaite remercier chaleureusement Paul Gonfrier, mon maître de stage, pour son accueil. Il m'a apportée énormément de connaissances sur la gestion d'une entreprise viticole dans son ensemble et m'a offert la possibilité de pouvoir en découvrir toutes ses spécificités. Merci à lui d'avoir été à mon écoute, mais aussi de s'être montré disponible et d'avoir apporté un point de vue critique sur mon projet. Sa vivacité d'esprit ainsi que sa passion du monde de la vigne et du vin ont rendu ce stage très formateur. Je le remercie pour la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordée.

De plus, je voudrais remercier Anne Pellegrino, ma tutrice de stage, pour sa grande disponibilité et ses conseils pour l'établissement de ce rapport.

J'exprime ma gratitude à l'ensemble de l'équipe des Vignobles Gonfrier pour leur contribution au bon déroulé de ce stage de fin d'étude. Cette expérience a été très bénéfique, tant sur le plan professionnel qu'humain.

Enfin, je porte une attention toute particulière à ma famille et mes amis, qui m'ont toujours soutenue dans les bons comme dans les mauvais moments.



## LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Interprétation des corrections à réaliser en fonction du rapport K/Mg
- Figure 2 : Feuilles symptomatiques d'une carence magnésienne
- Figure 3 : Les effets majeurs d'une carence magnésienne
- Figure 4 : Interaction du fer à l'hème (a), au soufre (b) et exemple de liaisons directes (c)
- Figure 5 : Fer constituant de la chaîne de transport d'électrons
- Figure 6 : Feuilles symptomatiques d'une carence ferrique classique
- Figure 7 : Efficacité ESPO sur le dessèchement de la rafle
- Figure 8 : Impact d'épandage d'Oxyfertil sur le taux de sucres, la concentration en anthocyanes et l'indice total de polyphénols
- Figure 9 : Effet de l'application de fer sur les différentes anthocyanes (microg/g baie), les lettres (a,b,c,d,e) représentent les différences significatives entre les différents groupes calculées par le test de Turkey (pvalue < 5%)
- Figure 10 : Analyse en composante principale pour mise en évidence de corrélation du NDVI
- Figure 11 : Les potentiels des raisins obtenus en fonction de la date et du degré potentiel à l'arrêt de chargement en sucres
- Figure 12 : Séquence aromatique du Merlot en fonction de la date de chargement en sucres
- Figure 13 : Courbe théorique de l'évolution de la concentration (g/L) des acides organiques présents dans la baie de raisin
- Figure 14 : Courbe théorique de l'évolution de la concentration (mg/L) des anthocyanes et des tanins
- Figure 15 : Graphique représentant les rendements (en hL) depuis 2010 jusqu'à 2019
- Figure 16 : Évolution des Néoluvisols en luvisols sous l'effet de la dégradation
- Figure 17 : ACP de l'ensemble des valeurs mesurées pour 2018 (droite) et 2019 (gauche)
- Figure 18 : ACP pour constater l'impact du traitement de kiesérite réalisé en 2018
- Figure 19 : Parcelles d'essai de fer (en haut) et de magnésie (en bas) sur un fond de carte pédologique
- Figure 20 : Délimitation des placettes sur les parcelles d'essai de fer (haut) et de magnésium (bas) en fonction du NDVI
- Figure 21 : Les 3 catégories pour la méthode des apex : stade P, R et C (de gauche à droite)
- Figure 22 : Interprétation des valeurs d'IAC
- Figure 23 : Comparaison de la carte NDVI brute (gauche) et après correction (droite)
- Figure 24 : Calcul de la surface d'une feuille avec Mesurim
- Figure 25 : Courbe de tendance de la surface foliaire d'une feuille (en cm<sup>2</sup>) en fonction de la mesure de la nervure centrale (en cm)
- Figure 26 : Diagramme ombrothermique comparatif de la saison 2019/2020 par rapport à une moyenne sur 2013/2017 (données obtenues avec la station météorologique d'Haux)
- Figure 27 : Évolution de la phénologie sur 3 parcelles de fer
- Figure 28 : Vitesse de croissance pour chaque relevés sur les parcelles d'essai
- Figure 29 : NDVI 2020 en haut pour les parcelles de fer et en bas pour les parcelles de magnésium obtenu à partir du logiciel QGIS
- Figure 30 : Moyennes obtenues suite à la méthode de Lopes et Pinto
- Figure 31 : IAC des différentes parcelles en fonction du prélèvement, les différents découpages (vert, orange et rouge) ont été réalisés à l'aide de la figure 23
- Figure 32 : Moyenne sur 5 pieds de la mesure du potentiel de tige (les barres d'erreurs représentent les écarts types)
- Figure 33 : Assimilation du fer (haut) et du potassium (bas) pour les parcelles de l'essai fer
- Figure 34 : Assimilation de l'azote (haut gauche), du potassium (haut droite), du magnésium (bas gauche) et du K/Mg (bas droite) pour les parcelles de l'essai fer



Figure 35 : Cinétique de chargement en sucres des baies pour les parcelles de fer

Figure 36 : Cinétique de chargement en sucres des baies pour les parcelles de magnésium

Figure 37 : Évolution du poids des baies (en g/baies) sur l'expérience fer

Figure 38 : Évolution du poids des baies (en g/baies) sur l'expérience de magnésium

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Degré de contrainte en fonction des valeurs du potentiel de tige

Tableau 2 : Évolution de l'indice de maturité sucres/acides

Tableau 3 : Caractéristiques des parcelles expérimentales

Tableau 4 : Récapitulatif des moyennes de poids par cep obtenues pour l'ensemble des parcelles d'essai

Tableau 5 : Récapitulatif des moyennes du nombre de grappes par cep obtenues pour l'ensemble des parcelles d'essai

Tableau 6 : Récapitulatif des volumes de baies obtenues pour l'ensemble des parcelles d'essai

Tableau 7 : Récapitulatif des rapports feuilles/fruits (en m<sup>2</sup>/kg) pour Couchebouc 1 et Malbiche

Tableau 8 : Récapitulatif des résultats du dernier contrôle maturité pour les parcelles fer

Tableau 9 : Récapitulatif des résultats du dernier contrôle maturité pour les parcelles magnésium

Tableau 10 : Coût prévisionnel pour les traitements de fer sur l'ensemble des parcelles en conventionnel

Tableau 11 : Coût prévisionnel pour le traitement à la magnésie sur l'ensemble des parcelles en conventionnel

## **LISTES DES ÉQUATIONS**

Équation 1 : Calcul de l'indice de croissance par la méthode des apex

Équation 2 : Calcul du NDVI

Équation 3 : Calcul de la surface foliaire d'un cep

## **LISTES DES ANNEXES**

ANNEXE 1 : Récapitulatif des différents paramètres mesurés

ANNEXE 2 : Scripts R des différents paramètres mesurés

ANNEXE 3 : Coûts de l'ensemble des traitements réalisés sur le parcellaire en conventionnel hors traitement fer et traitement magnésium

ANNEXE 4 : Assimilation des autres éléments non présentés ultérieurement pour les parcelles de fer

ANNEXE 5 : Assimilation des autres éléments non présentés ultérieurement pour les parcelles de magnésium

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
PRÉSENTATION DE L' ENTREPRISE.....	2
I- Le fer et le magnésium .....	3
1°/ L'importance d'une bonne nutrition .....	3
a) Impact du magnésium .....	3
i) Propriétés du magnésium.....	3
ii) Impact du sol sur les carences magnésiennes .....	3
iii) Reconnaître une carence .....	3
iv) Les conséquences moléculaires possibles de la carence .....	4
v) Les conséquences .....	4
iv) Les solution proposées .....	4
iiiv) Les effets du magnésium sur la fermentation .....	5
b) Impact du fer .....	5
i) Propriétés du fer .....	5
ii) Impact du sol sur les carences ferriques .....	6
iii) Reconnaître une carence .....	6
iv) Les conséquences moléculaires possibles de la carence .....	6
v) Les conséquences .....	7
iv) Les solution proposées .....	7
2°/ Les recherches scientifiques déjà réalisées sur ces traitements .....	8
a) Les traitements de magnésie .....	8
b) Les traitements de fer .....	9
II- Les paramètres importants à regarder pour constater au mieux l'impact des traitements .....	10
1°/ Le statut hydrique .....	10
a) Méthode des apex .....	11
b) Potentiel de tige .....	11
2°/ NDVI.....	11
3°/ Surface foliaire .....	12
4°/ Rapport feuilles/fruits .....	12
5°/ Statut minéral par analyses pétiolaires .....	13
6°/ Cinétique de maturité et suivi des teneurs en composés phénoliques des raisins .....	13
III- Matériels et méthodes.....	14
1°/ Observations des millésimes précédents .....	14
2°/ Les parcelles d'essai.....	15
3°/ Positions des placettes sur les parcelles .....	16
4°/ Traitements mis en place .....	17
5°/ Les indicateurs du suivi .....	17
a) Statut hydrique .....	17
i) Méthode des apex .....	17
ii) Potentiel de tige .....	17
b) Croissance végétative .....	17
i) Suivi phénologique .....	17
ii) Mesure de l'allongement des rameaux .....	18
iii) NDVI .....	18
c) Statut Minéral par analyses pétiolaires .....	18
d) Surface foliaire .....	18
e) Mesures de rendement.....	18

f) Le rapport feuilles/fruits.....	19
g) Qualité par cinétique de maturité et suivi des teneurs en composés phénoliques des raisins.....	19
6°/ Analyses statistiques .....	19
IV- Résultats et interprétations .....	20
1°/ Bilan du millésime.....	20
2°/ Physiologie .....	20
a) Phénologie .....	20
b) Croissance végétative .....	20
c) Vigueur .....	21
i) NDVI.....	21
ii) Surface foliaire .....	22
3°/ État hydrique .....	22
i) Méthode des apex.....	22
ii) Potentiel de tige .....	23
4°/ Nutrition minérale .....	23
5°/ Rendement.....	24
6°/ Qualité du raisin .....	25
a) Le rapport feuilles/fruits .....	25
b) Résultats des contrôles maturité .....	25
i) Le pH et l'acidité.....	25
ii) La concentration en sucres et alcool probable.....	26
iii) Les anthocyanes .....	26
iv) Le poids des baies.....	27
v) Conclusion des données sur la qualité .....	27
VI- Analyse globale et discussion .....	28
CONCLUSION .....	29

## **SIGLES ET ACRONYMES**

ACP : Analyse en composantes principales

AT : Acidité totale

ATP : Adénosine tri phosphate

Ca : Calcium

CaCO<sub>3</sub> : Carbonate de calcium

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

EDTA : Éthylène diamine tétra-acétique

Fe : Fer

IAC : indice d'arrêt de croissance

IPT : Indice en polyphénols totaux

K : Potassium

Mg : Magnésium

N : Azote

NDVI : Indice de végétation par différence normalisé

P : Phosphate

PR : Poids récolté

PSI : Photosystème I

PSII : Photosystème II

ROS : Reactive oxygen species

SECV : Surface externe du couvert végétal

TAP : Titre alcoométrique potentiel

TAV : Titre alcoométrique volumique

Zn : Zinc



# INTRODUCTION

Une nutrition et une fertilisation équilibrées sont des éléments essentiels pour atteindre les rendements et la qualité requis. Si elle n'est pas toujours indispensable, la fertilisation peut dans certains cas devenir cruciale. En effet, pour éviter des carences, pour augmenter la vigueur, le rendement ou même la qualité du vin final, la fertilisation peut être nécessaire. Cette fertilisation permettra d'apporter une bonne stabilité de la structure du sol et de son activité microbiologique, d'apporter les éléments nutritifs dont la vigne a besoin pour assurer un bon rendement mais aussi pour garantir une qualité suffisante au vin final désiré par le vigneron.

L'objectif sera de maintenir le sol en éléments minéraux à un taux suffisant pour assurer une bonne nutrition. Notamment, pour son bon fonctionnement, la vigne a besoin d'azote, de phosphore, de potassium etc. Premièrement, notre étude se portera plus spécifiquement sur le magnésium, un des constituants de la chlorophylle qui permet une bonne photosynthèse mais qui intervient aussi dans de nombreuses réactions enzymatiques impliquées dans le métabolisme des sucres et dans la constitution des parois. L'autre élément qui sera abordé sera le fer indispensable au métabolisme des nitrates et qui entre lui aussi dans la composition de la chlorophylle.

Les observations faites sur le terrain les années précédentes (vigueur, couleurs des feuilles), l'historique des rendements, les analyses analytiques (pH, anthocyanes) mais aussi les analyses pétiolaires montrent des besoins en éléments minéraux notamment en fer et en magnésium. Ainsi le but sera de voir si les traitements de fer et de magnésium sont adaptés et peuvent permettre de limiter ces carences, augmenter les rendements et la vigueur mais aussi améliorer la qualité du vin final.

C'est dans le but de maîtriser plus finement leur fertilisation que l'étude de l'impact de ces deux traitements de fertilisation a été réalisée. L'objectif pour les Vignobles Gonfrier, entreprise familiale de grande ampleur puisqu'elle totalise aujourd'hui 700 hectares sans parler de son activité de négoce, est d'obtenir une production de haute qualité. Cependant, avec la diversité des terroirs, des cépages et de l'éclatement du parcellaire, une organisation millimétrée est nécessaire pour que tous les traitements puissent être réalisés. Il est ainsi difficile pour les équipes de se rendre sur chaque parcelle et d'apprécier l'efficacité de certaines pratiques. C'est pour cela que cette étude permettra aux Vignobles Gonfrier de connaître l'effet sur le végétal et remarquer les impacts bénéfiques ou non sur les parcelles de référence choisies. Ainsi, ces traitements pourront s'ils sont concluants être généralisés à l'ensemble du parcellaire pour augmenter les rendements, les qualités organoleptiques des vins mais aussi pour que le végétal ait une bonne longévité et des performances optimales tout au long de son existence.

Le mémoire commence par des éléments bibliographiques sur les propriétés du fer et du magnésium et sur l'impact que ces traitements peuvent modifier sur le végétal et sur le vin fini. Dans un second temps, le protocole sera explicité en développant les paramètres qui ont été mesurés, le choix des parcelles, des produits mais aussi le choix des plants de référence. Puis, une présentation de l'ensemble des résultats ainsi qu'une discussion de ceux-ci en fonction des données théoriques recueillies permettront de constater la pertinence ou non de ces deux traitements sur la vigne. Enfin, une analyse des coûts permettra de voir si les traitements peuvent être généralisés à l'ensemble du vignoble.



## PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE

Les Vignobles Gonfrier sont situés en Gironde, en Entre-Deux-Mers géographique qui appartient au vignoble Bordelais. Plus spécifiquement, l'activité de production est basée à Lestiac-sur-Garonne au Château de Marsan. Cette production est à séparer de l'activité de négoce présente quelques kilomètres plus loin aux Chais de Rions. Ainsi ce mémoire ne prend pas en compte cette dernière activité.

Malgré leur caractère familial, les vignobles Gonfrier sont un vignoble de grande ampleur (plus de 700ha) avec la volonté permanente de s'agrandir. Les parcelles sont ainsi étalées sur plus de 30 km de long sur 15 km de large. Ce périmètre comprend 6 appellations : Bordeaux, Bordeaux Supérieur, Cadillac, Cadillac Côtes de Bordeaux, Entre-Deux-Mers et Graves. Cependant, la majorité des vins sont en AOC Bordeaux Supérieur et Cadillac Côtes de Bordeaux.

L'encépagement du domaine est composé à 85% de cépages rouges avec une majorité de Merlot (60%) et de Cabernet Sauvignon (22%). On peut aussi trouver du Cabernet Franc, Malbec et Petit Verdot. Pour les cépages blancs, on trouve une majorité de Sauvignon Blanc et de Sémillon.

Les vignes sont relativement jeunes autour de 25 ans d'âge moyen.

Les porte-greffes majoritaires sont 3309 C (bien adapté au Merlot) et 101-14 MGt (qui forme un meilleur assemblage avec le Cabernet Sauvignon).

L'écartement entre les rangs est généralement de 2 m et la distance entre les souches d'1 m pour une densité moyenne est de 5 000 pieds/ha. Les vignes sont palissées et taillées en Guyot double.

La pratique de l'enherbement est généralisée à l'ensemble du parcellaire. Il s'agit d'un enherbement spontané, présent sur tous les inter-rangs. Ce choix s'explique par la richesse en limons des sols du domaine qui permet de limiter l'érosion et de structurer les sols grâce au système racinaire. Un désherbage chimique était effectué auparavant sous le rang. Cependant, le domaine a investi depuis quelques années, dans des disques émotteurs permettant le binage superficiel sous le rang.

La fertilisation s'appuie sur des analyses de sols, de sarments et sur le suivi pétiolaire, pour définir au mieux les quantités à apporter. Les parcelles sont classées par « classes » en fonction du terroir, du cépage, du potentiel de production, de la qualité des raisins produits, de la position géographique, du type de sol et de la vigueur. En effet, du fait des nombreuses parcelles présentes, il est impossible de toutes les suivre individuellement.

La production comptabilise 150000 hL, avec 70% de mise en bouteilles et le reste vendu en vrac. Les vins produits sont de toutes sortes leur permettant d'avoir une large gamme : rouges, blancs (moelleux et secs), rosés, crémants et liquoreux. Le prix moyen de la bouteille HT est de 3 euros 50 mais peut pour certaines cuvées être plus important (sélection parcellaire, vinification intégrale, terroir de haute qualité etc).



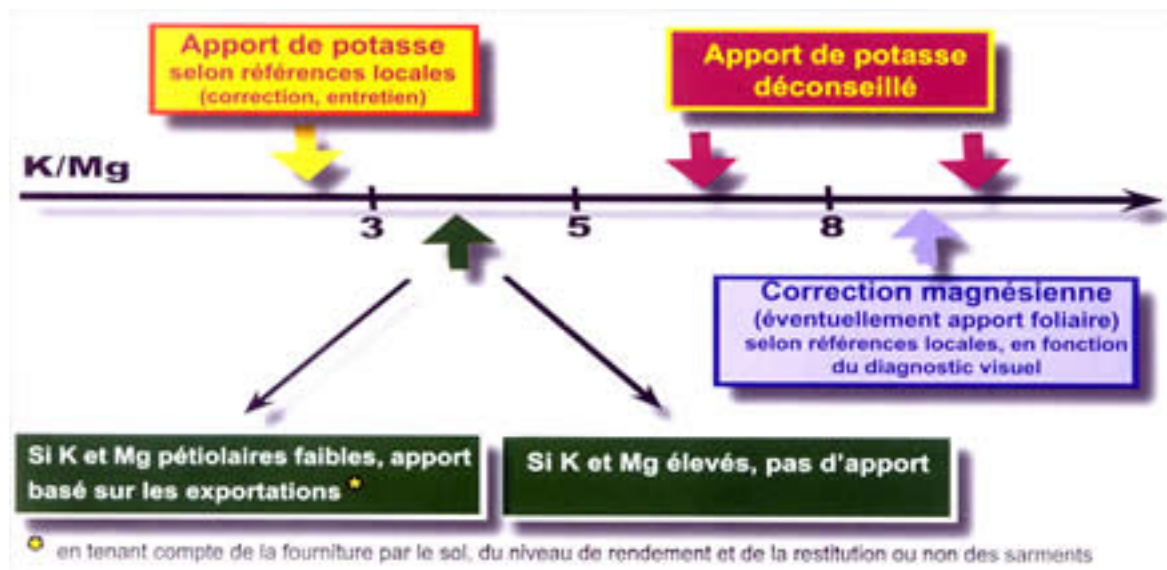


Figure 1 : Interprétation des corrections à réaliser en fonction du rapport K/Mg (IFV)



Figure 2 : Feuilles symptomatiques d'une carence magnésienne (Source personnelle)

## I- Le fer et le magnésium :

1°/ L'importance d'une bonne nutrition :

### a) Impact du magnésium :

#### i) Propriétés du magnésium :

Le magnésium est un macro nutriment essentiel pour la plante et se retrouve dans plusieurs fonctions primordiales du métabolisme qui sont directement liées au développement et à la croissance du végétal.

Le magnésium dans la plante est lié à la photosynthèse. C'est l'atome central de la chlorophylle et il est notamment impliqué dans les transports d'électrons au sein des chloroplastes. Le magnésium influence également favorablement l'assimilation des autres éléments nécessaires pour la plante (*Dorenstouter H., Pieters G. et Findenegg G., 1985*).

De plus, selon *Cakmak et Yazici (2010)*, le magnésium est indispensable à la synthèse des sucres puisqu'il est impliqué dans le chargement du phloème. Le magnésium se lie avec l'ATP et active l'enzyme H<sup>+</sup>ATPase qui fournit l'énergie nécessaire pour ce processus. Le chargement du phloème permet le transport du saccharose dans les cellules du phloème.

Le magnésium est considéré comme un cofacteur et modulateur allostérique pour plus de trois cents enzymes comme les carboxylases, phosphatases ou encore les kinases (*Pakrasi et al.2001*).

Il joue également un rôle important pour chélater les formes nucléotidiques triphosphates et diphosphates lui permettant de jouer un rôle dans l'équilibre énergétique des cellules (*Igamberdiev et Kleczkowski, 2003*).

*Cakmak et Yazici (2010)* ont découvert que le magnésium est impliqué dans certaines autres fonctions, telles que la synthèse des protéines et la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS).

#### ii) Impact du sol sur les carences magnésiennes :

L'absorption du magnésium par la plante est affectée par l'effet antagoniste du calcium et du potassium. Ainsi une forte concentration de ces deux derniers éléments dans le sol peut bloquer l'absorption du magnésium même s'il est présent en quantité suffisante. Cette absorption peut être notamment réduite par la présence de porte-greffes qui absorbent mal le Mg. Ainsi les porte-greffes SO4 ou R110 n'absorbent pas bien cet élément minéral (*SADEF, 2006-2010*).

Une diminution de la teneur en magnésium dans les baies de raisin s'observe sur des sols acides, altérés et sableux. Dans ces sols le Mg y est fortement lixivié. De plus, la présence de calcium et de bicarbonate (HCO<sup>-</sup>) est connue pour empêcher l'absorption de Mg par effet concurrentiel (*Cakmak et Kirkby 2008*). Il a également été constaté que la formation de MgCO<sub>3</sub> dans les sols alcalins réduit la disponibilité du Mg pour les plantes (*Broadley et White, 2010*).

La chlorose est causée soit par un manque absolu de Mg du sol, une teneur élevée en Ca du sol (sols calcaires) mais aussi une teneur élevée en K ou une combinaison de ces facteurs (*Garcia M, 1999*).

#### iii) Reconnaître une carence :

On peut parler d'une carence magnésienne lorsque le rapport K/Mg est supérieur à 8 (Figure 1). Les carences se caractérisent par des décolorations sur le bord des feuilles de couleur jaune ou rouge selon le cépage. Plus la carence est sévère plus la décoloration est importante sans toutefois coloniser les nervures (Figure 2). À véraison, si la carence est sévère, les ramifications des feuilles inférieures deviennent plus petites, la feuille brunit et elle finit par tomber (*SADEF, 2006-2010*).

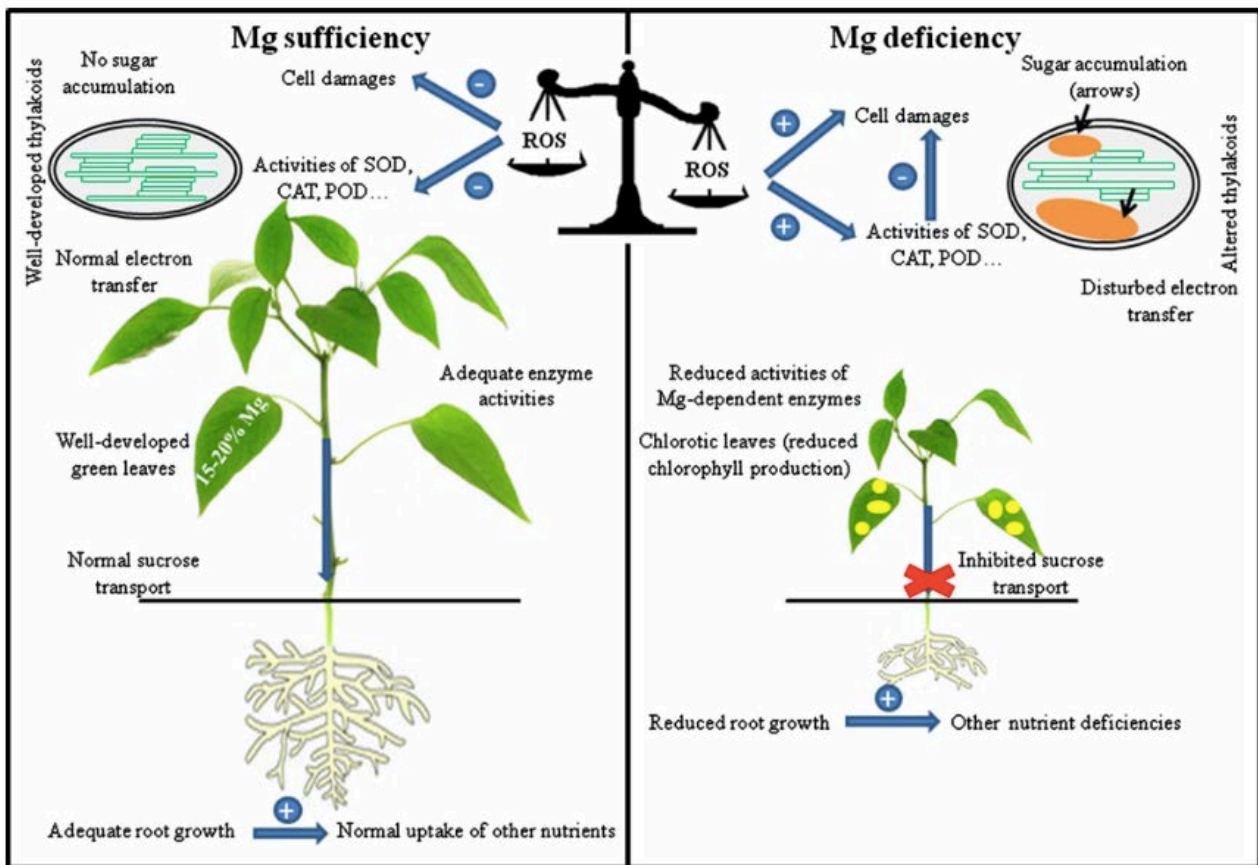


Figure 3 : Les effets majeurs d'une carence magnésienne (Farhat, 2016)

Cette réduction de la chlorophylle provoque également un assèchement de la rafle, un mauvais aoûtement et parfois une coulure qui peut s'avérer sévère (SADEF, 2006-2010).

iv) Les conséquences moléculaires possibles de la carence (Figure 3) :

Il a été constaté qu'une carence en magnésium affecte négativement la Rubisco impliquée dans la fixation du CO<sub>2</sub> (Andersson 2008), ce qui peut expliquer la réduction du taux de photosynthèse. En effet, il a été démontré que la carence en Mg induit une altération du transport linéaire d'électrons photosynthétiques (Hermans et al. 2004), et cela a été suggéré comme étant le principal facteur contribuant à une diminution de l'assimilation du CO<sub>2</sub>. L'altération de la fixation du CO<sub>2</sub> induit la génération de ROS. Ces espèces peuvent endommager gravement les composants cellulaires, tels que les lipides membranaires, les protéines et les acides nucléiques, entraînant une perturbation du métabolisme (Scandalios, 2005).

Une autre cause de la carence magnésienne sont les dommages créés dans l'ultra-structure des chloroplastes. Les chloroplastes deviennent ronds et plus gros en raison d'une accumulation de grains d'amidon surdimensionnés. Les thylakoïdes sont ainsi perturbés (Farhat et al. 2014). De plus, la teneur moyenne en magnésium des feuilles est en moyenne d'environ 0,3%. Une carence en Mg réduit la teneur en chlorophylle dans les feuilles et modifie le rapport chlorophylle a/chlorophylle b en faveur de la chlorophylle b à cause d'une modification de la structure et des activités photochimiques du PSI et PSII (Dorenstouter H., Pieters G. et Findenegg G., 1985). L'activité photosynthétique se trouve ainsi impactée.

L'effet le plus destructeur de la carence en magnésium est l'accumulation des sucres dans les feuilles sources ne permettant pas un transport dans les organes puits en croissance. Ainsi, la croissance des plantes, l'activité photosynthétique et la morphologie des feuilles sont impactées (Ericsson et Kahr, 1995).

v) Les conséquences sur le végétal :

Les premières années de carence n'affectent généralement pas les quantités récoltées ainsi que la croissance des plants. En revanche, à cause de la chute des feuilles, la maturation du raisin peut être retardée, révélant des teneurs en sucres plus basses dans les raisins (SADEF, 2006-2010).

Après plusieurs années de carence, la plante devient fragile, ses réserves diminuent, son alimentation minérale est insuffisante. La plante est affaiblie et elle est ainsi plus sensible aux maladies (SADEF, 2006-2010).

De plus, un déficit en magnésium ou un rapport déséquilibré entre K et Mg peuvent également provoquer une nécrose des tiges, un rétrécissement des baies et des racines (Skinner P. et Matthews M., 1990). Le rendement en sera donc impacté.

vi) Les solutions proposées :

En prévention d'une carence magnésienne, il est recommandé de réaliser un travail adapté du sol, d'éviter les cépages sensibles tels que le Cabernet Franc, le Sauvignon ou encore le Cabernet Sauvignon (même si le contexte Bordelais permet rarement de suivre cette recommandation). Il convient aussi de favoriser des porte-greffes qui ont une bonne absorption du magnésium comme le 140Ru ou le 1103Pa. De plus, il est nécessaire de ne pas effeuiller les cépages trop sensibles mais aussi trop précocement (pas avant la floraison).

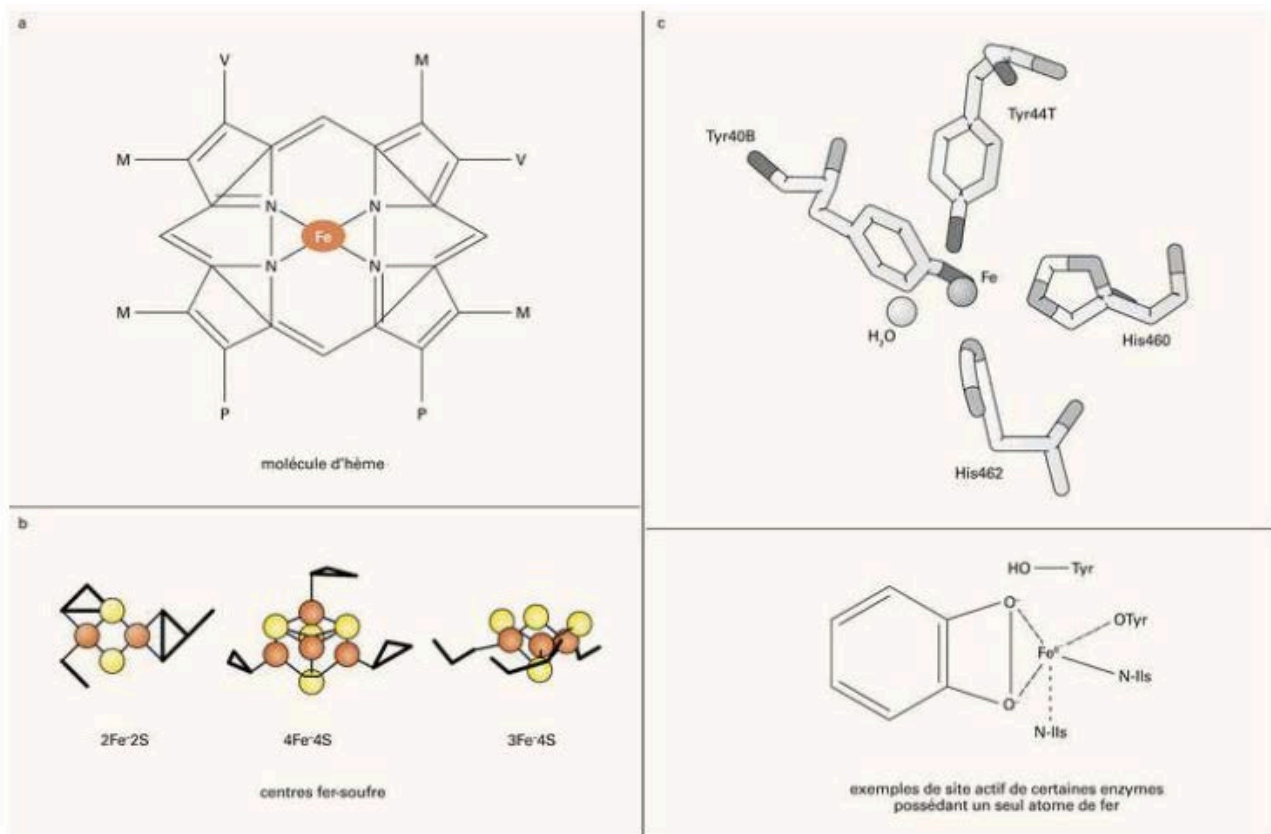


Figure 4 : Interaction du fer à l'hème (a), au soufre (b) et exemple de liaisons directes (c) (Beaumont C.)

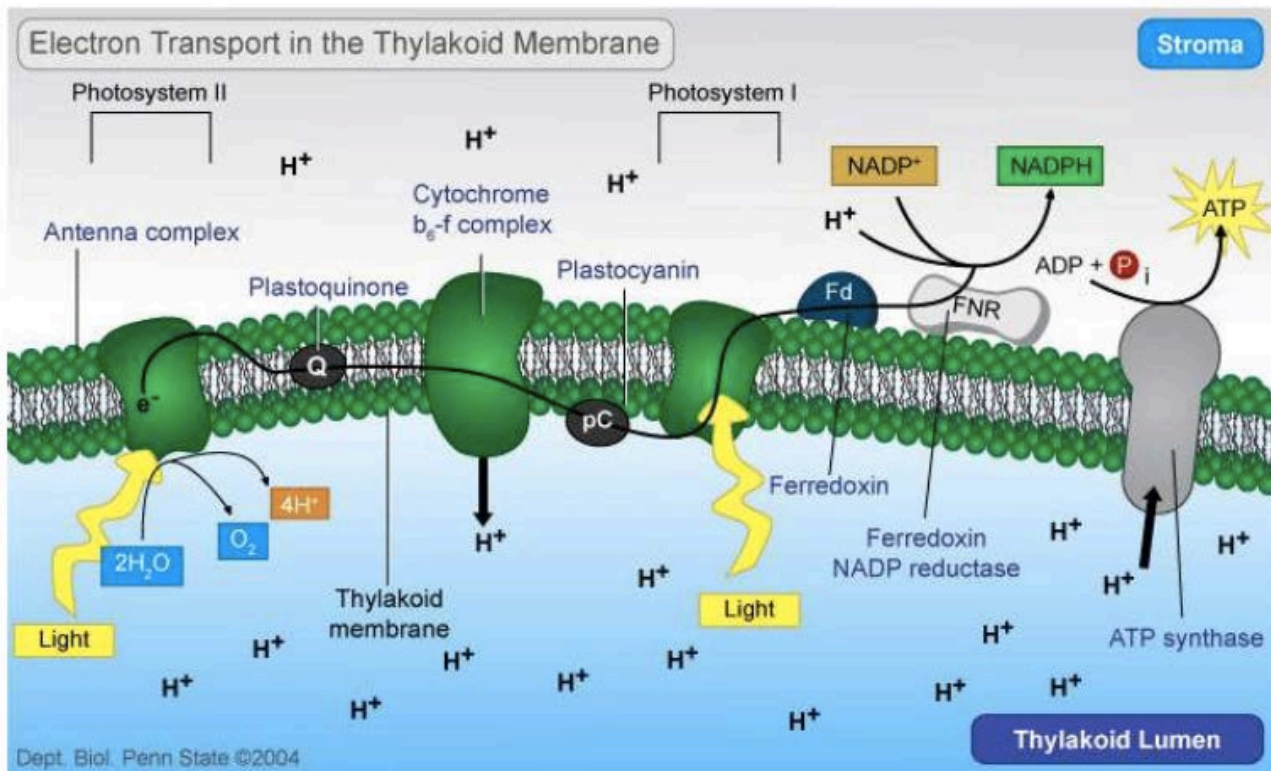


Figure 5 : Fer constituant de la chaîne de transport d'électrons (Graham H.T., 2010)

Enfin, le plus important reste de surveiller le rapport K/Mg pour le contrebalancer le plus rapidement possible pour qu'il reste dans des valeurs acceptables. Dans le cas d'une fumure de fond, il sera préférable de réaliser une analyse de sol en revanche pour une fumure d'entretien, il convient de réaliser des analyses pétiolaires car elles sont de bons indicateurs de la nutrition de la plante (*IFV*).

Si les mesures préventives n'ont pas été suffisantes ou si le problème n'a pas été suivi de près depuis plusieurs années, des mesures curatives devront être appliquées.

Il est possible de diminuer la charge de grappes si le pied en porte beaucoup, cela limitera l'affaiblissement du pied. Enfin la meilleure façon d'agir est de veiller à une alimentation optimale par le biais du sol sous forme de Patentkali ou d'ESTA Kiesérite qui peuvent compléter un apport foliaire d'EPSO, surtout pour les cépages sensibles (*ks-France*).

#### vii) Les effets du magnésium sur la fermentation :

Une augmentation du ratio Magnésium/Calcium permet un commencement plus rapide de la fermentation alcoolique, une augmentation de la production en éthanol ainsi qu'une augmentation de la viabilité des levures en fin de fermentation (*Elizabeth M. et Graham G., 1997*). En effet, lorsque la concentration en magnésium est élevée, on observe une augmentation de la pyruvate décarboxylase qui favorise la production d'éthanol (*Walker, 1998*).

Cependant, un ratio trop élevé a un effet délétère sur la fermentation alcoolique en provoquant une inhibition de la consommation des sucres par les levures et une diminution de la production en éthanol (*Birch et al., 2003*).

#### b) Impact du fer :

##### i) Propriétés du fer :

Le fer lui aussi joue un rôle fondamental dans le métabolisme des plantes. Comme c'est un élément essentiel à la formation des protéines et des enzymes, il a une action dans la formation de la chlorophylle et donc dans la photosynthèse. En effet, le fer a un rôle dans la structure de la porphyrine de la chlorophylle et il est donc un des composants primordiaux des chloroplastes (*Grape Growers's Handbook, 2018*). De plus, le fer joue un rôle dans la formation des groupes prothétiques des systèmes enzymatiques tels que les cytochromes, les catalases et les peroxydases. Ces enzymes sont impliquées dans la formation des principaux composants des chloroplastes et des mitochondries (*Mengel et Kirby, 1987*).

Comme le fer est l'un des constituants du cytochrome, il joue également un rôle dans la respiration. En effet, le cytochrome est un transporteur d'électrons et le cytochrome oxydase (Figure 5) est impliqué dans l'étape finale de la chaîne respiratoire (*Grape Growers's Handbook, 2018*).

On peut aussi citer que le fer permet un renforcement des cellules, une bonne fixation de l'azote et qu'il est au coeur des mécanismes d'absorption et de la synthèse de l'ADN grâce à l'action de la ribonucléotide réductase (*Grape Growers's Handbook, 2018*).

Le fer possède une grande affinité pour les sites des métalloprotéines actives, ainsi c'est un cofacteur de nombreuses enzymes qui entrent dans la synthèse des hormones végétales, comme l'éthylène, la lipoxigénase, l'acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique oxydase ou l'acide abscissique (*Siedow, 1991*). En tant que cofacteur il est au coeur des réactions redox (structure de l'hème fer) qui sont nécessaires à la production et à l'utilisation de l'oxygène (Figure 4).



Figure 6 : Feuilles symptomatiques d'une carence ferrique classique (*Source Personnelle*)

De plus, le fer est également actif dans la synthèse des protéines. Par exemple, il interagit avec des protéines non hémiques telles que celles du groupe sulfure de fer comme la ferrédoxine ou le superoxyde dismutase (Figure 4) (Bennet, 1945).

Ainsi le fer se situe au coeur des nombreuses réactions énergétiques à la base du métabolisme de la plante. En effet, une étude menée par *McDonagh B. et al. (2011)*, montre un lien indéniable entre le métabolisme du fer et celui des thiols. Le lien reste à ce jour assez flou et dépend grandement des quantités de fer présentes dans le végétal. De plus, un lien entre les anthocyanes et le fer a été démontré par l'étude de (*Pengbao Shi et al., 2017*) et sera expliqué plus en détail dans la partie I2°/b).

#### ii) Impact du sol sur les carences ferriques :

Les carences en fer se localisent principalement sur des sols calcaires avec un pH élevé provoquant une chlorose ferrique induite par la chaux (*Grape Growers's Handbook, 2018*).

La disponibilité en fer dans le sol dépend de sa texture, de la concentration en  $\text{CaCO}_3$ , de la matière organique, du pH, de la quantité de fer sous forme solide (*W.L. Lindsay, 1976*). D'autres facteurs comme la concentration en bicarbonate dans le sol, la quantité d'eau dans le sol, les niveaux de phosphates, les niveaux élevés en métaux lourds, les températures extrêmes (hautes ou basses), une forte intensité lumineuse, les hauts niveaux d'azote nitrique, les déséquilibres d'apports cationiques, une mauvaise aération du sol, les virus ou les nématodes qui attaquent les racines peuvent être des facteurs contribuant à la carence ferrique (*Wallace et Lunt, 1960*).

La toxicité du fer est principalement liée à des pH bas qui provoquent un excès de fer disponible. Les carences se localisent le plus souvent dans des sols avec des valeurs de pH extrêmes (*Grape Growers's Handbook, 2018*).

#### iii) Reconnaître une carence :

Les premiers signes d'une carence ferrique se localisent sur les feuilles apicales en début de saison. Puis le jaunissement des feuilles se propage sur l'ensemble du végétal (*Grape Growers's Handbook, 2018*).

Au début, la teinte est jaune et ne colonise par les nervures. Plus la carence devient grave, plus le jaunissement impacte les nervures et la teinte devient ivoire (Figure 6). Les zones ainsi décolorées se nécrosent et le bord des feuilles se dessèche. À des stades très graves, on peut obtenir une nécrose totale de la feuille qui se décolore rapidement et sèche donnant un aspect chétif à la plante (*Guilbault P., 2003*).

Ainsi les carences peuvent être de trois types. Elles peuvent être soit dues à un manque de fer dans le sol, soit dues à la présence de calcaire qui à cause des ions carbonates rendent le fer moins disponible pour les racines, soit dues à la présence des bicarbonates qui rendent le fer inutilisable pour la plante (insolubilisation) même s'il est absorbé en quantité suffisante (*Guilbault P., 2003*).

#### iv) Les conséquences moléculaires possibles de la carence :

Le fer est impliqué dans le bon fonctionnement des mitochondries. Comme ces structures sont les centres énergétiques des cellules racinaires, les carences en fer impactent la croissance des racines (*Vigani, 2013*).

La limitation du fer entraîne une diminution de nombreux composants photosynthétiques, dont la ferrédoxine qui est une protéine fer-soufre impliquée dans les voies oxydoréductrices essentielles des chloroplastes (*Tognetti et al., 2007*).





Un manque de fer modifie l'ultra-structure des chloroplastes ce qui va provoquer une disparition des thylacoïdes granaires qui deviennent plus petits (Bould C. et al., 1983). À cause de l'impact sur les chloroplastes, on a donc une inhibition de la synthèse de chlorophylle diminuant ainsi la photosynthèse de la plante.

L'utilisation du ribulose-1, 5-biphosphate par la rubisco et sa régénération par le cycle de Calvin semblent toutes les deux compromises chez les plantes carencées en fer (Arulanathan et al., 1990).

v) Les conséquences :

De sévères carences en fer peuvent provoquer une diminution du rendement car l'absence de fer peut gravement impacter la croissance du végétal, la coulure de la fleur, la réduction de la taille des baies et le dessèchement de la grappe (*Viticulture&vignoble.fr*).

Les plantes privées de fer développent généralement des symptômes chlorotiques entre les nervures des jeunes feuilles ainsi qu'une mauvaise formation des racines, et lorsque les carences sont graves, elles entraînent un retard de croissance, une stase et la mort de la plante (Kobayashi et al., 2003).

Les autres conséquences sont une difficulté de maturation des baies, du fait généralement, d'une mauvaise accumulation des sucres à l'Automne. Chaque année, la chlorose devient plus précoce provoquant un affaiblissement de la souche (*Guilbault P., 2003*).

Le moût des raisins carencés aura une acidité plus faible et une plus faible quantité de composés aromatiques (*Viticulture&vignoble.fr*).

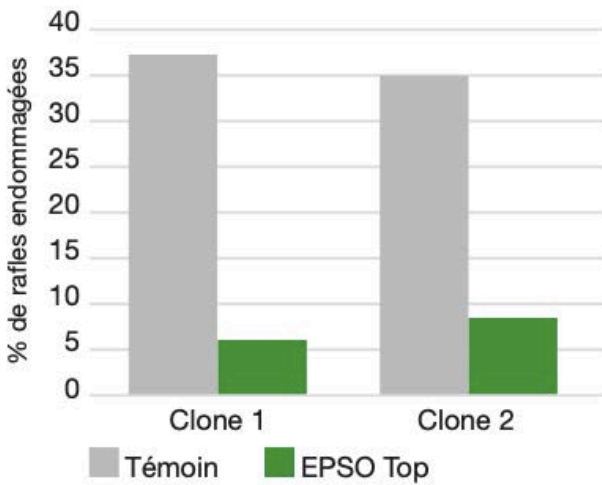
vi) Les solutions proposées :

En prévention d'une carence ferrique, il est recommandé de ne pas travailler le sol quand celui-ci est humide pour limiter la solubilisation du carbonate de calcium (surtout pour des sols calcaires). On peut également travailler le sol de façon superficielle pour ne pas endommager les racines. À la plantation, il convient de choisir un porte-greffe adapté comme le Fercal, le 140Ru ou le 333EM (*Guilbault P., 2003*).

Les applications foliaires avec des sels de fer (sulfates, chélates) avant la floraison ont permis de corriger les problèmes de carence modérée (*Grape Growers's Handbook, 2018*). Plus une carence est traitée sur des feuilles jeunes et précocement, plus le traitement sera efficace. Il convient de ne pas traiter pendant la floraison pour éviter les coulures qui risqueraient d'impacter le rendement. Enfin, le fer n'est pas compatible avec des fongicides cupriques ou organiques, ainsi il faut espacer les différents traitements entre eux (*Guilbault P., 2003*).

En général, les applications directes au sol de fer inorganique ne sont pas efficaces pour fournir du fer aux vignes. Une application foliaire de chélates de fer peut être pulvérisée pour un effet immédiat, mais plusieurs applications peuvent être nécessaires pour corriger les carences graves (*Grape Growers's Handbook, 2018*). D'autres recommandent pour des carences graves des apports au sol sous forme de sulfates ferreux en poudre à enfouir par sous-solage avec des résidus végétaux (marcs ou fumier) en hiver. Il est également recommandé d'appliquer une solution de sulfate de fer localisée au niveau des ceps. Si la carence devient très importante il sera plus efficace de complanter les pieds touchés par du Fercal (*Guilbault P., 2003*).

**Dessèchement de la rafle pour deux clones de Pinot Noir**  
deux traitements à l'EPSO Top chacun à raison de 10 et 20 kg/ha



Source: W.Siegfried, Wädenswill (All.), 2006.

**Essai dessèchement de la rafle**  
Deidesheim, Rhénanie-Palatinat (All.)

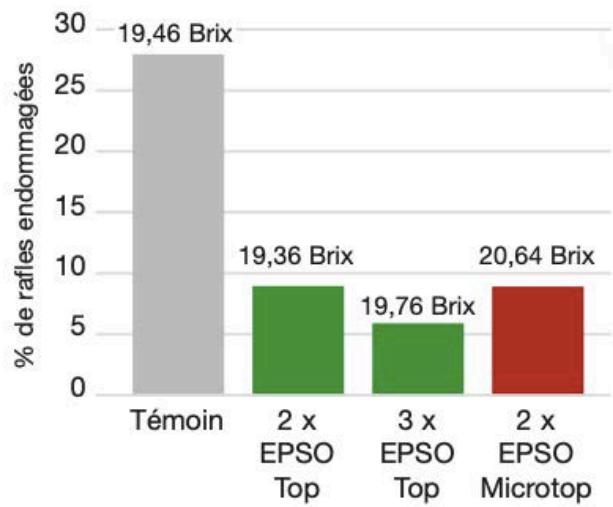


Figure 7 : Efficacité de l'ESPO sur le dessèchement de la rafle (W.Siegfried et al., 2006)

**Essai ASE / ABC chez M. Jean-Paul Devay**  
**69620 Le Breuil - Année 2000-2003**

Cépage : Viala de 1950, année 2003.  
Epannage Oxyfertil® Ca 94 % CaO le 24/10/00 à 1 530 VN/ha

**Chambre d'agriculture de la Gironde**  
**Château de Bonnat**

Cépage : Merlot de 8 ans, année 1996.  
pH<sub>eau</sub> = 5,55 - MO = 2,8 % - CEC = 5,54 méq/100 g - Ca/CEC = 33 %  
Epannage Oxyfertil® Mg (64 % CaO - 33 % MgO) à 2,75 t/ha le 23/02/95

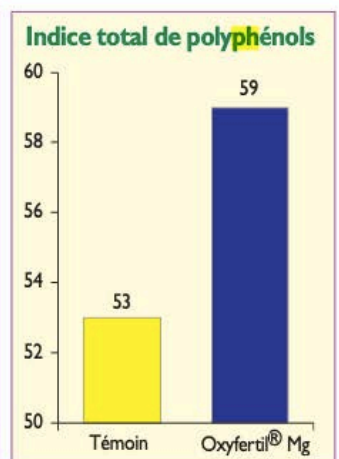
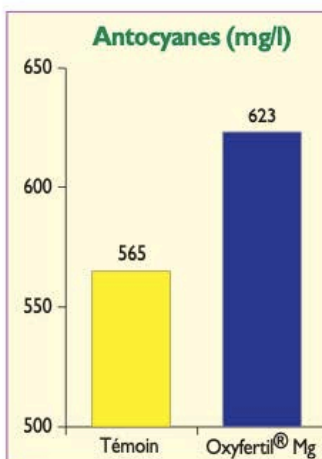
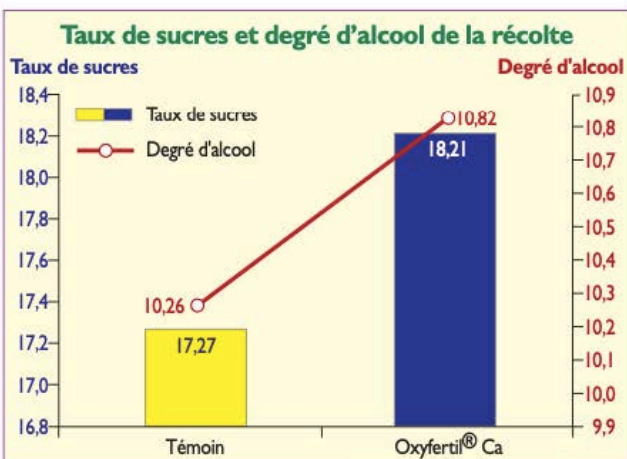


Figure 8 : Impact d'épannage d'Oxyfertil sur le taux de sucres, la concentration en anthocyanes et l'indice total de polyphénols (Capital, Sol, 2008)

2°/ Les recherches scientifiques déjà réalisées sur ces traitements :

a) Les traitements de magnésie :

Très peu d'études ont été réalisées sur le sujet. On peut tout d'abord mentionner une étude réalisée sur un an (*Zatloukalová T. et al., 2010*), en République Tchèque sur une variété endémique. Cette étude compare les effets d'une pulvérisation foliaire (répétée 5 fois) et d'une application directement au sol de kiesérite. Les différents traitements n'ont pas d'impact sur les concentrations en potassium et en calcium. Cependant, les applications foliaires permettent d'augmenter significativement la concentration en magnésium dans la feuille. En revanche, si le traitement est réalisé au sol, une augmentation de rendement est observée. Il est également bon de noter que le NDVI n'est pas impacté tout comme le pH, l'acidité totale et la concentration en sucres.

Une autre étude a été réalisée cette fois sur 3 ans, dans le même pays sur une variété endémique (*Zlámálová T. et al., 2015*). Il a été montré qu'un traitement de magnésium permettait d'augmenter de 11,2% le rendement par rapport à un sol non traité. Des tendances apparaissent (pas de résultats significativement différents) sur la quantité de sucres. Celle-ci était plus faible pour les pieds traités tout comme l'acidité totale. En revanche, aucune différence n'a été constatée sur le pH.

Une autre étude (*S.N. Trolove et al., 2008*) a comparé des traitements réalisés en foliaire et au sol à base de kiesérite sur du Chardonnay en Nouvelle Zélande. L'engrais au sol n'a eu aucun effet sur le Mg foliaire. Les carences n'ont ainsi pas pu être comblées par cette méthode. Après des analyses de sol, les données ont montré que la majeure partie du Mg appliquée à ce sol sableux était restée dans les 30 premiers centimètres et ce même 18 mois après l'application de kiesérite. La kiesérite n'a pas pu aller en profondeur pour alimenter les racines. En effet, les vignes n'ont pas été irriguées pendant cette période pouvant expliquer que ce traitement n'ait pas marché.

Les porte-greffes influencent la concentration en magnésium puisque la vigne poussant sur du 3309C a une plus grande concentration en magnésium foliaire que le SO4.

Enfin, une légère hausse du magnésium foliaire a été constatée avec le traitement foliaire répété un très grand nombre de fois.

Dans tous les cas, il n'y a pas eu d'impact sur la qualité des baies (sucres, pH, acidité totale).

Des traitements foliaires ont été réalisés avec de l'EPSO Top (Figure 7), deux semaines après la floraison. Ce produit a permis de diminuer le pourcentage de rafles desséchées. Il a également permis d'intensifier l'élaboration de fructose et de glucose se caractérisant par une augmentation de la teneur en sucres des moûts (*W.Siegfried et al., 2006*).

La qualité du vin peut également être modifiée suite à des apports d'oxydes de magnésium. Après épandage d'Oxyfertil, il a été prouvé que celui-ci avait permis une augmentation significative du taux de sucres et du degré alcoolique des vins mais aussi une augmentation des anthocyanes et des polyphénols dans le vin (*Capital Sol, 2008*). Les résultats de cette étude sont regroupés dans la figure 8.

Anthocyanins	T0	T1	T2	T3	T4
Dp	7.39 ± 0.23e	19.06 ± 0.30a	17.20 ± 0.04b	11.90 ± 0.02d	15.35 ± 0.02c
Cy	1.74 ± 0.006c	6.87 ± 0.002a	3.95 ± 0.030b	3.76 ± 0.853b	4.45 ± 0.012b
Pt	8.42 ± 0.027e	15.44 ± 0.006b	20.54 ± 0.002a	14.07 ± 0.078c	11.14 ± 0.012d
Pn	15.70 ± 0.02e	26.85 ± 0.13c	28.88 ± 0.05a	27.49 ± 0.18b	21.87 ± 0.02d
Mv	124.35 ± 0.23d	203.60 ± 0.36c	274.57 ± 0.40a	269.56 ± 0.31b	123.62 ± 0.10d
Dp-acet	2.95 ± 0.001d	6.23 ± 0.299b	8.11 ± 0.001a	5.34 ± 0.028c	5.09 ± 0.003c
Cy-acet	2.12 ± 0.001e	4.68 ± 0.253c	7.82 ± 0.019a	5.95 ± 0.009b	2.80 ± 0.010d
Pt-acet	4.65 ± 0.04e	7.86 ± 0.30c	14.17 ± 0.04a	8.92 ± 0.05b	5.60 ± 0.01d
Dp-coum	0.80 ± 0.001d	1.84 ± 0.151c	4.47 ± 0.048a	2.95 ± 0.317b	1.09 ± 0.024d
Pn-acet	7.87 ± 0.02e	13.68 ± 0.14c	18.85 ± 0.06a	14.69 ± 0.02b	10.86 ± 0.02d
Mv-acet	92.74 ± 0.37d	151.50 ± 0.69c	211.27 ± 0.11a	202.62 ± 1.53b	91.54 ± 0.15d
Pn-caff	0.38 ± 0.012c	0.82 ± 0.000b	2.42 ± 0.003a	1.00 ± 0.140b	0.13 ± 0.007c
Cy-coum	0.05 ± 0.005b	0.28 ± 0.002b	1.29 ± 0.023a	0.68 ± 0.499a,b	0.29 ± 0.016b
Mv-caff	2.43 ± 0.01d	4.02 ± 0.03c	7.28 ± 0.02a	4.39 ± 0.06b	1.38 ± 0.03e
Pt-coum	0.28 ± 0.005e	0.95 ± 0.009c	3.75 ± 0.010a	1.36 ± 0.034b	0.77 ± 0.019d
cPn-coum	0.14 ± 0.003d	0.39 ± 0.012c	1.94 ± 0.114a	0.90 ± 0.017b	0.35 ± 0.004c
tPn-coum	1.40 ± 0.03d	4.39 ± 0.14c	9.71 ± 0.07a	6.27 ± 0.02b	4.20 ± 0.02c
cMv-coum	0.72 ± 0.04d	1.20 ± 0.16c	4.99 ± 0.19a	1.90 ± 0.07b	0.94 ± 0.03c,d
tMv-coum	11.81 ± 0.08e	31.24 ± 0.26c	54.03 ± 0.22a	47.66 ± 0.09b	23.79 ± 0.24d
Total anthocyanins	285.95 ± 0.30e	500.90 ± 0.68c	695.24 ± 0.79a	631.43 ± 1.66b	325.25 ± 0.30d

Figure 9 : Effet de l'application de fer sur les différentes anthocyanes (microg/g baie), les lettres (a,b, c,d,e) représentent les différences significatives entre les différents groupes calculées par le test de Turkey (pvalue < 5%) (Pengbao Shi et al., 2017)

b) Les traitements de fer :

Les études sur les traitements de fer dans le vignoble sont un peu plus nombreuses.

Une première étude menée en Iraq par *Shayan Akram Mustafa* (2018) étudie l'impact de traitements foliaires. Les quantités appliquées ont été de 75 à 150 mL/L. Plus la concentration en fer augmente, plus la surface foliaire, le poids frais et sec des feuilles, le nombre de grappes, le poids des grappes, le rendement, la taille des baies, le poids de 100 baies, les sucres totaux augmentent. Il a également été constaté une diminution de l'acidité totale.

Deux explications possibles ont été avancées. Selon *Bertamini, M. et Nadunchezhian N. (2005)*, l'application foliaire de fer s'accompagne généralement d'une augmentation des caractéristiques de floraison et de rendement. En effet, après traitement, il y a une activation par le fer du système enzymatique et de nombreux processus métaboliques liés à la croissance des plantes ce qui provoque une augmentation de la croissance végétative. Une autre explication est que la disponibilité du fer est plus rapide pour les plantes ce qui implique une augmentation de la teneur en catalase et en chlorophylle, ainsi que la fabrication et l'accumulation de plus de glucides, ce qui semble être associé à une augmentation de la fructification et du développement des fruits (*Mahadhan, S., 2001*).

Une autre étude *Dies El-Anes (1994)* confirme les résultats précédents. Après un traitement foliaire de fer (100ppm), le rendement a été supérieur pour les plants traités.

Une étude menée sur l'application de fer sous forme de chélate « Fe-EDTA » a permis de montrer qu'à une concentration de 200mg/L, on observait une augmentation significative des concentrations en N, P, K, Fe et Zn dans les pétioles et dans les baies par rapport au témoin non traité durant les deux années d'expérimentation. Cette augmentation de la concentration en minéraux dans les pétioles est surtout visible en début de croissance (avant la floraison) et durant la phase de nouaison mais une diminution est constatée vers la fin de la saison de croissance. Alors que les teneurs en N, P, K, Fe et Zn dans les baies augmentent vers le stade nouaison à la véraison jusqu'à la maturité des baies. Une explication possible serait la redistribution des nutriments dans la plante entre les organes sources et les organes puits (*Al-Imam M., 2014*).

Une étude sur l'application de Fe-EDTA a été réalisée sur du Merlot pendant 2 ans en Chine à des concentrations de 0,22 g/L et 0,33g/L. Celle-ci s'intéresse plus spécifiquement à des paramètres organoleptiques qui seront mesurés à l'aide d'une HPLC. Il a été démontré que les sujets ayant subis des traitements de Fe-EDTA tendent à avoir plus de sucres dans les baies, plus d'anthocyanes, plus de flavonoïdes. Ce traitement décroît l'acidité totale et augmente le pH. Les explications peuvent être que le fer accroît le métabolisme secondaire et donc la valeur nutritive des baies permettant l'obtention un vin de meilleur qualité. En revanche, on peut noter que le millésime a une influence sur les résultats (*PengbaoShi et al., 2018*).

Les mêmes chercheurs avaient précédemment fait une étude similaire sur du Cabernet Sauvignon traité avec du Fe-EDTA en fertirrigation. Ils ont montré que la teneur en sucres, la teneur en anthocyanes et les transcriptions des gènes impliqués dans la biosynthèse des anthocyanes étaient corrélées avec des concentrations en fer moyennes (ni de carence ni d'excès) (*Pengbao Shi et al., 2017*). La Figure 9 représente les anthocyanes qui ont vu leur concentration augmenter suite au traitement de Fe-EDTA.



La réussite des traitements au fer peut évoluer selon différents paramètres. Ainsi la pertinence du mouillage des feuilles et les propriétés physico-chimiques de la solution appliquée sont indispensables. Une solution appliquée par voie foliaire doit pénétrer la feuille, ce qui est une condition préalable à l'utilisation du Fe dans les cellules foliaires. Les propriétés de la solution appliquée comme le pH, la tension superficielle ou la capacité d'étalement influenceront la pénétration du fer par les feuilles. De plus, le fer est très dépendant du pH et sensible à l'oxydoréduction. Ceci pose de nombreux problèmes comme par exemple l'immobilisation du Fe (*Victoria Fernández et Georg Ebert, 2005*).

Certaines études ont montré que les chélates de fer se transloquent mieux que les sels de fer provoquant ainsi une meilleure efficacité (*Fernandez et al., 2005*). Enfin, l'importance de l'ouverture des stomates et des facteurs environnementaux comme la lumière pourraient impacter la pénétration des pulvérisations foliaires et la translocation de Fe dans la plante. Ces derniers résultats restent à ce jour incertains (*Fernandez et al., 2005*).

II- Les paramètres importants à regarder pour constater au mieux l'impact des traitements :

1°/ Le statut hydrique :

La contrainte hydrique réduit la photosynthèse, favorise l'arrêt de croissance, limite la taille des baies et stimule la synthèse des composés phénoliques. Une contrainte hydrique modérée augmente la vitesse de maturation malgré la limitation de la photosynthèse, à cause d'une moindre compétition pour le carbone (arrêt de croissance) et d'un volume plus faible de raisin à remplir. Le développement de la vigne et la maturation du raisin sont donc fortement influencés par le régime hydrique. Ce dernier dépend à la fois des réserves en eau du sol, de paramètres climatiques (précipitations, ETP) et de l'architecture de la végétation. Pour une conduite optimale de la vigne, il est donc important de connaître son niveau d'alimentation en eau (*Philippe Vivin, 2008*).

L'étude faite par *Zufferey V. et al. (2017)* sur du Pinot Noir, en Suisse, a montré que si le stress hydrique a été modéré pendant la maturation, l'accumulation de sucres dans les baies a été meilleure. Ils ont également observé une réduction de l'acidité totale et de l'acide malique du moût. Les vins issus de vignes stressées hydriquement avaient une couleur plus foncée et étaient plus riches en anthocyanes et en composés phénoliques. Le statut hydrique de la vigne a fortement influencé la qualité organoleptique des vins obtenus. Les vins issus de vignes non irriguées avec un déficit hydrique durant leur cycle végétatif présentaient plus de structure et des tanins de meilleure qualité. Ils ont également été jugés plus corsés avec des tanins plus fondus que ceux issus de vignes irriguées.

Nous verrons si l'impact de nos traitements a une influence sur la contrainte hydrique qui est directement liée à la qualité du raisin (vitesse de maturation, synthèse de composés phénoliques etc) et sur le rendement (excès de charge ou blocage de la photosynthèse).



Valeurs obtenues	Contrainte hydrique absente
-0,6 MPa < phfb	Contrainte hydrique faible
-0,9 MPa < phfb < -0,6 MPa	Contrainte hydrique faible à modérée
-1,1 MPa < phfb < -0,9 MPa	Contrainte hydrique faible à modérée
-1,4 MPa < phfb < -1,1 MPa	Contrainte hydrique modérée à sévère
phfb < -1,4 MPa	Contrainte hydrique sévère

Tableau 1 : Degré de contrainte hydrique en fonction des valeurs du potentiel de tige (*IFV Occitanie*)

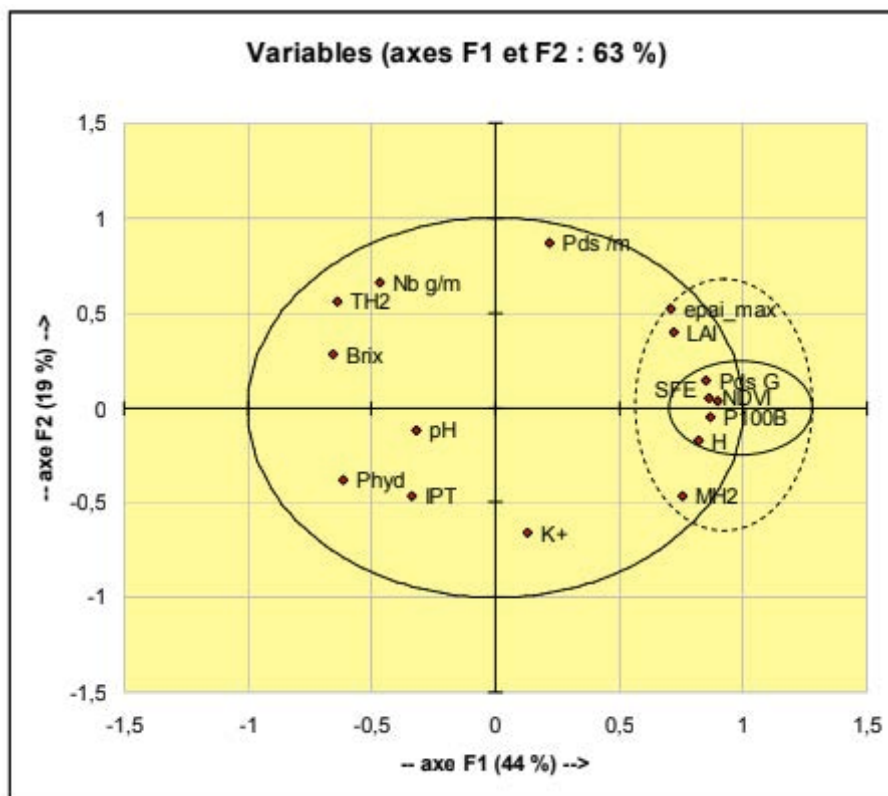


Figure 10 : Analyse en composante principale pour la mise en évidence des corrélations du NDVI (*Rousseau J, 2008*)

#### a) Méthode des Apex :

La méthode des apex donne une information sur la croissance de la plante. En effet, les deux principaux facteurs de croissance sont l'état hydrique et la nutrition minérale (*Rodriguez Lovelle, 2009*).

C'est une méthode peu coûteuse, répétable et robuste qui donne des indications sur la dynamique de croissance et non sur la vitesse de croissance permettant l'évaluation de la réponse de la vigne à la contrainte hydrique car le ralentissement de la croissance de l'apex est une réaction de la contrainte hydrique et minérale (*Rodriguez Lovelle, 2009*).

#### b) Potentiel de tige :

Le  $\delta C_{13}$  est une méthode intégrative qui permet de savoir si la vigne a subi une contrainte au cours de la saison. En revanche, le potentiel de tige lui nous indique le moment où la vigne a vécu un stress. Nous avons ainsi choisi d'utiliser cette dernière méthode.

Le potentiel de tige fournit une valeur proche du potentiel hydrique foliaire de base, avec une meilleure précision si le déficit hydrique est faible (ce qui est le cas dans la région Bordelaise). Le potentiel de tige est lié à la transpiration globale du végétal, de la disponibilité en eau du sol, de la conductivité hydraulique ainsi que de l'interface sol/racine. C'est un bon indicateur du flux de sève au sein de la plante puisqu'il nous donne des informations sur la capacité de la plante à conduire l'eau du sol vers les feuilles (*Choné, 2000*).

Selon les valeurs obtenues nous pourrions savoir le degré de contrainte hydrique que la plante a subi pendant la saison (Tableau 1).

#### 2°/ NDVI :

La mesure de la surface foliaire est faite à la main mais s'avère également longue et fastidieuse. Ainsi la télédétection apparaît comme une technique satisfaisante pour la production de carte à l'échelle de la parcelle.

L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est un indice normalisé permettant de générer une image affichant la couverture végétale (biomasse relative). Cet indice dépend du contraste de deux canaux d'un jeu de données raster multi-spectrales : l'absorption du pigment chlorophyllien dans le canal rouge et la haute réflexion du végétal dans le canal proche infrarouge. La différence de réflexion dans les canaux rouges et infrarouges permet de contrôler la densité et l'intensité de la croissance végétale à l'aide de la réflexion du spectre du rayonnement solaire. En effet, les feuilles plus vertes ont une meilleure réflexion dans les infrarouges que dans le spectre du visible. Cependant, si les feuilles sont moins vertes donc qu'elles ont jauni ou qu'elles sont tachées, la réflexion sera moins bonne dans l'infrarouge. Ainsi l'image NDVI sera différente (*ArcGIS Desktop, 2016*).

Les carences observées les années précédentes ont impacté le feuillage. En effet, les carences magnésiennes et ferriques se caractérisent par un jaunissement du feuillage. Si les carences ne sont pas présentes la réflexion dans les IR devrait être meilleure dans le visible.

Selon une étude menée par *Rousseau J (2008)*, plus le NDVI est important, plus le LAI et la SFE sont importantes (Figure 10). Comme nous le verrons dans la partie suivante, la SFE est directement liée à la qualité de la vendange. De plus, l'étude montre que les fortes valeurs de NDVI sont associées à des grappes et des baies grosses favorables à la production de jus, avec beaucoup d'acide malique et peu de polyphénols totaux pour obtenir des vins légers et fruités. En revanche, les faibles valeurs de NDVI sont associées à des baies plus petites, avec moins d'acide malique et plus de polyphénols totaux permettant d'obtenir des vins plus charpentés et complexes. Après vinification, les différences sensorielles entre les deux types de raisins sont importantes.



### 3°/ Surface foliaire :

L'indice de surface foliaire (LAI) est un indicateur quantitatif de la densité de la canopée. Ce paramètre permet d'évaluer la croissance, la vigueur et la transmission de la lumière à travers celle-ci. Il permet aussi d'avoir accès aux besoins en eau des plantes. Plus la densité de la surface foliaire est importante plus l'interception des rayonnements lumineux sera importante. Ces paramètres influencent le microclimat de la canopée et l'équilibre du carbone des plantes, ainsi que le rendement, la composition du raisin ainsi que le potentiel productif pour les années à venir (*De Bei, 2016*).

Il est possible d'utiliser différentes méthodes pour mesurer ce paramètre. Les premières sont des estimations indirectes et non destructives de la surface foliaire par mesure de l'extinction de la lumière à travers la canopée. Elles sont rapides mais très coûteuses et les outils nécessitent un étalonnage fréquent. Pour des surfaces foliaires trop importantes, les résultats sont souvent sous estimés. Les autres méthodes sont dites directes et basées sur des mesures d'échantillons de feuilles. Elles peuvent être destructives et basées sur l'enlèvement et la mesure de la surface foliaire en laboratoire par des planimètres, la détermination du rapport surface / poids etc. Ces méthodes sont faciles et précises mais laborieuses, et réduiront la surface foliaire photosynthétique réelle. Les méthodes directes non destructives consistent en des mesures in situ de la surface foliaire avec des appareils portables, très coûteux et difficiles à utiliser sur le terrain. D'autres méthodes directes non destructives sont basées sur des relations empiriques entre la surface foliaire et d'autres paramètres qui peuvent facilement être mesurés directement sur la canopée par exemple par la mesure des deux nervures maximales et minimales des feuilles. Ces méthodes sont simples et précises, mais souvent très laborieuses elles aussi (*Lopes et Pinto, 2005*).

### 4°/ Le rapport feuilles/fruits :

Pour calculer la surface foliaire, on ne prend en compte que la surface exposée à la lumière qui intercepte 90% des rayons lumineux. La surface externe du couvert végétal est évaluée par des mesures simples à mettre en oeuvre. Cette valeur permet d'avoir une notion de l'activité photosynthétique de la plante car elle est directement liée à la captation d'énergie solaire. Puis elle permettra de calculer le rapport SECV/PR. C'est un indicateur de l'équilibre physiologique de la vigne puisqu'il est directement lié au potentiel de maturation (*IFV*).

De plus, des études ont montré que la qualité du raisin est corrélée avec ce rapport. Ainsi, il a été prouvé que plus ce rapport est important plus le TAV, la teneur en anthocyanes, le taux de sucres, l'indice de polyphénols totaux ainsi que l'intensité colorante augmentent (*Dufourcq T, 2004*). En outre, la qualité des vins des cépages Négrette, Malbec et Duras (du Sud-Ouest de la France) est optimisée quand on obtient un rapport SECV/PR à 2 m<sup>2</sup>/kg (*Dufourcq T, 2005*).

Cependant une autre étude menée par l'IFV, montre que le seuil optimal pour des Merlot se trouve entre 1,2 et 1,5 m<sup>2</sup>/kg. En dessous de 1 m<sup>2</sup>/kg, la maturité ne sera pas bonne avec un TAV de 12%. Les dégustations des Merlot ont été plus appréciées lorsque le rapport était supérieur à 1,5. En revanche, pour le Cabernet Sauvignon, la valeur du rapport n'a pas d'impact sur les dégustations (*Claverie M, 2007*).

Evolution de l'indice de maturité sucres/acidité		
	Merlot	Cabernet-Sauvignon
30 août 1976	33	43
6 septembre 1976	41	45
14 septembre 1976	44	50
18 septembre 1976	47	53
21 septembre 1976	48	55

Dans le calcul, l'acidité est comptée ici en acide sulfurique.

Source : Emile Peynaud : *Connaissance et travail du Vin*

Tableau 2 : Évolution de l'indice de maturité sucres/acides (Dupuch V., 1998)

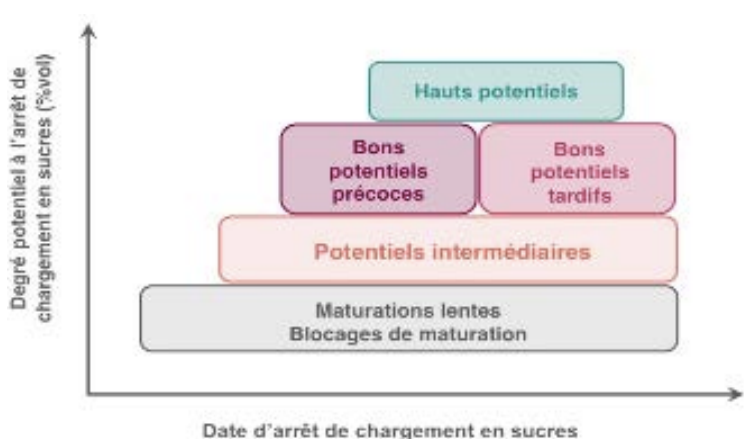


Figure 11 : Les potentiels des raisins obtenus en fonction de la date et du degré potentiel à l'arrêt de chargement en sucres (Bernard, 2019)

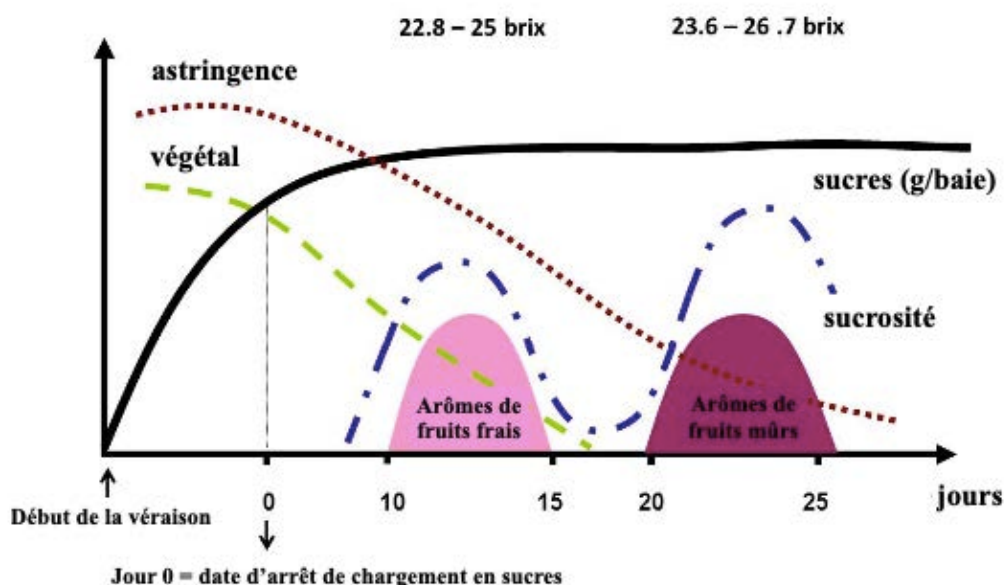


Figure 12 : Séquence aromatique du Merlot en fonction de la date du chargement en sucres (Deloire A., 2006)

#### 5°/ Statut minéral par analyses pétiolaires :

L'analyse pétiolaire nous donne la concentration en éléments minéraux dans la plante à un moment donné notamment à la véraison, période où les besoins sont cruciaux (maturation de la récolte et mise en réserve). Les analyses pétiolaires à différents stades permettent de suivre l'assimilation des éléments nutritifs présents dans le sol selon la saison (*Chambre d'agriculture du Gard, 2010*).

L'analyse pétiolaire est un outil pertinent qui permet un suivi en temps réel de la dynamique d'assimilation de la vigne, à partir des premiers stades jusqu'à la chute des feuilles. Longtemps limitée à des mesures à véraison ou lors de l'observation de carences, l'analyse pétiolaire dispose d'un potentiel technique vaste. Les techniques sont aujourd'hui plus modernes et permettent de disposer des résultats rapidement quelques jours après le prélèvement. Ainsi sa mesure permet une analyse dynamique des flux minéraux, au cours du temps. Le pétiole n'est pas un organe de stockage donc les minéraux mesurés à un instant donné représentent le flux de ce minéral dans la plante (*Dubernet M. et al., 2014*).

L'analyse pétiolaire se révèle plus discriminante que l'analyse de limbe pour contrôler certains minéraux comme le potassium et le magnésium. Pour les autres éléments, il est difficile d'apporter une réponse car les deux analyses sont très concluantes sauf pour l'azote où l'analyse du limbe est plus appropriée (*Traité de la vigne 3ème édition*).

#### 6°/ Cinétique de maturité et suivi des teneurs en composés phénoliques des raisins :

Les observations faites sur les millésimes précédents montrent des pH élevés caractéristiques d'un manque de fraîcheur des vins. La magnésie pourrait jouer un rôle sur le ratio K/Mg et ainsi corriger le pH en amont (*Pasquier G, 2014*). De plus les études faites sur le fer et le magnésium ont montré que les qualités organoleptiques peuvent être améliorées (augmentation de la concentration en anthocyanes et en polyphénols), tout comme une augmentation de la concentration.

Ainsi le suivi de la maturité technologique (rapport sucres/acidité) est un premier indicateur de la qualité de la vendange. La valeur doit être comprise entre 35 et 50 pour que la vendange soit considérée comme excellente (*Dupuch V., 1998*). Les indicateurs sont cependant différents selon les cépages (Tableau 2).

Ce rapport se base sur deux phénomènes. Le premier, appelé chargement en sucres qui correspond au fait que la teneur en sucres des baies augmente pendant la maturation, grâce à la photosynthèse, aux migrations provenant des feuilles adultes et au métabolisme qui utilise d'autres substrats comme le malate (*Reynier, 2016*). La concentration à la différence de la quantité par baie va atteindre une valeur maximale puis décroître légèrement à cause d'une perte en eau à travers la pellicule de la baie. Pour s'affranchir de cette perte, il est préférable de s'intéresser au suivi du chargement en sucres en quantité par baie (mg/baie). Le degré potentiel à l'arrêt du chargement en sucres en fonction de la date d'arrêt permet d'obtenir des informations sur le potentiel du raisin à maturité (Figure 11) et sur son potentiel aromatique (Figure 12).

Le deuxième phénomène est la diminution de l'acidité. Celle-ci provient à 90% de deux acides organiques, le malique et le tartrique, ainsi que des cations K<sup>+</sup>. L'acide malique voit sa quantité diminuer à partir de la véraison car il est présent dans de nombreuses réactions du métabolisme. Cela serait à mettre en lien avec une relative perte d'étanchéité de la membrane vacuolaire (*Barnavon et al., 2000*). À l'inverse, l'acide tartrique s'accumule dans les baies dès la croissance herbacée sans être métabolisé pour se stabiliser à partir de la véraison (Figure 13). Le suivi des acides est très important pour accéder à la maturité technologique. L'acide malique est sensible aux effets thermiques et il sera dégradé en abondance lors d'un été chaud. La production des acides organiques est favorisée par la vigueur lors de la croissance, mais leur dégradation sera moins bonne lors de la maturation. En effet, l'entassement du feuillage provoque une moins bonne exposition au soleil des grappes.

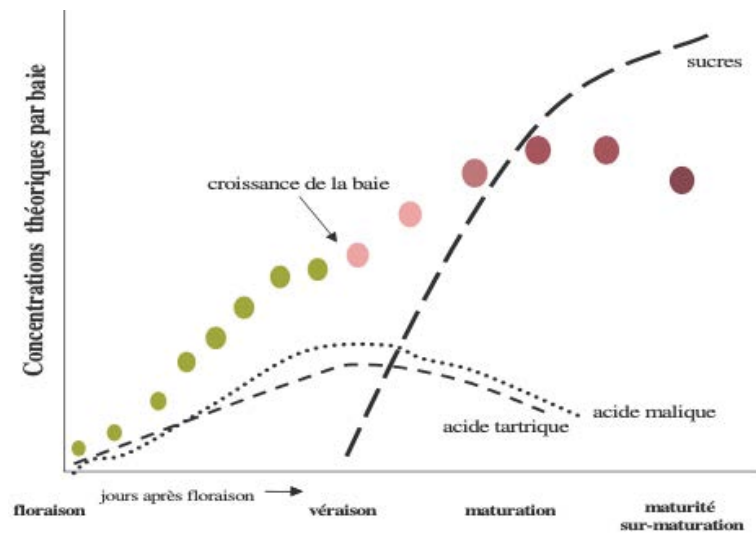


Figure 13 : Courbe théorique de l'évolution de la concentration (g/L) des acides organiques présents dans la baie de raisin (Deloire A., 2007)

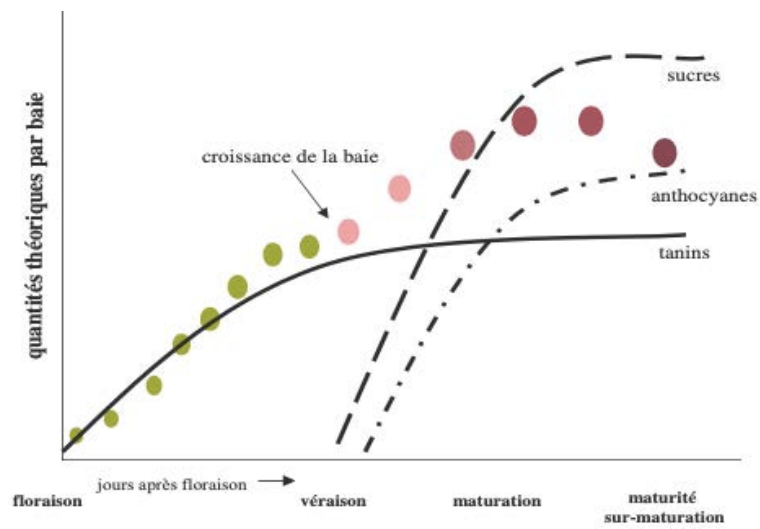


Figure 14 : Courbe théorique de l'évolution de la concentration (mg/L) des anthocyanes et des tanins (Deloire A., 2007)

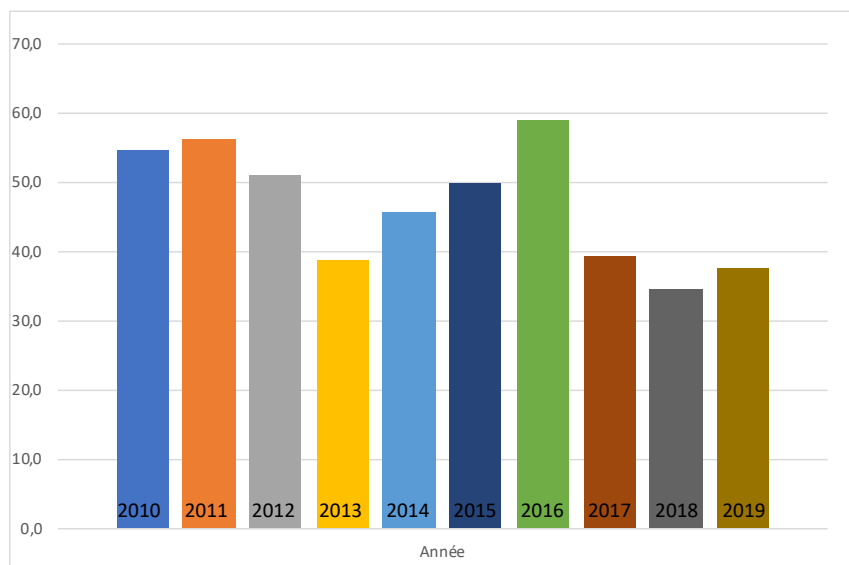


Figure 15 : Graphique représentant les rendements (en hL/ha) depuis 2010 jusqu'à 2019

Pendant la maturation on observe une fuite du calcium, une accumulation des anthocyanes et des tanins dans la pellicule ainsi qu'une diminution des tannins dans les pépins. Les composés phénoliques, notamment les anthocyanes et les flavanes3-ols, s'accumulent dans la baie de raisin au cours de la maturité (*Reynier, 2016*) (Figure 14). Ils constituent de bons indicateurs concernant la réponse de la vigne et des raisins aux conditions environnementales. Une contrainte hydrique élevée avant véraison perturbe le métabolisme des anthocyanes, tandis qu'elle le favorise si elle apparaît après véraison (*Ojeda et al., 2001*). Les anthocyanes s'accumulent dans les pellicules (et dans la pulpe pour les cépages teinturiers) à partir de la véraison pour atteindre un maximum à l'approche de la maturité (*Ribéreau-Gayon et al., 2004*). Leur apparition est bien corrélée à l'accumulation des sucres dans le raisin sans qu'une relation directe n'ait pu être établie (*Wicks and Kliewer, 1983*). Les tanins, localisés essentiellement dans la pellicule et les pépins, sont synthétisés dès le début du développement de la baie ; leur concentration est déjà importante à véraison et a tendance à décroître lors de la maturation (*Ribéreau-Gayon et al., 2004*). Les teneurs en anthocyanes et tanins et leurs évolutions au cours du développement dépendent du milieu mais aussi des conditions climatiques (*Glories, 1984*). Les composés phénoliques interviennent fortement dans les caractéristiques visuelles et organoleptiques des vins (*Ribéreau-Gayon et al., 2004*).

### III- Matériels et méthodes :

#### 1°/ Observations des millésimes précédents :

Les analyses pétiolaires faites sur les années précédentes montrent des rapports K/Mg très supérieurs à 8 (plutôt autour de 15 voir plus). Ces valeurs sont caractéristiques d'une carence en magnésium. De même, les valeurs pour le fer sont relativement basses (de l'ordre de 25 ppm/matière sèche). Les observations sur le terrain ont également confirmé la présence de carences en fer par la présence d'un feuillage vert clair caractéristique. La vigueur elle aussi reste relativement basse sur les millésimes précédents.

L'historique des rendements révèle quant à lui une possibilité de les améliorer. En effet, les rendements peuvent parfois être faible de l'ordre de 35 à 40 hL/hectare ces dernières années bien loin des 50 à 65 hL/ha autorisés par les appellations présentes sur le vignoble (Figure 15). Les indicateurs analytiques (anthocyanes, pH) mettent en évidence ces besoins. Le pH est élevé se traduisant par un manque de fraîcheur, il peut parfois atteindre 3,8. La concentration en anthocyanes pourrait être également supérieure car elle est en moyenne de 700 mg/L.

Des ACP ont été réalisées sur les millésimes précédents (Figure 17) sur un ensemble de 270 parcelles. Le but a été de constater si des corrélations existaient entre les données selon les millésimes. On constate que le NDVI semble corrélé en 2018 comme en 2019 au rendement réel et à l'azote mais anti-corrélé au TAV en 2019. Il semblerait que les tendances montrent que globalement les corrélations sont identiques pour la plupart des paramètres entre ces deux années. En revanche, le pH et le TAP semblent corrélés en 2018 alors qu'en 2019, ils semblent n'y avoir aucune corrélation entre ces deux paramètres.

Une autre ACP (Figure 18) a été réalisée pour constater les corrélations possibles avec le traitement à la kiesérite achevé en 2018. On constate que la kiesérite semble plutôt associée à des vins à haut TAP et concentrés en anthocyanes. En revanche, on voit une absence de corrélations avec la majorité des paramètres : NDVI, rendement, AT, IPT. Comme il a été mentionné précédemment, le millésime a un fort impact sur le végétal. Ainsi, il sera intéressant de constater si les corrélations sont toujours identiques avec les valeurs obtenues cette année.



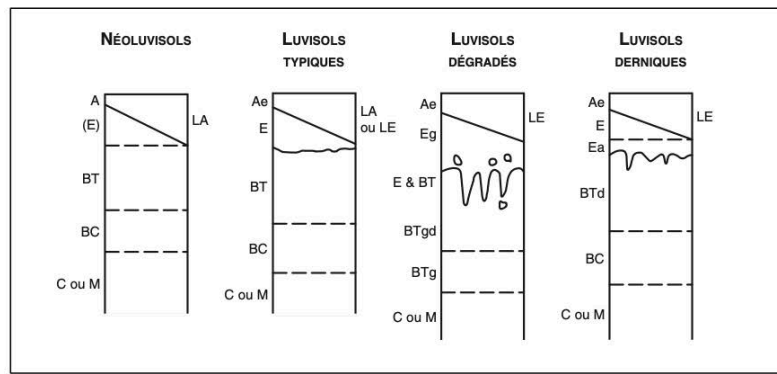


Figure 10 : Évolution des Néoluvissols en Luvisols d'erniques sous l'effet de la dégradation (AFES and Baize, 2009)

*A* : Horizon organo-minéral / *L* : horizon labouré / *E* : horizon éluvial / *BT* : horizon argilluvial / *g* : horizon rédoxique / *d* : horizon dégradé / *C* : horizon d'altération de la roche-mère / *M* : roche-mère et/ou substrat

Figure 16 : Évolution des « Néoluvissols » en « Luvisols » sous l'effet de la dégradation (AFES et Baize, 2009)

Nom parcelles FER	Surf GPS	Cépage	Porte-greffe	Année plantation	Type de sol
Couchebouc 3	0.96	Merlot	3309C	2010	Luvisol rédoxique
Couchebouc 1	2.48	Cabernet Sauvignon	3309C	200	Luvisol dégradé glossique
Malbiche	1.4	Merlot	101-14	2015	Luvisol rédoxique Fluvisol
Terrasson 4-5	1.48	Merlot	3309C	2014	Néoluvissol caillouteux
Nom parcelles Mg	Surf GPS	Cépage	Porte-greffe	Année plantation	Type de sol
Devant le Hangar	2.99	Merlot	101-14	2009	Fluvisol
Roumegoux 1	3.67	Merlot	RGM	2004	Fluvisol

Tableau 3 : Caractéristiques des parcelles expérimentales

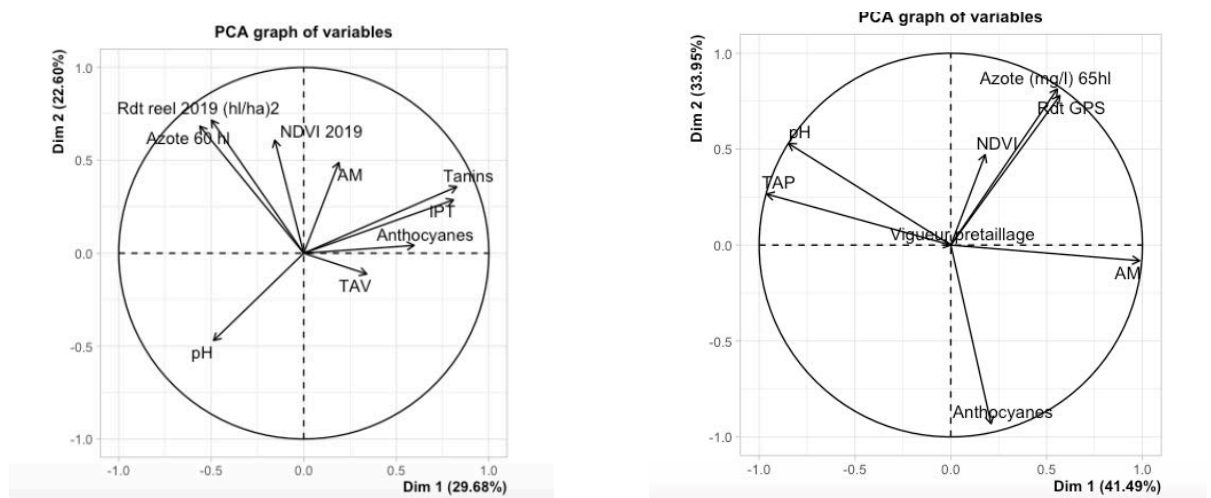


Figure 17 : ACP de l'ensemble des paramètres mesurés pour 2018 (droite) et 2019 (gauche)

Les propriétés du sol, le climat mais aussi le savoir faire du vigneron impactent la qualité du raisin. Ainsi nous allons voir si un meilleur apport en minéraux (magnésium et fer) va permettre d'améliorer la qualité du raisin et son rendement. C'est pour cela que les paramètres étroitement liés à la qualité du raisin et donc à la bonne croissance et au bon fonctionnement du végétal seront mesurés pour tenter d'observer des différences entre les modalités. Si les effets sont concluants, les traitements pourront être étendus à l'ensemble du parcellaire.

2°/ Les parcelles d'essai :

Les caractéristiques générales des parcelles sont répertoriées dans le Tableau 3.

Les parcelles d'essai de traitement à la magnésie, « Roumegoux » et « Devant le Hangar » sont des « fluvisols moyen calcaire » (Figure 19).

Les « fluvisols » sont les sols alluviaux fluviaux et lacustres constitués des alluvions qui ont subi un transport puis une sédimentation en milieu aqueux. Ces sols sont caractérisés par une nappe phréatique alluviale permanente ou temporaire à fortes oscillations. Ces sols sont souvent inondables en période de crue.

La présence de calcaire dans le sol peut être à l'origine d'une faible capacité d'échange cationique. Ainsi les ions  $Mg^{2+}$  sont retenus par le complexe argilo-humique provoquant leur immobilisation. C'est-à-dire que des micro-organismes modifient les ions et laissent le magnésium sous forme organique, non utilisable par la plante. Pour être de nouveau disponible, le Mg doit être de nouveau minéralisé grâce à la dégradation des produits d'origine microbienne par exemple (Medde, 2013).

Le porte-greffe de la parcelle « Devant le Hangar » est le 101-14 Mg qui est peu résistant au calcaire. La parcelle « Roumegoux » est plantée sur du Riparia gloire de Montpellier qui comme le 101-14 est bien adapté à l'humidité, ce qui est un atout sur ce type de sol. En revanche, il convient de noter que le RGM absorbe peu le Mg contrairement au 101-14 qui l'absorbe mieux (Pl@ntGrape, 2009-2015).

Les parcelles d'essai de traitement au fer sont plus hétérogènes (Figure 19). Terrasson 4-5 est un « néoluvisol caillouteux », Couchebouc 1 est un « luvisol dégradé glossiques sur terrains fluviaux » (boulbènes), Couchebouc 3 est quant à elle un « luvisol rédoxique du complexe des pentes molassiques » mais aussi un « néoluvisol » comme Terrasson. Enfin, Malbiche est constituée de « fluvisols » et des mêmes sols que Couchebouc 3.

Les « Luvisols » sont des sols ayant connus un important lessivage des argiles, fortement différenciés. Les horizons supérieurs sont appauvris en argile alors que ceux situés plus en profondeur sont nettement enrichis en argile après leur transfert. Les sols sont ainsi peu drainants en profondeur.

Le lessivage est un processus d'entraînement mécanique par les eaux de gravité des particules fines (argiles fines, hydroxydes de fer...), qui s'accumulent dans un horizon illuvial (noté Bt). Les Luvisols représentent un stade plus évolué de ce phénomène que les Néoluvisols (Figure 16).

Lorsque le phénomène est très poussé, l'adjectif « dégradé » est ajouté et on observe la formation de gloses dans la partie supérieure de l'horizon Bt (Medde, 2013).

Ces sols sont souvent très fertiles mais nécessitent souvent des drainages pour limiter l'accumulation d'eau qui pourrait provoquer une asphyxie des racines.

Les porte-greffes sont tous des 3309C qui sont sensibles au stress hydrique comme à un excès d'humidité (d'où l'importance du drainage). Cependant il absorbe bien le Mg. Malbiche est plantée sur du 101-14 qui est résistant à l'humidité donc bien adapté à ce type de sol (Pl@ntGrape, 2009-2015).

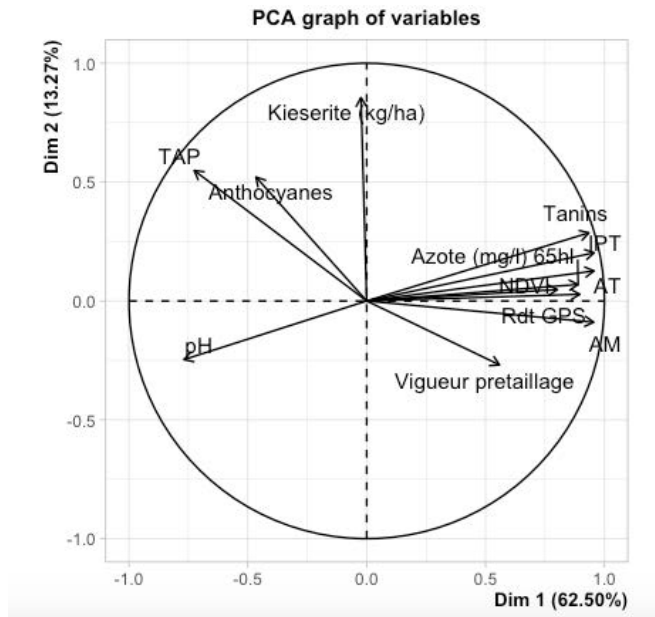


Figure 18 : ACP pour constater l'impact du traitement de kiesérite réalisé en 2018

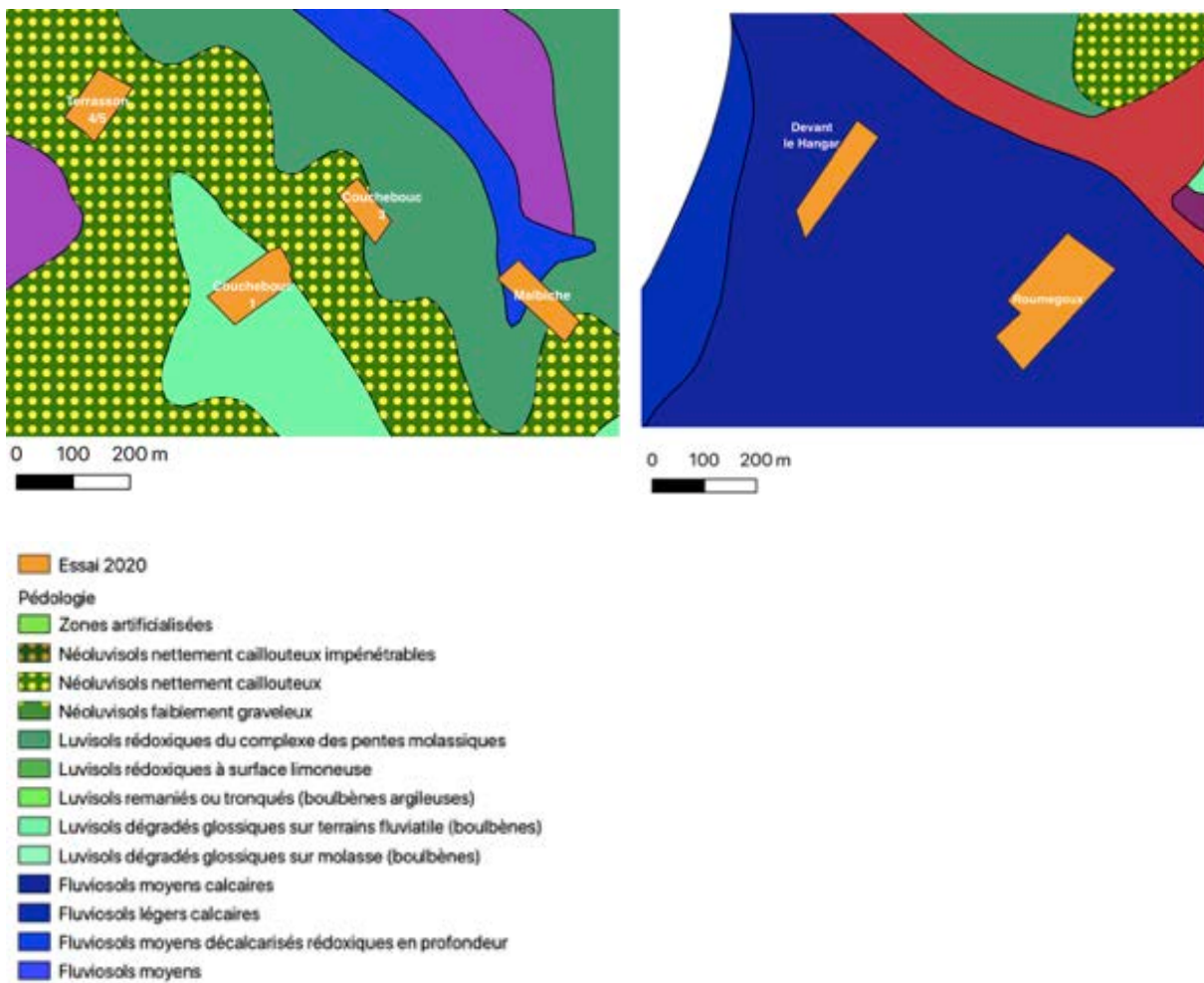


Figure 19 : Parcelles d'essai de fer (à gauche) et de magnésium (à droite) sur un fond de carte pédologique

### 3°/ Positions des placettes sur les parcelles :

Pour constater l'hétérogénéité du vignoble, les cartes du NDVI d'Août 2019 ont été utilisées.

Les placettes sont représentées sur la figure 20. En rose sont représentées les parties traitées au fer et au magnésium, en bleu les parties non traitées. Les cercles représentent les placettes qui ont été choisies en fonction des zones de classes NDVI contrastées pour tenir compte de l'hétérogénéité de chaque parcelle. Les placettes sont constituées de 5 pieds.

Par parcelle, on dénombre 5 placettes pour la partie traitée et 5 placettes pour la partie non traitée.

Selon les analyses, différentes stratégies vont être utilisées. En effet, un pied sera choisi par placette (par exemple pour le potentiel de tige) et sera suivi durant l'ensemble de la saison. Soit 5 pieds suivis par demi-parcelle traitée et 5 pieds par demi-parcelle non traitée). Pour d'autres analyses l'ensemble des pieds des placettes seront pris en compte. En effet, notamment pour les analyses pétiolaires ou la méthode des apex, où un grand nombre de pied est nécessaire, nous pourrons utiliser la placette située sur le rang voisin de la placette marquée. Ainsi on peut étudier 50 pieds par demi-parcelle traitée et 50 pieds par demi-parcelle non traitée. De plus, pour les mesures destructives cela permettra également de faire varier le plant prélevé à chaque fois. Ainsi 5 pieds seront prélevés par demi-parcelle mais changeront à chaque prélèvement pour ne pas modifier leur fonctionnement.

### 4°/ Traitements mis en place :

Les traitements ont été réalisés en fonction des recommandations données par la SRDV.

Pour la magnésie, le traitement est composé de kiesérite, engrais minéral naturel composé d'oxyde de magnésium et d'anhydride sulfurique. La dose recommandée est de 400 kg/ha, apportée en une seule fois l'hiver. L'apport a finalement été de 600 kg/ha pour que l'effet soit plus perceptible. Peu importe le moment d'épandage car le produit n'est pas lessivé dans le sol. Selon la société Kali France, cet engrais permettrait d'augmenter les rendements et de lutter contre les carences en magnésium.

Pour le fer, deux apports foliaires d'EDTA chélaté ont été faits à une dizaine de jours d'intervalle avant la floraison à des doses de 1 L/ha. Le produit utilisé est de l'INOCHEL-Fe93 EDTA composé comme son nom l'indique à 93 g/L de fer sous forme de chélate EDTA, qui permettrait une meilleure respiration, une formation efficace de chlorophylle, un bon fonctionnement des systèmes photosynthétiques et du métabolisme des protéines ainsi qu'une réduction des nitrates.



Figure 20 : Délimitation des placettes pour le fer (haut) et le magnésium (bas) en fonction du NDVI



Figure 21 : Les 3 catégories pour la méthode des apex : stade P, R et C (de gauche à droite) (Source personnelle)

## 5°/ Indicateurs de suivi :

Les recherches bibliographiques ont permis de mettre en évidence l'intérêt de calculer certains paramètres pour se rendre compte de l'impact des traitements sur la croissance du végétal, son rendement et la qualité du raisin.

Les mesures réalisées sont synthétisées dans l'annexe 1 et sont explicitées avec plus de détails ci-après.

### a) Statut hydrique :

#### i) Méthode des Apex :

On prélève 50 apex présents dans les placettes sélectionnées préalablement. On observe la position de l'apex après avoir replié les deux dernières feuilles étalées contre le rameau. Il a été choisi des rameaux primaires avant écimage et des rameaux secondaires après écimage. Les apex sont ainsi classés en 3 catégories (Figure 21) :

- Stade P qui correspond à une pousse active lorsque les feuilles ne recouvrent pas l'apex.
- Stade R qui correspond au moment où les feuilles recouvrent l'apex donc à une pousse ralentie.
- Stade C lorsque l'extrémité du rameau est tombé ou sec, donc que le rameau a terminé de croître.

Lorsque les stades ont été relevés, il convient de noter leur pourcentage respectif pour calculer l'IAC (Équation 1). La figure 22 montre les seuils qui permettent de savoir si la parcelle est poussante, en croissance ralentie ou en arrêt de croissance, selon les stades phénologiques.

Les relevés ont commencé le 6 Juin et ont été répétés tous les 15 jours à trois semaines. Ainsi, 4 valeurs ont été obtenues.

#### ii) Potentiel de tige :

La mesure est réalisée sur les pieds marqués de chaque placette, soit 5 pieds par modalité. La mesure se réalise entre 12h et 14h. Pour se faire des sachets imperméables et opaques sont positionnés sur les feuilles (au moins 3h avant la mesure). La feuille est récoltée et le pétiole sectionné de façon nette. La feuille est ensuite placée dans une chambre à pression où la pression augmente régulièrement. Lorsque l'on observe de l'humidité sortir du pétiole, on lit la valeur sur le manomètre.

Les mesures ont été opérées à trois points clés, avant les premiers stress lorsque la réserve utile n'est pas impactée au stade pré-fermeture de la grappe (le 23 Juin). En effet, les pluies continues n'ont pas laissé l'opportunité de réaliser cette mesure avant mais ont permis un remplissage optimal de la réserve utile. Deux autres mesures ont été faites au début de la véraison (le 20 Juillet). Une dernière mesure devait être réalisée avant la récolte mais les conditions climatiques ne l'ont pas permis (pas de fenêtre suffisante de jours sans pluie).

### b) Croissance végétative :

#### i) Suivi phénologique :

Le suivi phénologique permet de mettre en évidence des retards dans le cycle végétatif ou reproducteur. Pour ce faire chaque semaine à partir du 11 Mai, sur les 5 pieds marqués de chaque parcelle, il convient de relever le stade de chaque rameau. Le suivi s'est terminé le 15 Juillet. L'échelle de Lorentz et Baggiolini est utilisée (*Lorenz et al., 1995*). On considère que le stade est atteint lorsque plus de 50% des pieds sont dans une catégorie.

**Indice d'arrêt de croissance (IAC) basé sur la « méthode des apex »**

$$IAC = \frac{100}{3} \times (1 - \%P + \%R + 2\%C)$$

Avec :

- %P : pourcentage d'apex en croissance active
- %R : pourcentage d'apex en croissance ralentie
- %C : pourcentage d'apex sec ou chu

Équation 1 : Calcul de l'indice de croissance par la méthode des apex (*Chambre d'Agriculture de l'Hérault, 2010*)

IAC	Floraison - fermeture	Fermeture - mi-véraison	Post-véraison
0 - 50			
50 - 70			<i>L'arrêt de croissance n'est plus lié au confort hydrique</i>
70 - 100			

	Parcelle très poussante
	Confort hydrique satisfaisant
	Début d'arrêt de croissance
	Arrêt de croissance

Figure 22 : Interprétation des valeurs d'IAC (*Chambre d'Agriculture de l'Hérault, 2010*)

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Avec :

- PIR = Valeur de pixel du Proche Infra-Rouge
- R = Valeur de pixel du rouge

Il est à noter que la valeur oscille entre -1 et +1 et que la valeur 0 correspond à un sol nu

Équation 2 : Calcul du NDVI

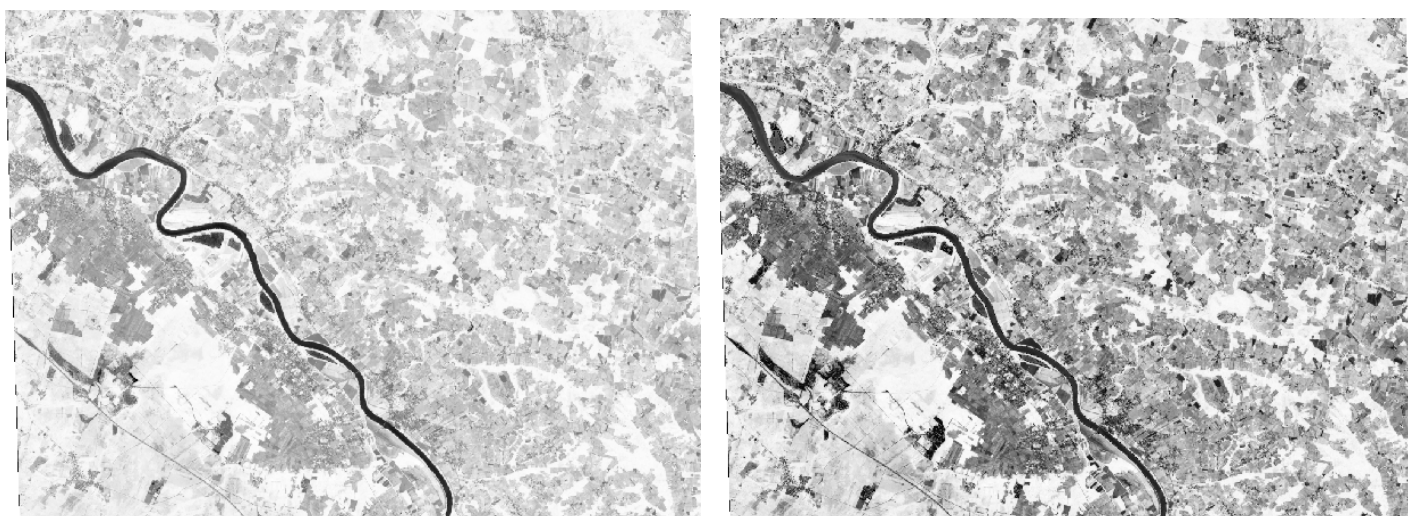


Figure 23 : Comparaison de la carte NDVI brute (gauche) et après correction (droite)

ii) Mesure de l'allongement des rameaux :

Chaque semaine en parallèle du suivi phénologique, la longueur de l'ensemble des rameaux des pieds marqués est mesurée à l'aide d'un mètre souple. Les mesures se sont étalées du 11 Mai (avant floraison) au 15 Juillet lorsque la plupart des rameaux sélectionnés n'étaient plus en croissance active.

La mesure de la longueur permet de déduire pour chaque rameau, une vitesse d'allongement qui se calcule par la différence de longueur de la semaine n et n-1.

iii) NDVI :

Le site Theia a été choisi pour récupérer les images NDVI car il donne accès à des images acquises par le satellite Sentinel-2 Level 2A ayant reçues une correction atmosphérique et une détection des nuages. Les images ont été récupérées après la véraison, le 27 Juillet. Nous avons comparé ces données sur chaque parcelle avec les images de l'année passée.

Pour ce faire, les images satellites (rasters) ont été récupérées pour calculer le NDVI (Équation 2) et créer des cartes contrastées entre les différents niveaux de réflexion. On réalise ces opérations sur le logiciel QGIS. Il convient ensuite de corriger la première carte NDVI obtenue pour enlever les valeurs négatives (Figure 23), puis de créer des classes de couleur correspondant aux différentes classes de NDVI.

c) Statut minéral par analyses pétiolaires :

Sur chaque demi-parcelle, on prélève environ une centaine de pétioles à partir des feuilles (en bon état) de la base, en face de la première grappe sur les pieds situés dans les placettes. Les pétioles sont séchés et envoyés au laboratoire de la SRDV.

Les prélèvements ont été réalisés à trois stades clés, avant la floraison (le 6 Mai), au stade fermeture de la grappe (le 10 Juin) et à véraison (le 4 Août).

d) Surface foliaire :

Pour calculer la surface foliaire, nous nous sommes basés sur la méthode de Lopez et Pinto qui a été réalisée au stade véraison lorsque la croissance végétative était terminée pour obtenir la surface foliaire finale en fin de saison.

Cette méthode se base sur une corrélation entre la surface foliaire et la longueur de la nervure centrale. Ainsi, pour chaque parcelle, 50 feuilles ont été prélevées. À l'aide du logiciel Mesurim, on obtient la surface totale des feuilles sélectionnées (Figure 24). Après mesure de la nervure centrale, on obtient le graphique de la surface d'une feuille en fonction de la longueur de sa nervure centrale (Figure 25).

Le but étant de connaître la surface totale présente sur un pied. On sélectionne 10 pieds (positionnés sur les placettes sélectionnées). Sur chaque pied, on dénombre le nombre de rameaux, le nombre de feuilles et la longueur de la nervure centrale de la plus grande et de la plus petite feuille. On applique ensuite l'équation 3 puis une somme est réalisée pour obtenir la SF totale du cep.

e) Mesures de rendement :

Les mesures du rendement reposent sur plusieurs paramètres.

Tout d'abord, le nombre de grappes par pied sera dénombré sur chaque pied de chaque placette de chaque parcelle (pour obtenir le nombre de grappes de 30 pieds par modalité et par parcelle). Par la suite, les grappes de ces 30 pieds seront pesées pour obtenir le rendement par pied.

De plus, sur chaque parcelle 200 baies ont été récoltées au sein des placettes pour obtenir le poids des baies chaque semaine. Ainsi nous pourrons voir l'évolution de l'augmentation du poids des baies.



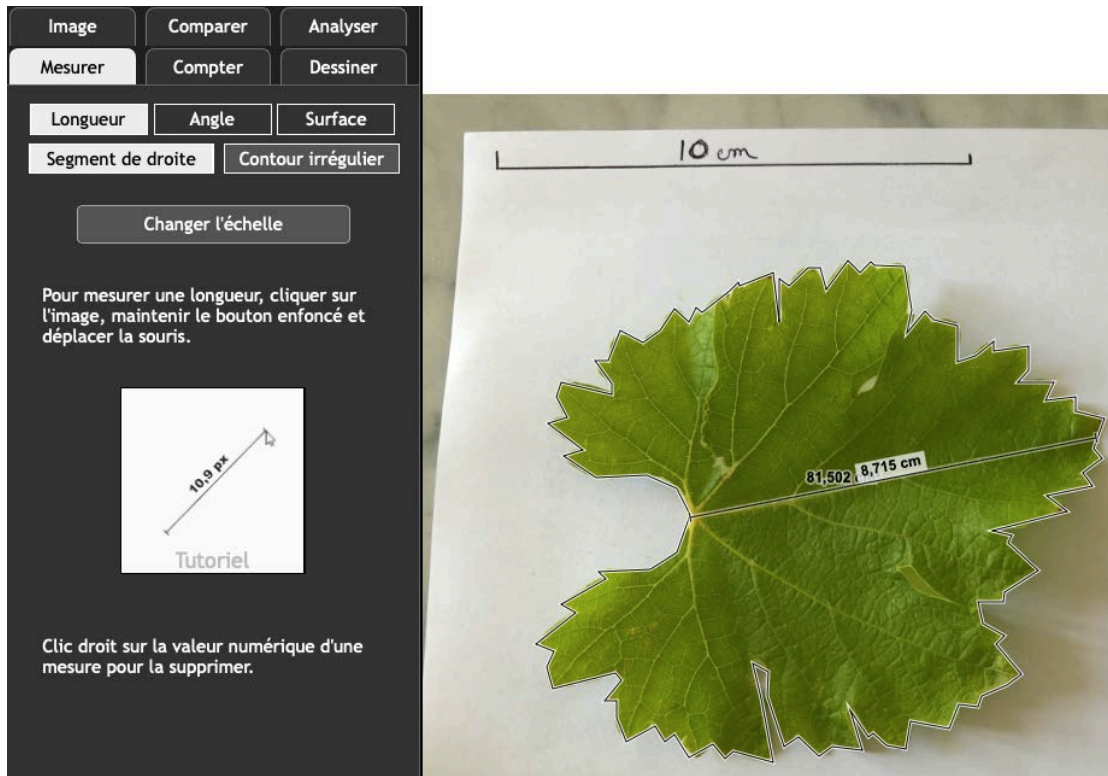


Figure 24 : Calcul de la surface d'une feuille avec Mesurim

$$SF \text{ rameau} = \frac{\text{Surface grande feuille} + \text{Surface petite feuille}}{2} * \text{Nombre de feuille}$$

Équation 3 : Calcul de la surface foliaire d'un cep

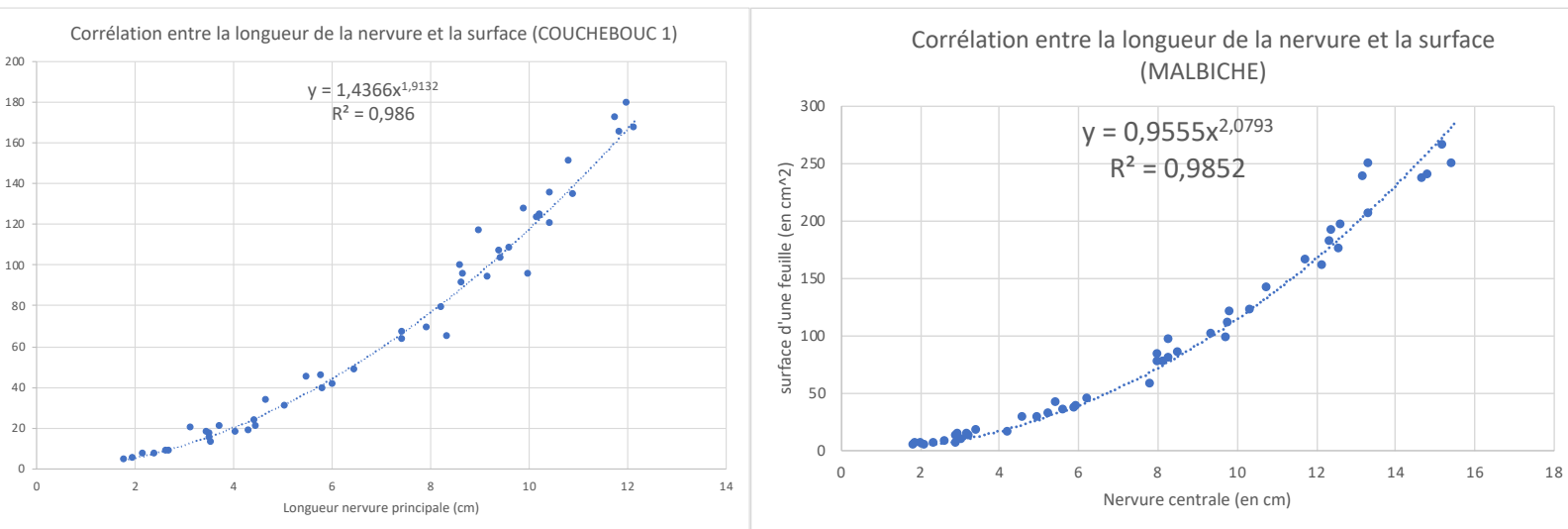


Figure 25 : Courbe de tendance de la surface foliaire d'une feuille en fonction de la nervure centrale

Par la suite, le volume des baies sera calculé par la méthode d'Archimède. 30 baies seront prélevées par parcelle. Chaque baie sera plongée dans une éprouvette graduée préalablement remplie d'eau. Ainsi la différence entre le volume final et le volume initial donne le volume de la baie.

f) Le rapport feuilles/fruits :

Ce rapport a été réalisé avec les mesures réalisées précédemment. En effet, nous avons obtenu la surface foliaire par pied avec la méthode de Lopes et Pinto et le poids moyen de chaque pied par dénombrement. Ainsi nous aurons une indication précise pour chaque modalité du rapport feuilles/fruits moyen en divisant la surface foliaire/pied (en m<sup>2</sup>) par le poids/pied (en kg).

g) Qualité par cinétique de maturité et suivi des teneurs en composés phénoliques des raisins :

À partir de la véraison et toutes les semaines, un prélèvement de 200 baies est réalisé sur chaque demi-parcelle. Les pieds récoltés se trouvent dans les placettes identifiées précédemment. Les échantillons sont comptés, pesés pour obtenir le poids des baies chaque semaine. Puis les échantillons seront envoyés au laboratoire. Les paramètres suivants seront analysés : Acide malique, Sucres, pH, Anthocyanes, Acidité Totale, TAP. Des courbes comparatives de chaque paramètre seront par la suite réalisées.

6°/ Analyses statistiques :

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio.

L'objectif du traitement de données est de mettre en évidence l'effet des traitements de Fer et de Magnésium sur la physiologie du végétal, son rendement et sa qualité.

Chaque indicateur de suivi a été soumis à un test de Student. En effet, celui-ci est préféré à l'ANOVA si seulement deux moyennes sont à analyser et à comparer (ce qui est le cas ici). On choisit un seuil de risque de 5%, ainsi si la pvalue est inférieure à 5%, on peut dire que les résultats sont significativement différents.

Pour que ce test soit valide, les séries de données sont soumises au test de Shapiro-Wilk qui permet de savoir si les valeurs suivent une loi normale. Pour que ce test soit validé, il faut que la pvalue soit supérieure à 5%. De plus, le test F est réalisé pour évaluer l'égalité des variances. Si les variances sont égales alors le test de Student peut être réalisé sinon le test de Welch sera réalisé.

Si l'échantillon ne respecte pas ces conditions, le test de Wilcoxon est appliqué. C'est un test paramétrique très robuste mais moins puissant que celui de Student car il ne nécessite aucune condition pour être appliqué.

Cependant, certains paramètres ont été mesurés différemment. Ainsi pour la méthode des apex, le test du Khi2 a été réalisé car il indique si les fréquences d'observation des différents stades (R,P et C) dépendent du traitement appliqué.

Lorsque les valeurs sont peu nombreuses, comme avec le potentiel de tige, une ANOVA à deux facteurs est réalisée avec comme variables « date » et « traitement ».

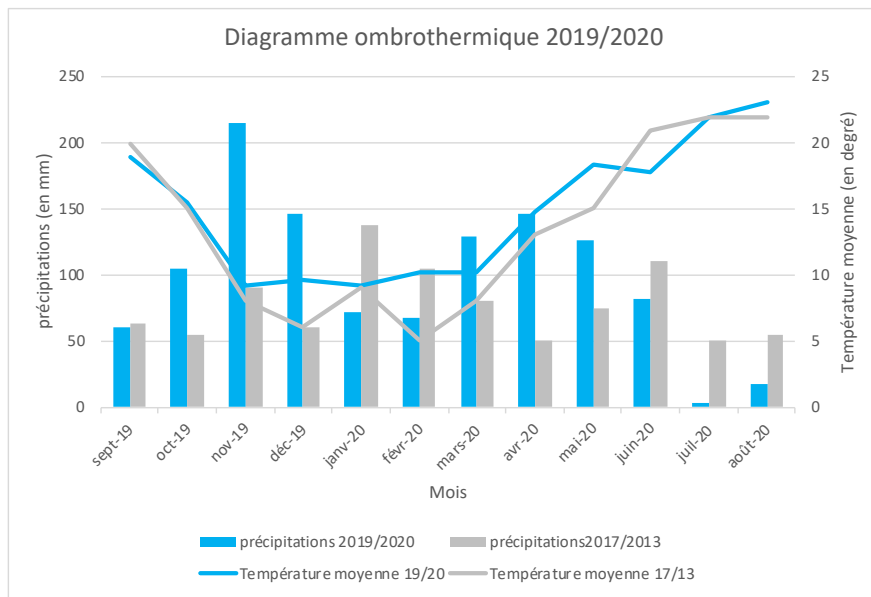


Figure 26 : Diagramme ombrothermique comparant la saison 2019/2020 par rapport à une moyenne sur 2013-2017 (données obtenues avec la station météorologique d’Haux)

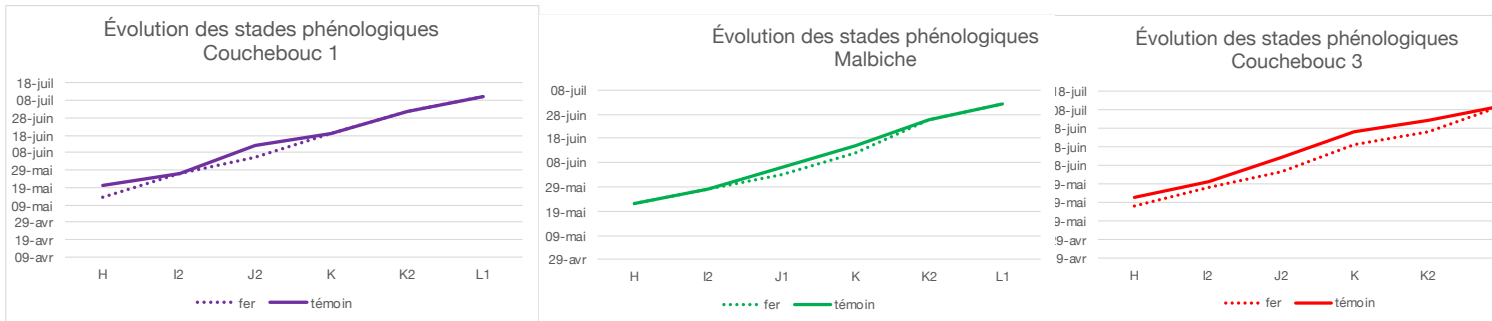


Figure 27 : Évolution des stades phénologiques sur trois parcelles de fer

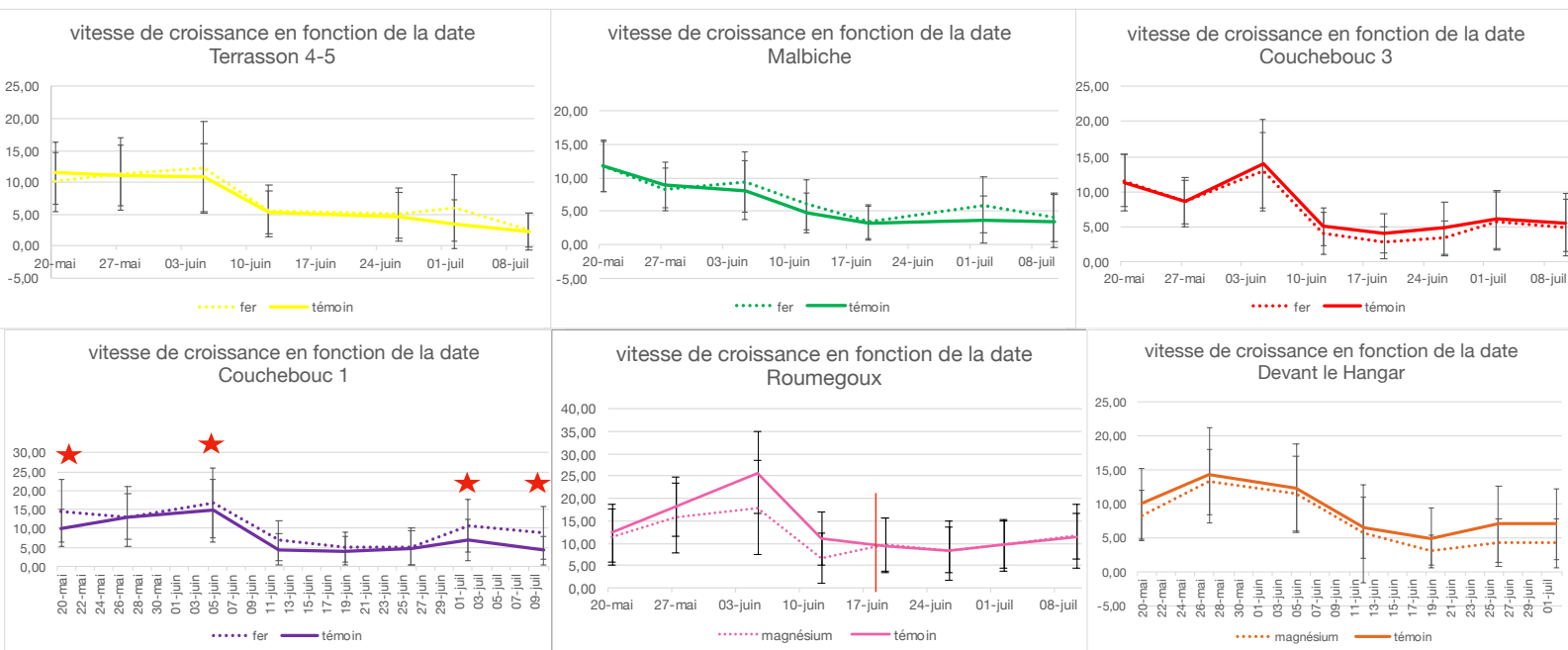


Figure 28 : Vitesse de croissance pour chaque relevé sur les parcelles d’essai  
Les barres d’erreurs représentent les écarts types

#### IV- Résultats et interprétations :

##### 1°/ Bilan du millésime :

Le récapitulatif des précipitations et des températures se trouve dans la figure 26. On remarque que la somme des pluies est significativement plus élevée sur les mois de Mars 2020 à Mai 2020 (en comparaison avec les années antérieures) ce qui a permis au sol de constituer une réserve en eau maximale. Ainsi une forte pression sanitaire, notamment du Mildiou a été constatée. Les traitements ont dû être renouvelés fréquemment pour éviter les risques de développement du champignon. Ainsi grâce à une bonne gestion, les parcelles du vignoble ont été très peu touchées (environ 10% de perte).

Ces épisodes pluvieux associés à des températures en moyenne plus élevées, ont provoqué un grossissement des baies. Celles-ci sont en moyenne 10% plus grosses que les années précédentes. Ainsi les rendements sont eux aussi supérieurs aux années précédentes. Un léger épisode grêleux a impacté une partie des parcelles (perte de 30% sur les parcelles concernées). L'éclatement du vignoble est un atout dans ce cas puisqu'il permet de réduire les risques de perte de la totalité des raisins car ce sont souvent des épisodes très localisés. De plus, une période peu pluvieuse et sèche s'est installée durant l'été provoquant une contrainte hydrique légère à modérée sur les vignes (cf III-3°/).

Enfin, fin Août, quelques épisodes pluvieux associés à des températures hautes ont provoqué une pression du Botrytis sur certaines parcelles notamment sur les parcelles de blancs et les palus.

##### 2°/ Physiologie :

###### a) Phénologie :

Les différents stades phénologiques ne semblent à priori pas être modifiés de façon significative par le traitement au fer ou au magnésium. Les résultats sont présentés dans la Figure 27. Les quelques différences observées (non significatives au seuil de 5%) montrent des évolutions disparates entre les parcelles de fer. Ainsi la partie traitée au fer sur Couchebouc 1 semble plus précoce au début du cycle, tout comme Couchebouc 3. En revanche, la partie traitée de Malbiche semble plus tardive au milieu de son cycle. Cependant, aucune différence n'a été constatée pour Terrasson 4-5 sur l'ensemble de la saison. Ainsi, ces résultats ne permettent pas de conclure sur une différence entre les parties traitées et témoins. Le fer ne semble donc pas avoir d'effet sur l'apparition des stades phénologiques. Ainsi, les quelques différences constatées ne sont pas en lien direct avec l'application de fer.

Pour le traitement au magnésium, aucune différence n'a été constatée sur l'ensemble du cycle végétatif. Ainsi, le magnésium n'a pas d'impact sur la phénologie.

###### b) Croissance végétative :

Le test de Student n'a pas pu être réalisé pour cette expérience. En effet, le test de Shapiro a révélé pour chaque date, que les résidus ne suivaient pas une loi normale. Ainsi le test de Wilcoxon a été appliqué pour chaque date. Le script R se trouve en Annexe 2. Les résultats sont présentés dans la Figure 28, les différences significatives sont repérées par une astérisque.

Pour les expériences au fer, aucune différence significative n'a été observée pour l'ensemble des relevés sauf pour trois dates dans la parcelle Couchebouc 1. Cependant, pour les trois parcelles, Terrasson 4-5, Couchebouc 1 et Malbiche la tendance montre que les vitesses de croissance sont plus importantes pour la partie traitée que pour la partie non traitée. Couchebouc 1 étant la seule parcelle de Cabernet Sauvignon, nous pouvons supposer que ce cépage est certainement plus sensible que le Merlot au traitement de fer.

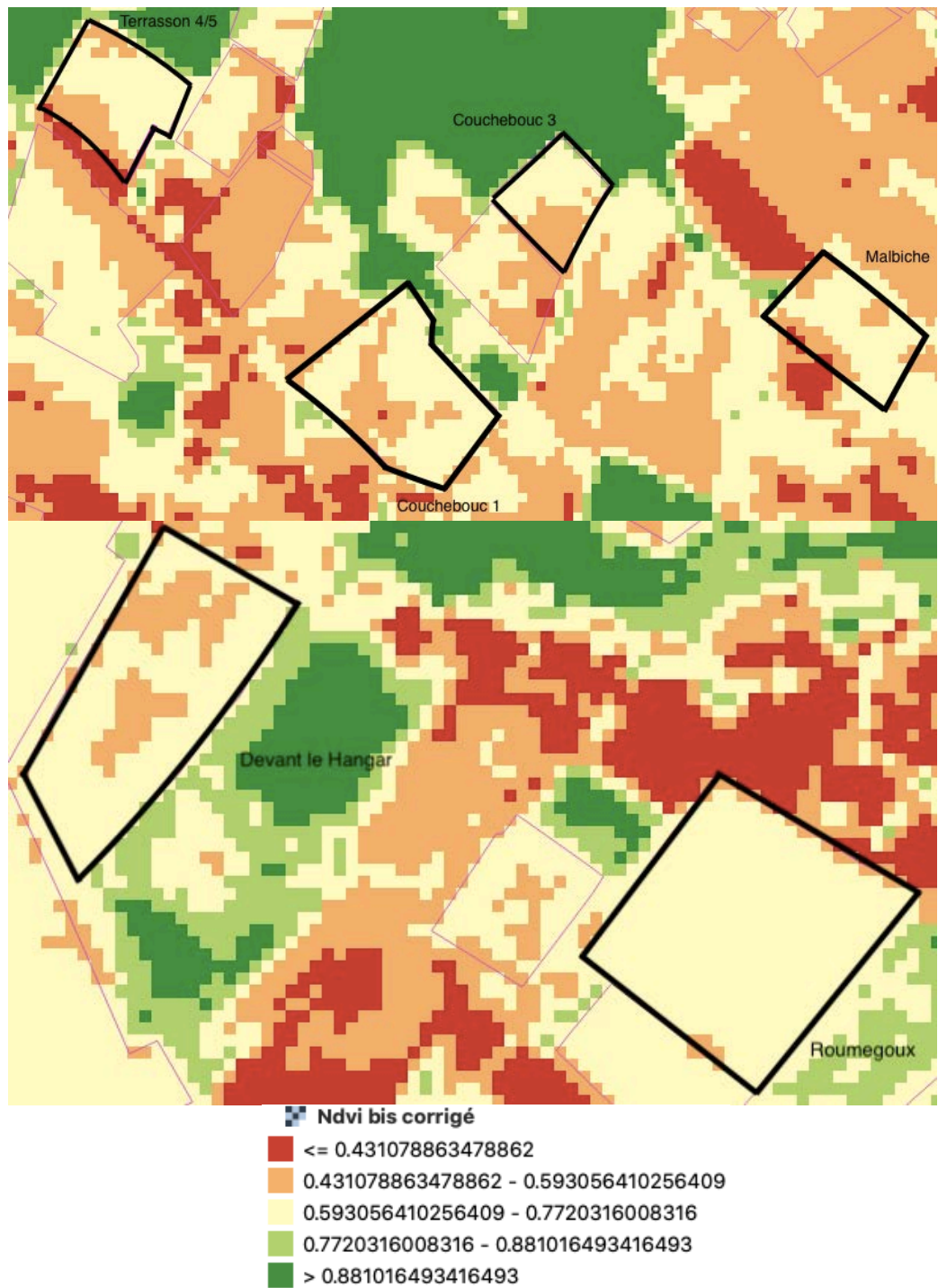


Figure 29 : NDVI 2020 en haut pour les parcelles de fer et en bas pour les parcelles de magnésium obtenu à partir du logiciel QGIS

Ainsi il serait intéressant de poursuivre ces relevés les années suivantes sur un nombre plus conséquent de parcelle pour ce cépage en particulier.

La croissance de la vigne est liée à une bonne alimentation hydrique et minérale mais les organes en croissance ont également besoin de disposer de métabolites indispensables à la respiration et à l'édification des tissus. La photosynthèse permet donc, entre autre, de fournir ces métabolites au végétal en croissance (Reynier A., 2016). Dans la partie bibliographique, il a été mentionné que le fer a un rôle dans la structure de la chlorophylle et dans la formation des groupes protéiques impliqués dans l'élaboration des chloroplastes. Ainsi le fer est directement en lien avec une bonne photosynthèse et donc une bonne croissance ce qui permet d'expliquer les différences constatées.

Couchebouc 3 montre une cinétique inversée par rapport aux autres parcelles. En regardant le NDVI 2019 (Figure 20), on constate que la partie traitée au fer possédait une vigueur très inférieure à l'autre partie (non traitée). Ainsi le fer n'a pas permis de compenser cette différence présente initialement.

Pour les expériences de magnésium, la différence a été inversée par rapport à ce qui était attendu (Figure 28) pour le début du cycle pour Roumegoux et sur l'ensemble du cycle pour Devant le Hangar. Ainsi les parties témoins ont eu une vitesse de croissance plus importante que les parties traitées au magnésium.

Ce résultat est surprenant car le magnésium permet le transport des électrons au sein des chloroplastes et il entre dans le mécanisme de la synthèse des sucres puisqu'il est directement impliqué dans le chargement du phloème.

La parcelle « Devant le Hangar » s'est vu inondé par les égouts provoquant de nombreux dégâts sur une large partie de la parcelle pouvant ainsi expliquer ces différences.

En revanche, pour Roumegoux les résultats montrent une croissance des rameaux plus rapide pour la partie témoin du fait d'un écoulement de l'eau dans cette partie, provoquant un accroissement de la vigueur. Puis, la différence tend à s'atténuer depuis le 17 juin (suite au premier rognage représenté en rouge sur la Figure 28). Une explication possible pourrait être que le magnésium est peu mobile dans le sol, son assimilation peut donc mettre plus de temps. Il serait donc intéressant de constater l'effet les années suivantes.

c) Vigueur :

i) NDVI :

Les cartes NDVI 2020 ont été réalisées avec le logiciel QGIS et sont représentées dans la Figure 29. En comparant avec la carte NDVI 2019 (Figure 20), on constate peu de différence. En effet, les différences de croissance n'étant pas significative, la différence de vigueur entre les deux parcelles n'est pas assez distincte pour pouvoir constater des différences au sein de la même parcelle. Cet outil ne semble donc que peu adapté pour apprécier de faibles différences de vigueur et il est ainsi plus propice à la comparaison de deux parcelles plutôt qu'à la comparaison intra-parcellaire.

Ainsi pour le traitement au fer, les demi-parcelles ne sont pas différentes en terme de valeur de NDVI. En revanche, il est intéressant de constater que Couchebouc 3 présente sur la partie traitée un NDVI plus faible (tout comme 2019), ce qui confirme les résultats trouvés précédemment concernant les vitesses de croissance.

Pour le traitement au magnésium, aucune évolution entre la partie traitée et non traitée pour Roumegoux n'a été constatée. En revanche, la partie touchée par les égouts (qui est également la partie traitée) sur Devant le Hangar montre un NDVI plus faible, confirmant les résultats précédents.

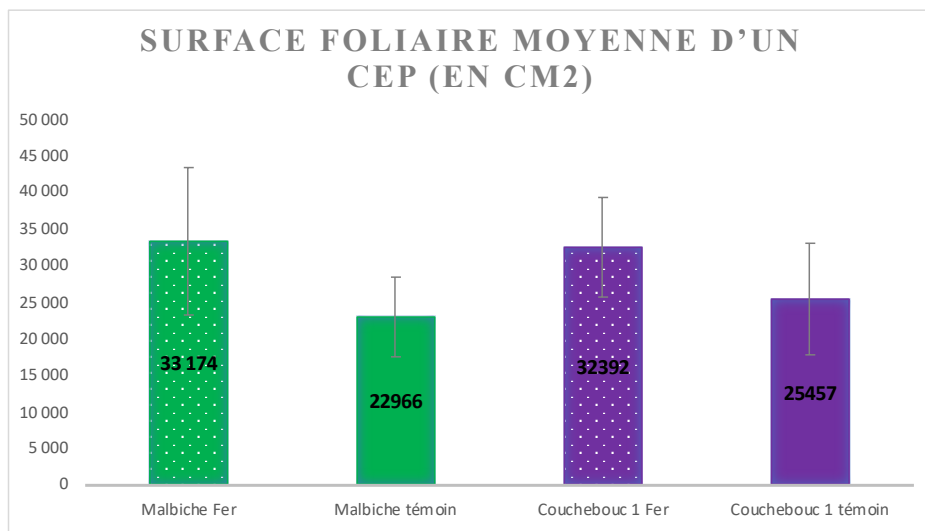


Figure 30 : Moyennes obtenues suite à la méthode de Lopes et Pinto

Les barres d'erreurs représentent les écarts types

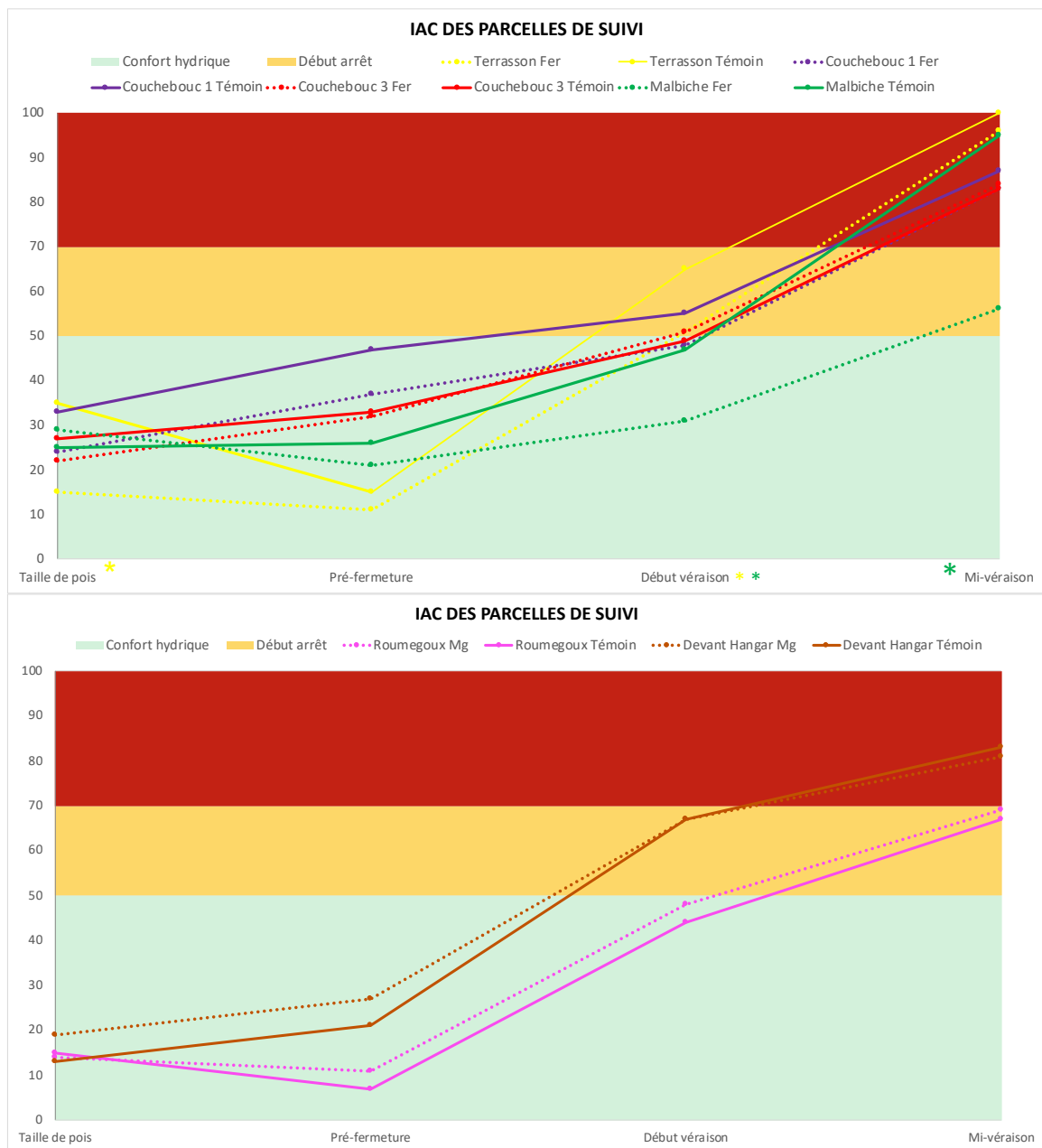


Figure 31 : IAC des différentes parcelles en fonction du prélèvement

Les différents découpages (vert, orange et rouge) ont été réalisés à l'aide de la Figure 2

## ii) Surface foliaire :

Après vérification des hypothèses pour l'application du test de Student, le test F révèle que les variances ne sont pas égales. Ainsi, le test de Welch est appliqué puisque les données sont normales et qu'aucune asymétrie n'a été remarquée. Le script R est présent en Annexe 2.

Cette mesure par la méthode de Lopes et Pinto a été faite sur les parcelles Couchebouc 1 et Malbiche qui semblait être les deux parcelles les plus sensibles au traitement de fer. Respectivement les pvalue obtenues sont de 0,04675 et 0,001394. Ainsi, les moyennes des groupes témoins et traités sont significativement différentes (pvalue < 5%). Les moyennes obtenues sont représentées dans la Figure 30. On constate que la surface foliaire par pied est en moyenne plus grande de 1m<sup>2</sup> pour Malbiche Fer et de 0,7m<sup>2</sup> pour Couchebouc 1 Fer. Ainsi, le fer a permis une augmentation de la surface foliaire sur les parties traitées.

Ce résultat est en accord avec l'expérience de *Shayan Akram Mustafa* (2018). En effet, des applications croissantes de fer avaient permis une augmentation de la surface foliaire des pieds traités. Le fer a certainement permis l'activation du système enzymatique et de nombreux processus métaboliques liés à la croissance des plantes ce qui a provoqué une augmentation de la croissance végétative. Une autre explication est que la disponibilité du fer est plus rapide pour les plantes ce qui implique une augmentation de la teneur en catalase et en chlorophylle (*Bertamini, M. et Nadunchezhian N., 2005*). L'augmentation de la surface foliaire va certainement avoir un impact sur le rendement et la composition du raisin puisque c'est un paramètre important du microclimat de la canopée et de l'équilibre du carbone des plantes. De plus, le rapport feuilles/fruits sera donc plus haut (si le rendement n'augmente pas). Ainsi, on devrait avoir des impacts sur la qualité des raisins notamment un TAP, une teneur en anthocyanes, un taux de sucres et une intensité en anthocyanes plus élevés (*Dufourcq T, 2004*).

Cette méthode qui est bien plus précise que le NDVI a permis de constater une différence notable entre les parties traitées et non traitées pour l'expérience de traitement au fer.

## 3°/ État hydrique :

### i) Méthode des apex :

Les résultats de la méthode des apex sont présentés dans la Figure 31. Après réalisation du test du Khi2, les parcelles Terrasson 4-5 et Malbiche possèdent des résultats significativement différents au stade taille de pois et début véraison pour la première et à partir début véraison pour la deuxième. De plus, il est intéressant de constater (même si tous les résultats ne sont pas significativement différents) que toutes les parcelles témoins (hormis Couchebouc 3) ont tendance à avoir des IAC plus faibles. A partir du début de la véraison, les IAC des parties témoins de Terrasson 4-5 et Couchebouc 1 sont plus importants et se trouvent dans un début d'arrêt de croissance à la différence des parties traitées qui sont toujours poussantes. En effet, le fer joue un rôle primordial dans l'atténuation du stress imposé par exemple par la sécheresse en activant des antioxydants enzymatiques comme la catalase, la peroxydase et une isoforme de superoxyde dismutase (SOD) qui ont la capacité de piéger des espèces réactives de l'oxygène (ROS) (*Hellin et al., 1995*). Ainsi, le fer permettrait une pousse plus active des rameaux et donc permettrait de maintenir la plante dans un confort hydrique lui assurant un bon développement.

Pour le traitement au magnésium, les résultats ne sont pas significativement différents. Ainsi la date d'arrêt de croissance qui est liée à l'état hydrique n'est pas modifiée par ce traitement. La méthode des apex n'a donc pas permis de mettre en évidence l'impact de ce traitement sur l'état hydrique de la vigne.



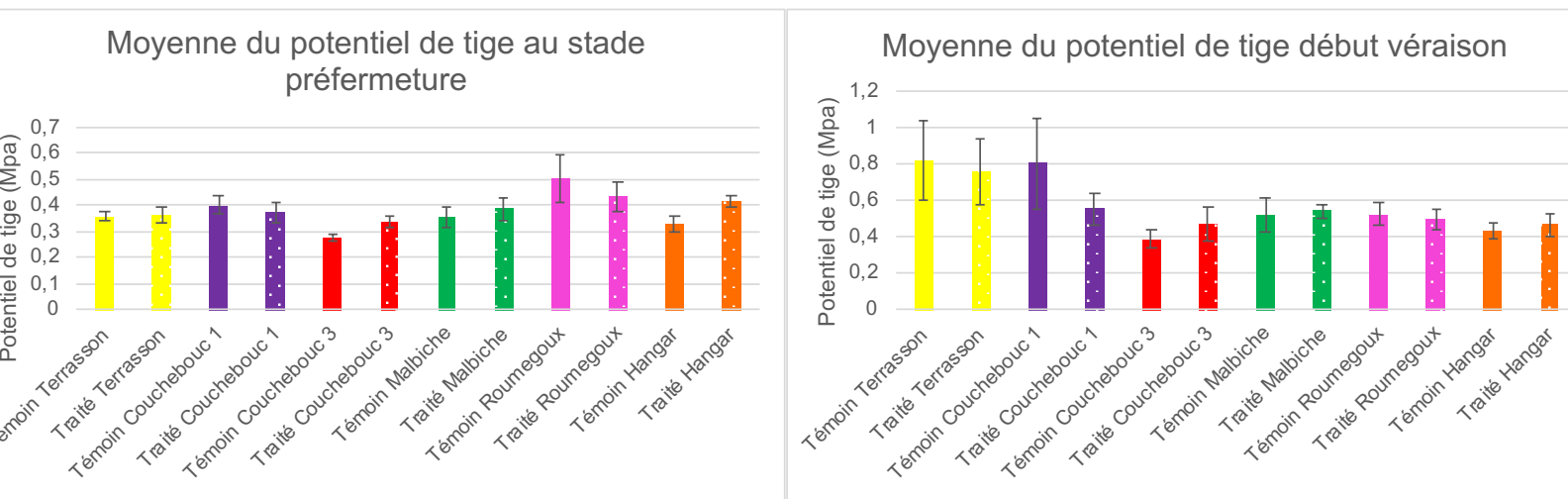


Figure 32 : Moyenne sur 5 pieds de la mesure du potentiel de tige  
 Les barres d'erreurs représentent les écarts types

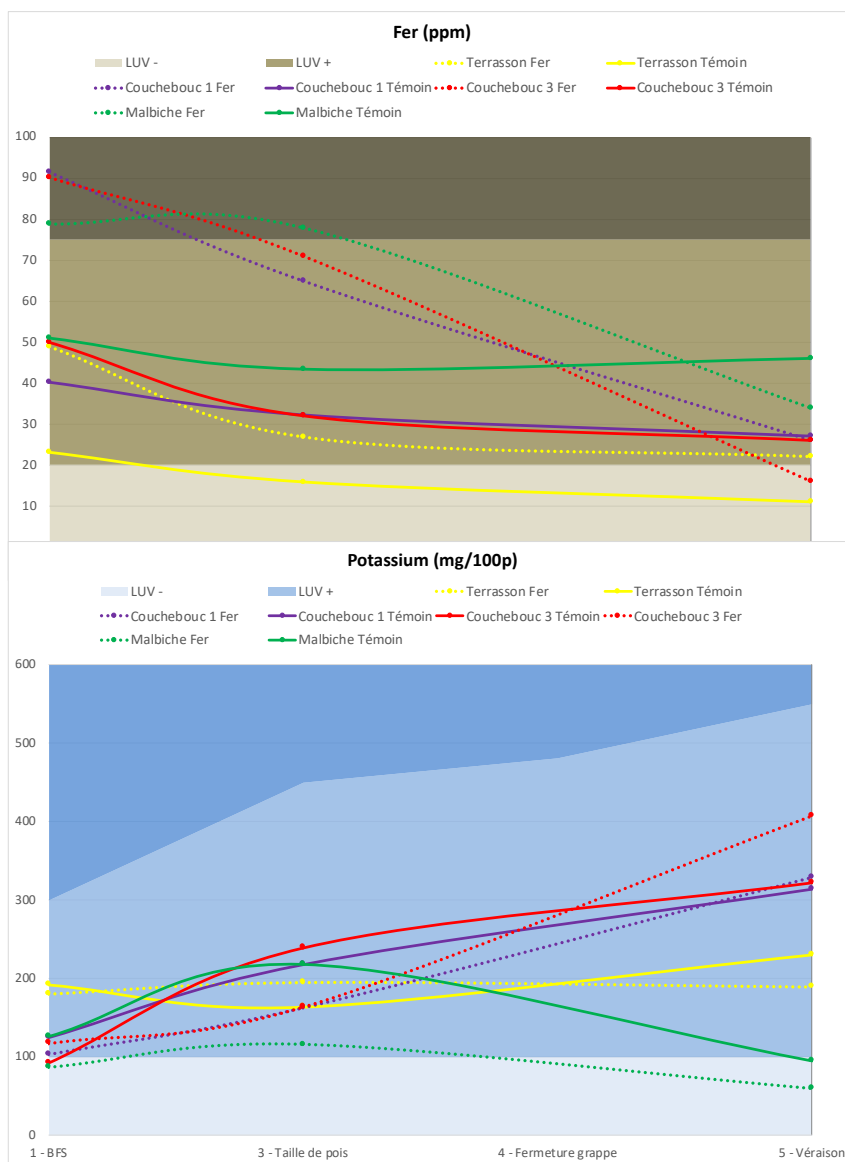


Figure 33 : Assimilation du fer (haut) et du potassium (bas) pour les parcelles de l'essai fer

## ii) Potentiel de tige :

Du fait du peu de valeurs recueillies par cette mesure, une ANOVA à deux facteurs a été réalisée avec pour modalité le traitement (traité ou témoin) et la date de prélèvement. Le script R se trouve en Annexe 2.

Les résultats obtenus ne sont pas significativement différents ( $p$ value > 0,05) pour la modalité traitement pour l'ensemble des parcelles à l'exception de Devant le Hangar qui est plus stressée sur la partie traitée. Les égouts ont très probablement asphyxié les racines provoquant une moins bonne alimentation hydrique des racines. Ainsi la vigueur a été largement impactée.

Malgré des différences notées lors de la réalisation de la méthode des apex, ces différences ne se retrouvent que partiellement ici, notamment pour Malbiche (Figure 32). Une explication possible pourrait être que les fortes pluies survenues sur la période végétative ont permis de recharger suffisamment les réserves ne créant que peu de contrainte hydrique lors de la saison même au début de la véraison lorsque les fortes chaleurs étaient déjà présentes (remplissage suffisant de la réserve utile). En effet, selon le Tableau 2, les valeurs obtenues montrent que la plante est en stress hydrique faible (à modéré pour certaines) sur les deux prises de mesures. La distinction entre les parcelles n'a donc pas été assez importante pour observer les effets des traitements. Ce millésime pluvieux n'a donc pas permis d'observer un stress hydrique pendant la saison. De plus, le potentiel de tige caractéristique de l'état hydrique de la plante à un instant donné, n'a pas été la méthode la plus pertinente pour observer des différences.

On peut néanmoins noter une légère tendance pour les parcelles Couchebouc 1 et Terrasson 4-5 notamment au stade début véraison. Les parties traitées semblent légèrement plus stressées sur la partie témoin confirmant les tendances obtenues par la méthode des apex lors des relevés précédents.

## 4°/ Nutrition minérale :

Les Limites Usuelles de Variations (LUV) présentent dans les graphiques correspondent aux valeurs limitent où la plante possède un défaut d'assimilation d'un élément nutritif. En LUV+, la vigne absorbe beaucoup trop l'élément. Les conséquences peuvent aller d'un risque de déséquilibre nutritionnel à une toxicité. En LUV-, la plante n'assimile pas ou peu l'élément en question. L'idéal est donc de se trouver au milieu de ces deux zones. Ces limites sont données et calculées par la SRDV en fonction des données obtenues les années précédentes.

Par manque de place seuls les éléments les plus intéressants ont été représentés dans les Figure 33 et 34. Le reste des résultats se trouve en Annexe 4 pour l'expérience au Fer et en Annexe 5 pour l'expérience à la Magnésie.

Pour les traitements au fer (Figure 33), l'élément nutritif qui a été le plus différent entre les modalités traitées et non traitées a été le fer. La quantité de fer (en ppm) a été multipliée par deux pour tous les traitements pour les deux premiers stades de prélèvement. Pour le dernier stade, les résultats sont relativement hétérogènes pour les différentes parcelles. Ces résultats confirment l'expérience de *Al-Imam M. (2014)*, qui suite à une pulvérisation de Fe-EDTA à une concentration de 200mg/L, avait observé une augmentation significative des concentrations en N, P, K, Fe et Zn dans les pétioles par rapport au témoin non traité et ceux pendant les deux années d'expérimentation. Cette augmentation de la concentration en minéraux dans les pétioles est surtout visible en début de croissance (avant la floraison) et durant la phase de nouaison mais une diminution est constatée vers la fin de la saison de croissance comme c'est le cas pour le fer dans l'essai. En effet en fin de cycle, les résultats sont moins probants. On pourrait supposer une redistribution des nutriments dans la plante entre les organes sources et les organes puits.

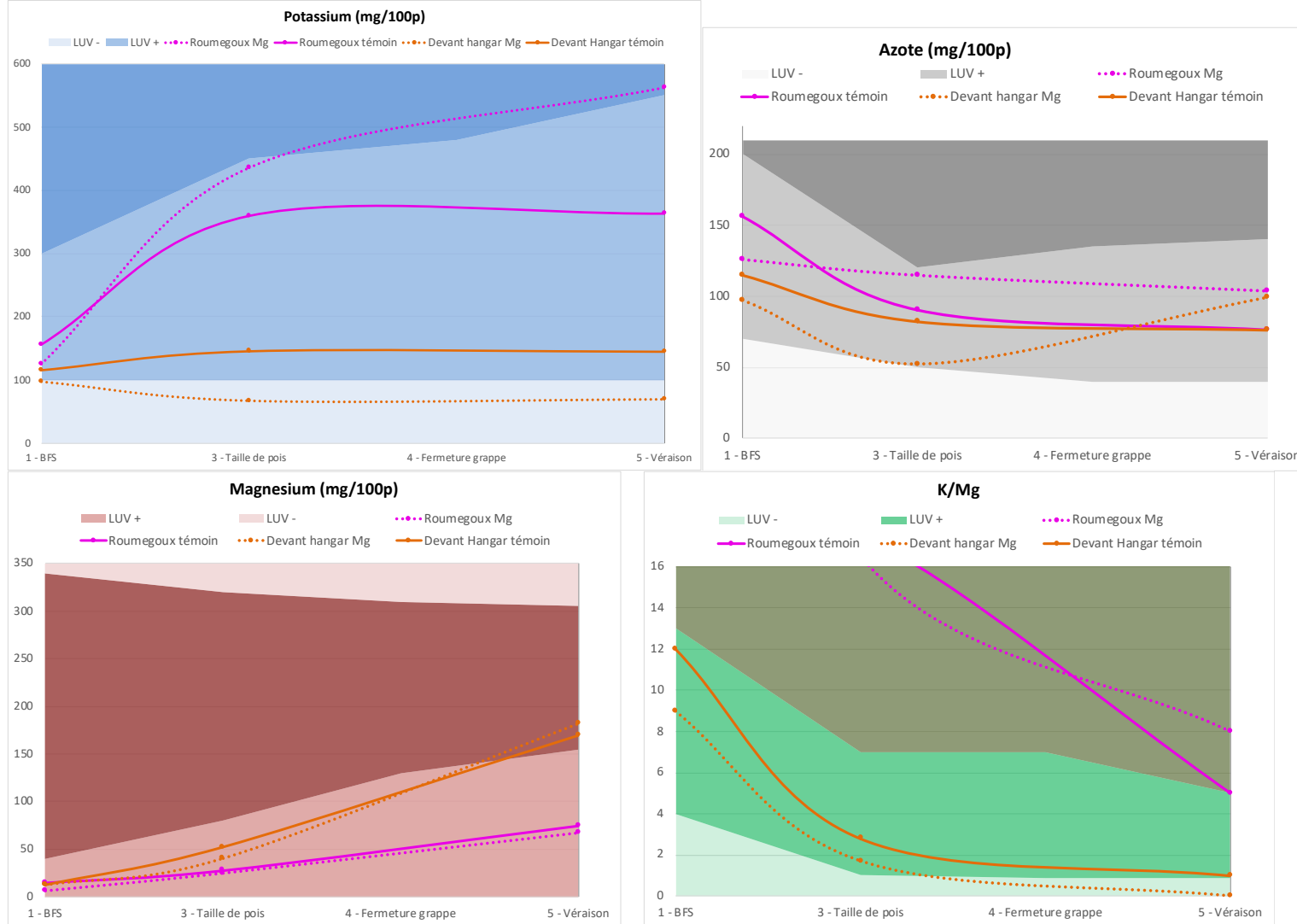


Figure 34 : Assimilation de l'azote (haut droit), du potassium (haut gauche), du magnésium (bas gauche) et du K/Mg (bas droite) pour les parcelles de l'essai fer

Nom des parcelles	Moyenne poids/cep TÉMOIN	Moyenne poids/cep TRAITÉ	Pvalue
Terrasson 4-5	149,90	212,06	0,0058
Couchebouc 1	1007,80	1262,57	0,0012
Couchebouc 3	962,01	1373,10	0,0159
Malbiche	399,21	750,43	0,0002
Roumegoux	2738,03	3542,30	0,0078

Tableau 4 : Moyennes du poids des grappes/cep obtenues pour l'ensemble des parcelles d'essai

Nom des parcelles	Moyenne grappes/cep TÉMOIN	Moyenne grappes/cep TRAITÉ	pVALUE
Terrasson 4-5	9	12	0,0115
Couchebouc 1	9	12	0,0090
Couchebouc 3	8	12	0,0005
Malbiche	7	11	0,0009
Roumegoux	12	13	0,0780

Tableau 5 : Moyennes du nombre de grappes par cep obtenues pour l'ensemble des parcelles d'essai

Ainsi une analyse des baies seraient plus pertinente pour constater des différences au stade mi-véraison. En revanche, pour les autres éléments (N, P, K et Zn), les parcelles traitées ne suivent pas toutes la même tendance. Par exemple, pour le potassium les courbes traitées et non traitées ne sont pas toutes identiques. Ainsi, pour Malbiche, le témoin semble avoir une meilleure assimilation du potassium par rapport au traitement. Par contre, pour Terrasson au stade taille de pois c'est la partie traitée qui assimile mieux le potassium. Ainsi, les prélèvements de pétioles n'ont pas permis de constater les mêmes résultats que l'expérience de *Imam M. (2014)* sauf pour l'élément fer.

De même pour le traitement au magnésium (Figure 34), les résultats sont souvent opposés entre les deux parcelles. Pour reprendre l'exemple du potassium, la partie traitée pour Roumegoux a permis une meilleure assimilation de cet élément alors que c'est l'inverse pour Derrière le Hangar où l'assimilation est plus efficace pour la partie non traitée. Le seul minéral où la tendance reste identique est l'azote où les analyses de pétioles révèlent une meilleure assimilation de l'azote en fin de cycle pour les parties traitées. Enfin, le traitement au magnésium n'a pas donné des résultats significativement différents sur l'ensemble du cycle confirmant l'absence de résultat sur les paramètres étudiés précédemment.

5°/ Les mesures de rendement :

Les résultats ont tout d'abord suivi un test de Shapiro pour constater la normalité des données. Les pvalue obtenues sont inférieures à 5%, les résultats ne sont donc pas normaux. Ainsi le test de Student ne peut être appliqué et on utilise donc le test de Wilcoxon. Le script R se trouve en annexe 2.

Pour le rendement par pied, nous constatons que l'ensemble des parcelles ont des résultats significativement différents. En effet, les pvalue (Tableau 4) sont largement inférieures à 5%. On constate ainsi des augmentations de rendement pour les traitements au fer comme au magnésium. Pour les parcelles traitées au fer, on constate une augmentation de rendement de 30% pour Terrasson 4-5 et Couchebouc 3, de 47% pour Malbiche et 20% pour Couchebouc 1. Ces résultats sont en accord avec l'expérience menée par Shayan Akram Mustafa (2018) qui avait constaté une augmentation du rendement de 40% sur les vignes traitées au Fe-EDTA. Ces résultats sont également confirmés par Dies El-Anes (1994).

De plus, le nombre de grappes par pied (Tableau 5) est lui aussi significativement différent ce qui confirme également l'expérience de Shayan Akram Mustafa (2018). Nous avons obtenu en moyenne entre trois et quatre grappes de plus pour les ceps qui ont été traités au fer.

Les volumes de baies sont eux aussi en moyenne différents avec des volumes plus importants pour les modalités traitées et ceux pour toutes les parcelles.

Ainsi le fer a permis une augmentation du rendement par pied notamment par une augmentation du volume des baies et du nombre de grappes par pied. Une explication peut être que la disponibilité du fer est plus rapide pour les plantes ce qui implique une augmentation de la teneur en catalase et en chlorophylle, provoquant la fabrication et l'accumulation de plus de glucides. Ce mécanisme semble être associé à une augmentation de la fructification et du développement des fruits (*Mahadhan, S., 2001*).

Nom des parcelles	Volume pour 50 baies TÉMOIN (en mL)	Volume pour 50 baies TRAITÉ (en mL)
Terrasson4-5	60 ± 2	73 ± 2
Couchebouc 1	59 ± 2	69 ± 2
Couchebouc 3	62 ± 2	67 ± 2
Malbiche	63,5 ± 2	77 ± 2
Roumegoux	69 ± 2	80 ± 2

Tableau 6 : Récapitulatif des moyennes du nombre de grappes par cep obtenues pour l'ensemble des parcelles d'essai

Nom des parcelles	Rapport feuilles/fruits TÉMOIN	Rapport feuilles/fruits TRAITÉ
Malbiche	5,755	4,412
Couchebouc 1	2,527	2,559

Tableau 7 : Récapitulatif des rapports feuilles/fruits (en m<sup>2</sup>/kg) pour Couchebouc 1 et Malbiche

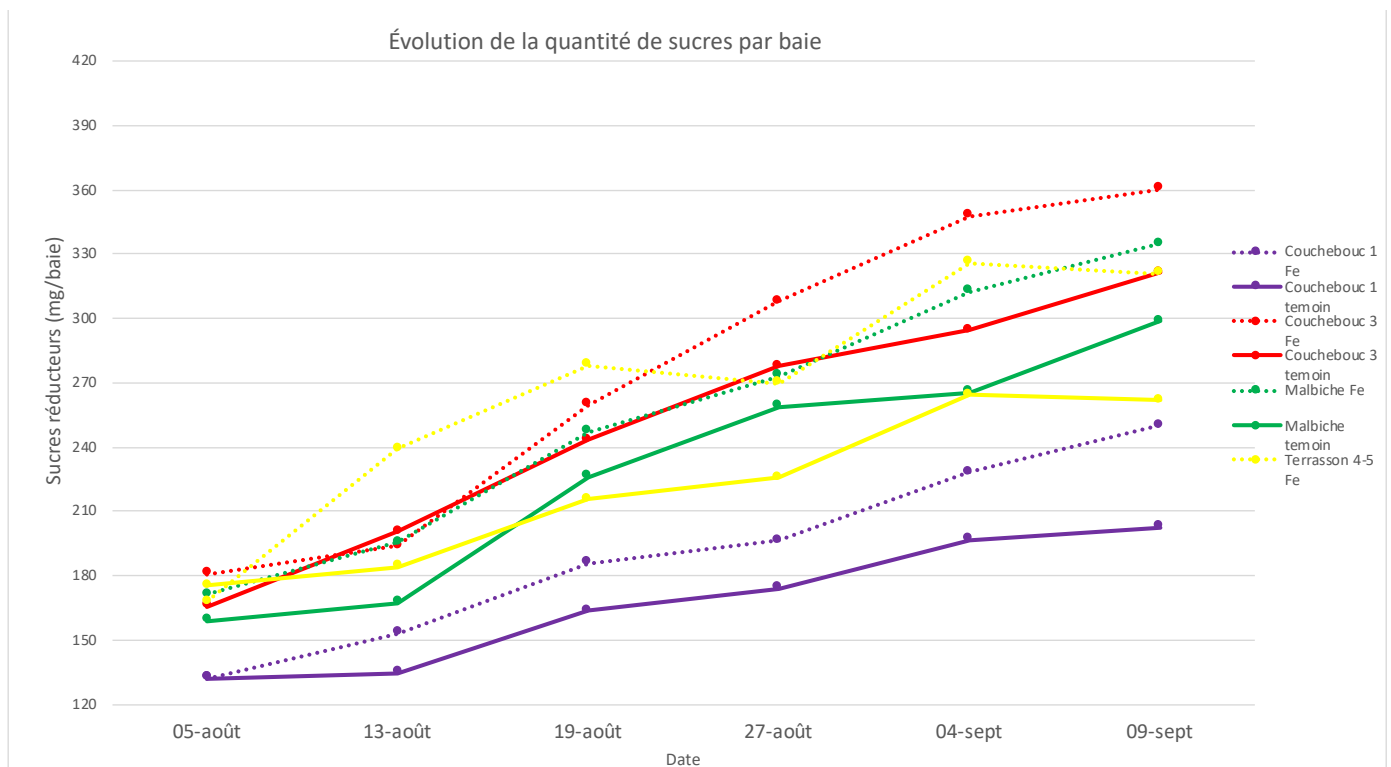


Figure 35 : Cinétique de chargement en sucres des baies pour les parcelles de fer

Les comptages n'ont pas été réalisés sur la parcelle devant le Hangar qui n'avait pas donné des résultats concluants pour les autres paramètres. De plus, cette parcelle, du fait d'une forte humidité a été ravagée par le mildiou créant de fortes hétérogénéités au sein de la parcelle. Ainsi les dénombrements de rendement ont été seulement réalisés sur la parcelle Roumegoux. Les résultats sont aussi concluants pour cette parcelle avec une augmentation de 22% du rendement, en moyenne une grappe en plus par pied et un volume par baie en moyenne plus important de 17%. Ces résultats confirment l'expérience de *Zlámálová T. et al.* (2015) qui avait quant à lui constaté une augmentation de 11,2% de rendement. Comme le fer, le magnésium est un élément au centre de nombreuses réactions du métabolisme indispensables au bon développement du feuillage, des racines et des chloroplastes. Ainsi un meilleur équilibre magnésien permet de maintenir le végétal dans des conditions optimales permettant donc une augmentation du rendement grâce à une meilleure fructification et un meilleur développement des baies.

#### 6°/ Qualité du raisin :

##### a) Rapport feuilles/fruits :

Les résultats obtenus sont répertoriés dans le Tableau 7.

Premièrement, on constate que le rapport est plus important pour la partie non traitée pour Malbiche. En effet, nous avons constaté que le rendement avait grandement été augmenté suite aux pulvérisations de fer. Ainsi même si la surface foliaire est plus importante pour la partie traitée, le déséquilibre est bien présent.

Cependant la bibliographie mentionne des rapports entre 1 et 2. Avec notre méthode, nous obtenons des valeurs bien plus hautes. Une première explication peut être que Malbiche est une parcelle de jeunes vignes qui produisent moins en comparaison de vignes plus âgées. Deuxièmement, la technique utilisée est un peu différente de celle utilisée dans la littérature puisque nous avons pris en compte la surface foliaire totale (par la méthode de Lopes et Pinto) et non une approximation de la surface foliaire externe. Nous n'avons pas choisi cette dernière méthode car elle n'aurait pas été assez discriminante pour constater des différences. En effet, le calcul de la SECV repose sur la hauteur du feuillage (identique puisque les parcelles sont rognées), la distance entre les rangs (elle aussi constante) et de l'épaisseur du feuillage.

En revanche, les résultats sont différents pour Couchebouc 1. Une légère tendance montre un rapport plus élevé pour la partie traitée. De plus, les résultats sont plus concordants avec la bibliographie. On peut supposer que le cépage Cabernet Sauvignon est plus sensible au traitement de fer et sera plus qualitatif sur la partie traitée au fer. En effet, l'effet dilution devrait être moins important puisque l'augmentation de rendement n'a pas été aussi importante que pour Malbiche.

En conclusion, cette méthode ne permet pas de montrer que le traitement de fer a une influence sur la qualité. Les résultats sont contraires pour les deux parcelles considérées. Les résultats des contrôles maturité permettront de constater si les tendances obtenues sont avérées.

##### b) Résultats des contrôles maturité :

##### i) Le pH et l'acidité :

Pour les expériences de fer, les résultats sont contrastés (Tableau 8). Une diminution de l'acidité totale et une augmentation du pH sont constatées pour Couchebouc 1 et 3. Les résultats sont contraires pour les deux autres parcelles de fer. Ainsi aucune conclusion ne peut être faite concernant l'influence du fer pour ces paramètres.

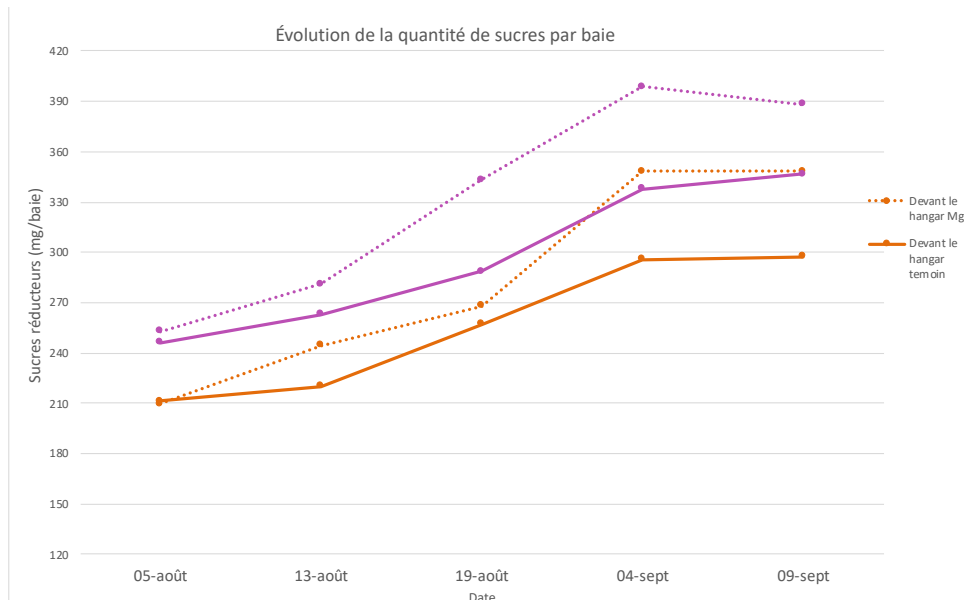


Figure 36 : Cinétique de chargement en sucres des baies pour les parcelles de magnésie

	TAP (%)	Sucres réducteurs (g/L)	AT (g/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Acide Malique (g/L)	Antocyanes (mg/L)	pH
Terrasson TÉMOIN	13,60	238	3,40	0,80	280	3,46
Terrasson FER	12,91	226	3,66	0,90	238	3,38
Couchebouc 1 TÉMOIN	12,06	211	4,57	2,90	230	3,35
Couchebouc 1 FER	12,74	223	4,15	2,80	245	3,41
Couchebouc 3 TÉMOIN	12,40	217	3,94	2,6	252	3,39
Couchebouc 3 FER	12,51	219	3,78	2,10	238	3,43
Malbiche TÉMOIN	13,03	228	3,77	1,60	241	3,36
Malbiche FER	12,34	216	3,85	1,60	219	3,25

Tableau 8 : Récapitulatif des résultats du dernier contrôle maturité pour les parcelles fer

	TAP (%)	Sucres réducteurs (g/L)	AT (g/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Acide Malique (g/L)	Antocyanes (mg/L)	pH
Roumegoux TÉMOIN	13,54	237	3,60	1,9	156	3,43
Roumegoux MG	12,86	225	3,52	1,6	175	3,40
Devant Hangar TÉMOIN	14,63	256	3,74	0,8	213	3,25
Devant Hangar MG	14,23	249	3,74	0,7	214	3,25

Tableau 9 : Récapitulatif des résultats du dernier contrôle maturité pour les parcelles de Magnésium

Une légère tendance semble se dessiner pour Roumegoux (Tableau 9). Un pH diminué de 0,03, une augmentation de 0,3 de l'acide malique et 0,08 pour l'acidité totale pour la partie traitée. Ainsi les résultats montrent seulement une petite tendance. En revanche, aucune différence n'est présente pour la parcelle Devant le Hangar. Les expériences menées par *Zlámálová T. (2015)* et *S.N. Trollove (2008)* ne montraient pas de différences sur les paramètres du pH et de l'acidité totale.

ii) Le chargement en sucres et alcool probable :

Avec les données obtenues précédemment, le volume d'une baie peut être considérée comme une fonction linéaire de son poids frais c'est-à-dire que nous pouvons proposer l'approximation suivante: « 1 g de baie est égal à 1 mL ». Ce postulat nous permet de tracer les cinétiques de chargement en sucres des baies, en multipliant les résultats des sucres réducteurs obtenus en g/L par le poids des baies en g/baie. Nous obtenons ainsi le sucre/baie en mg/baie. Les résultats sont répertoriés dans les Figures 35 et 36.

Pour l'expérience de fer, nous observons que malgré des concentrations quasiment identiques au début des prélèvements (après véraison), les résultats sont différents un mois après. En effet, au dernier prélèvement, le 9 Septembre, il y avait plus de sucres (en mg/baie) dans toutes les parcelles traitées au fer. Ainsi, il y avait en moyenne 11% de plus pour Couchebouc 3, 18% pour Terrasson, 10% pour Malbiche et 20% de plus pour Couchebouc 1. Le chargement en sucres de chaque baie semble donc être plus important pour les modalités traitées. Le fer pourrait avoir la propriété de stimuler la synthèse des glucides.

Cependant, ce dernier résultat est directement lié au poids des baies, qui comme nous l'avons vu précédemment, est bien plus important pour les parcelles traitées. Ainsi les baies plus grosses induisent une dilution qui diminuera le TAP. Les résultats sont très disparates et dépendent surtout des parcelles. Le dernier contrôle maturité montre des TAP plus haut pour Terrasson et Malbiche pour la partie témoin alors que c'est le contraire pour Couchebouc 1 et 3 où le TAP est plus important pour la partie traitée. Ces résultats ne permettent donc pas de conclure quant à un possible effet du fer sur le TAP.

Pour l'expérience au magnésium, les résultats sont concluants pour les deux parcelles. La quantité de sucres par baies est supérieure pour les expériences au magnésium. Comme pour le fer, le 5 Août (début des contrôles maturité) les quantités de sucres étaient presque identiques. Puis au dernier prélèvement, cette concentration est plus importante de 15% pour Derrière le Hangar et 11% pour Roumegoux pour la modalité traitée au magnésium. Selon *Cakmak et Yazici (2010)*, le magnésium est indispensable à la synthèse des sucres puisqu'il est impliqué dans le chargement du phloème. Le magnésium se lie avec l'ATP et active l'enzyme  $H^+ATPase$  qui fournit l'énergie nécessaire pour ce processus. Le chargement du phloème permet le transport du saccharose dans les cellules du phloème.

En revanche, le TAP est lui plus faible pour les parcelles traitées ainsi que la concentration en sucres réducteurs pour 200 baies. Les résultats obtenus sont plutôt en accord avec la bibliographie. L'expérience de *Zlámálová T. et al. (2015)* montre des résultats non significativement différents concernant les paramètres de TAP et sucres. Des tendances avaient été découvertes sans validation. En revanche, des produits comme l'EPSO Top (*W.Siegfried et al., 2006*) et l'Oxyfertil (*Capital Sol, 2008*) avaient permis quant à eux une augmentation des sucres et donc du degré alcoolique.



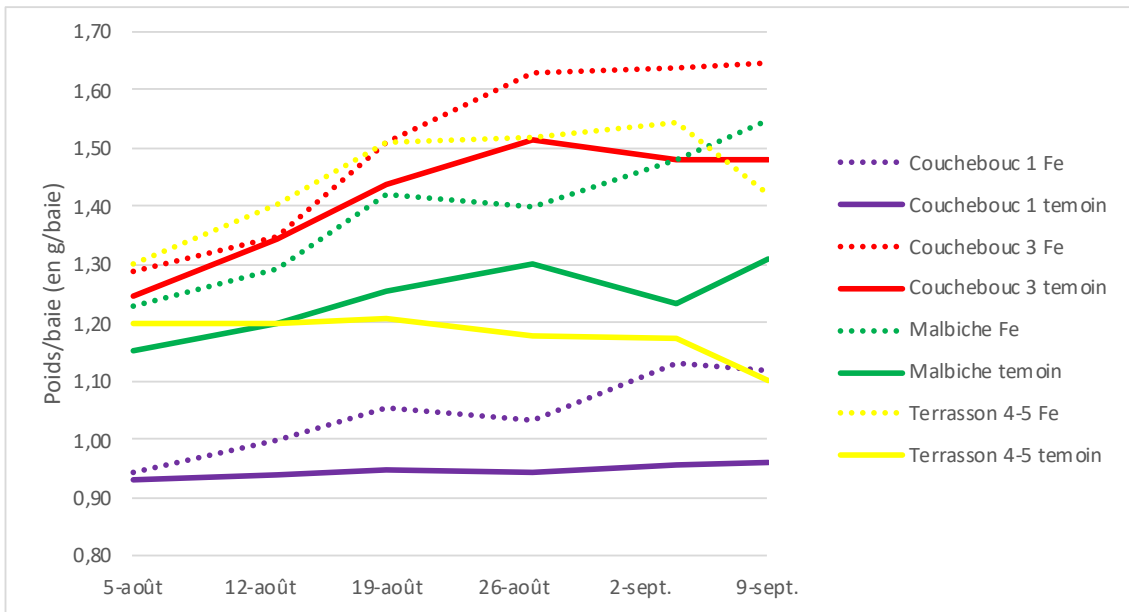


Figure 38 : Évolution du poids des baies (en g/baie) sur l'expérience fer

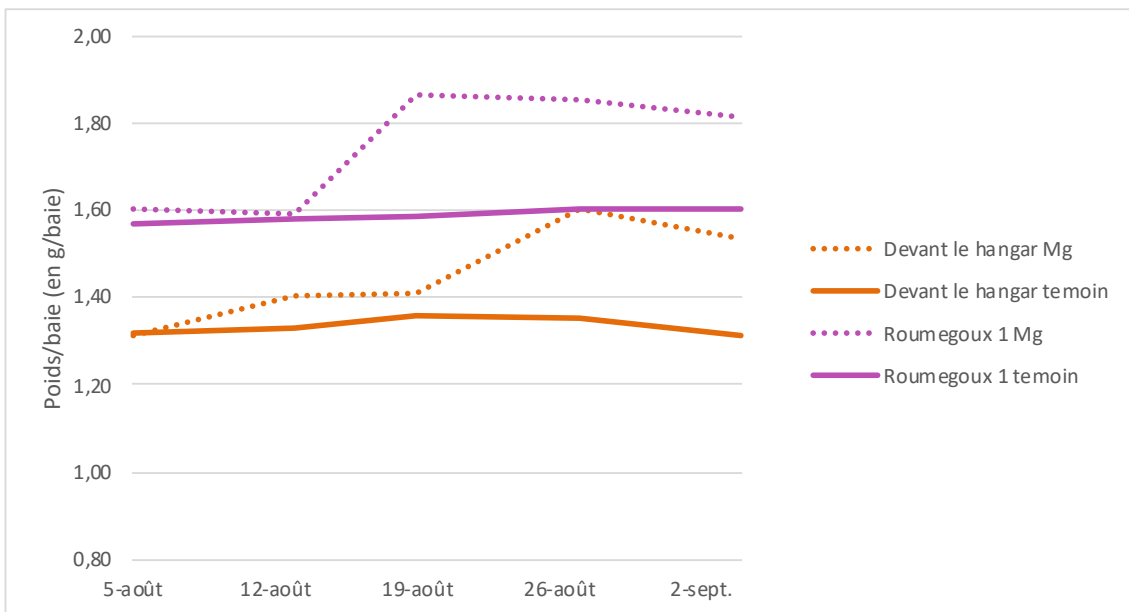


Figure 39 : Évolution du poids des baies (en g/baie) sur l'expérience magnésium

iii) Les anthocyanes :

La dernière analyse d'anthocyanes (Tableau 8) montrent que cette concentration est plus faible pour l'ensemble des Merlot traités au fer (Couchebouc 3, Terrasson et Malbiche). Cependant c'est le contraire pour la parcelle de Cabernet Sauvignon. Une première hypothèse pourrait être que le Cabernet est un cépage plus sensible au fer que le Merlot. La seconde hypothèse pourrait être une mauvaise dernière analyse réalisée par le laboratoire.

On suppose que les parcelles de Merlot ont subi une dilution par augmentation du volume de la baie faisant ainsi diminuer la concentration en anthocyanes exprimée en mg/L.

Pour l'expérience de magnésium, les résultats sont concluants pour la quantité d'anthocyanes, spécifiquement pour la parcelle Roumegoux qui possède 20mg/L en plus d'anthocyanes. Ce résultat est en accord avec l'expérience de *Capital Sol, 2008* qui avait constaté une augmentation de la concentration en anthocyanes et même en polyphénols totaux.

iv) Le poids des baies :

Sur l'ensemble du cycle, le poids des grappes est supérieur pour la modalité fer (Figure 38) notamment en fin de cycle avec des poids supérieurs de 13% pour Couchebouc 1, 16% pour Malbiche, 10% pour Couchebouc 3 et même 23% pour Terrasson 4-5. Ce résultat confirme ceux obtenus dans la partie précédente concernant les poids de grappes plus importants pour la modalité traitée.

De même pour l'expérience au magnésium (Figure 39), le poids des baies est plus important pour les deux parcelles. Les baies ont en moyenne un poids 15% plus haut pour Derrière le Hangar et 11% pour Roumegoux confirmant ainsi les résultats pour Roumegoux concernant les poids de grappes plus importants.

v) Conclusion des données sur la qualité :

Les résultats concernant les traitements au fer ne sont pas tous en accord avec la bibliographie. Les expériences menées par *PengbaoShi et al.* en 2017 sur du Cabernet Sauvignon et en 2018 sur du Merlot avait montré que les sujets ayant subis des traitements de Fe-EDTA tendent à avoir plus de sucres dans les baies, plus d'anthocyanes et plus de flavonoïdes. Ce traitement décroît l'acidité totale et augmente le pH. Nos résultats sont trop différents entre les parcelles pour conclure à un quelconque impact sur la qualité générale du raisin. En revanche, les résultats obtenus sur le Cabernet Sauvignon (Couchebouc 1) sont en accord total avec les résultats des chercheurs. Ainsi nous pouvons supposer que le Cabernet Sauvignon serait plus sensible au traitement fer notamment pour l'amélioration de la qualité. Du fait de seulement avoir étudié une seule parcelle de Cabernet, il serait recommandé d'essayer de suivre l'année prochaine d'autres parcelles de ce même cépage. En effet, la biosynthèse secondaire et donc la valeur nutritive des baies semblent être mieux activées pour le Cabernet Sauvignon grâce au traitement de fer. Ceci pourrait permettre l'obtention d'un vin de meilleure qualité.

*PengbaoShi et al., 2018* avait montré que le millésime avait une influence sur les résultats. Ainsi une continuité des traitements sur les années suivantes pourrait être nécessaire.

Pour le magnésium, les résultats ne sont pas toujours concordants comme mentionné plus haut. La faible bibliographie sur les expériences à la kiésérite n'avait pas montré de résultats significatifs concernant la qualité. En revanche, des produits plus efficaces comme l'Oxyfertil et l'EPSO semblent être plus recommandés pour l'obtention de vins de meilleure qualité.

Surface traitée GPS (ha)	Cible	Produit commercial	Dose/ha appliquée (L)	Quantité totale (L)	Prix unitaire	Prix total
551,8	FER	Inochel Fe93	0,8	441	7,75	3421,408
551,8	FER	Inochel Fe93	1	552	7,75	4276,76
					TOTAL	7698,168
				PART TRAITEMENT (%)		3,3

Tableau 10 : Coût prévisionnel pour les deux traitements de fer sur l'ensemble des parcelles en conventionnel

Surface traitée GPS (ha)	Cible	Produit commercial	Dose/ha appliquée (kg)	Quantité totale (kg ou L)	Prix unitaire (100kg)	Prix total
551,8	MAGNÉSIUM	KIÉSÉRITE	600	331080	0,34	112567,2
				PART TRAITEMENT (%)		48,1

Tableau 11 : Coût prévisionnel pour le traitement à la magnésie sur l'ensemble des parcelles en conventionnel

## V- Discussion des résultats et analyse du coût :

Les résultats des traitements au fer sont plutôt concluants notamment pour les résultats sur les rendements. En effet, pour chaque parcelle le rendement a été largement augmenté par une augmentation du volume des baies et du nombre de grappes par pieds. En revanche, les autres paramètres évoluent différemment entre les parcelles notamment la vitesse de croissance, l'état hydrique et la qualité du raisin (pH, TAP, anthocyanes etc). D'autres paramètres encore, comme la surface foliaire, semblent être stimulés par le traitement de fer. Ainsi le cépage Cabernet Sauvignon paraît être plus sensible à ce traitement puisqu'il a réagi aux plus de paramètres, notamment aux paramètres liés à la qualité. Cependant, nous ne pouvons faire qu'une hypothèse puisque nous avons seulement choisi une parcelle de ce cépage. Du fait des résultats plutôt satisfaisants, il serait intéressant de continuer l'expérience l'année suivante avec au moins une autre parcelle de ce cépage.

Cependant, il est bon de noter que les doses de fer mises sur les parcelles, ont été supérieures aux recommandations. Ces doses importantes de fer pourraient expliquer les forts rendements obtenus mais aussi les dilutions engendrées. Ainsi des doses plus classiques pourraient augmenter le rendement (sans que celui-ci ne soit trop prononcé) mais aussi augmenter la qualité générale du raisin.

La bibliographie indique que ce traitement est très dépendant du millésime (*PengbaoShi et al., 2018*). Celui-ci a été très particulier cette année du fait des fortes pluies durant tout le cycle végétatif de la vigne ne créant que peu de contrainte hydrique sur celle-ci. Ainsi une expérience sur un millésime plus classique pourrait être intéressante pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus.

Quant à l'expérience au magnésium, les résultats ont été mis à mal car une des deux parcelles a été totalement submergée par les égouts, ne permettant pas l'obtention de résultats exploitables. La parcelle restante mis à part le rendement, la concentration en anthocyanes et le chargement en sucres ne semble que peu impactée par ce traitement. En effet, avec une seule parcelle il est difficile de faire des conclusions générales sur l'efficacité d'un traitement. Les expériences de la bibliographie n'avaient pas montré de résultats significativement différents sauf pour le rendement. Ainsi, des traitements d'Oxyfertil et d'EPSO semblent plus efficaces pour espérer une augmentation de la qualité des raisins. À la différence de la kiésérite, ce sont des engrais foliaires. Nous pouvons supposer que le magnésium étant peu mobile dans le sol celui-ci serait mieux assimilé au niveau des feuilles directement.

L'ensemble des coûts des produits utilisés dans le parcellaire conventionnel est répertorié dans l'Annexe 3. Les Tableaux 10 et 11 représentent le coût des traitements au fer et à la magnésie s'ils avaient été réalisés sur l'ensemble des parcelles. Ainsi les deux traitements au fer représentent en terme de coût 3,3% du coût total des traitements alors que le traitement à la magnésie correspond à 48,1% du coût total. Au vu des résultats obtenus, le traitement à la magnésie ne semble que peu adapté, premièrement puisque les résultats précédents ne montrent que peu de différences significatives et deuxièmement, le coût total de ce produit reste très élevé. Néanmoins, le magnésium est très peu mobile dans le sol, ainsi son assimilation peut mettre du temps à se faire. Les résultats ne sont donc pas visibles pour le moment mais les observations doivent cependant continuer les années suivantes pour observer d'éventuels impacts. En revanche, le fer possède un coût moindre et les résultats sont relativement concluants pour la plupart des parcelles traitées. Ainsi ce traitement semble envisageable pour l'ensemble du parcellaire l'année prochaine pour améliorer les objectifs fixés : augmentation du rendement, de la qualité du vin fini et un meilleur fonctionnement du végétal durant sa période végétative.



## CONCLUSION

En conclusion, le traitement au fer semble adapté aux objectifs de l'entreprise. En effet, son efficacité est excellente au niveau du rendement et des résultats semblent se projeter notamment au niveau de la qualité pour le Cabernet Sauvignon. Cette entreprise vend ses bouteilles en moyenne 3 euros 50. Ainsi cette entreprise doit avoir un coût/volume intéressant pour être rentable. Une augmentation du volume ne peut donc être que bénéfique. Si en plus le fer peut augmenter la qualité, ce n'est que meilleur puisque qu'une partie de la gamme se base plutôt sur la qualité du produit final avec de plus petites quantités. De plus, le faible coût de ce traitement associé aux bénéfices qu'il apporte en font un traitement qu'il faudrait recommander et généraliser à l'ensemble du vignoble. Je pense que ce traitement doit être appliqué à des doses plus classiques qui auraient pour conséquence une augmentation moins importante des rendements et donc potentiellement une meilleure qualité.

Pour poursuivre l'expérimentation, un suivi plus poussé sur les Cabernet Sauvignon associé à des doses plus faibles en fer est recommandé. Ce traitement pourrait largement être généralisé sur l'ensemble du vignoble l'année suivante.

En ce qui concerne l'expérience au magnésium, l'équilibre physiologique est difficile et long à changer. Il serait ainsi bénéfique de suivre les effets de ce traitement à plus long terme (dans 5 ans par exemple). Pour des effets, à plus court terme des engrais foliaires constitués de magnésium pourraient être une solution envisageable.



## BIBLIOGRAPHIE :

- Anabeel M, 2014, Effect of Foliar Application of Iron on Seasonal Changes of Minerals Composition in Petioles and Berries of Halwani Lebanon and Kamali Grape Cultivars (*Vitis vinifera* L.), *Journal of Agricultural Science and Technology*
- Andersson I, 2008, Catalysis and regulation in Rubisco, *Journal of Experimental Botany* 59:1555–1568
- ArcGIS for Desktop, 2016, Fonction NDVI, disponible sur : <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm>
- Arulanantham AR, Rao IM, Terry N, 1990, Limiting Factors in Photosynthesis: VI. Regeneration of Ribulose 1,5-Bisphosphate Limits Photosynthesis at Low Photochemical Capacity, *Plant Physiology* 93(4):1466-75
- Barnavon L., Doco T., Terrier N., Ageorges A., Romieu C. et Pellerin P., 2000, Analysis of cell wall neutral sugar composition,  $\beta$ -galactosidase activity and a related cDNA clone throughout the development of *Vitis vinifera* grape berries, *Plant Physiology and Biochemistry*, 38, 289–300
- Baroň M, Bělíková H, Elbl E, Hlušek J, Lampíř J, Lošák T, Zlámalová T, 2015, Using foliar applications of magnesium and potassium to improve yields and some qualitative parameters of vine grapes (*Vitis vinifera* L.), *Plant Soil and Environment* 61(10):451-457
- Bennet JP, 1945, Iron in leaves, *Soil Science*, 60: 91-105
- Bernard N., 2019, Vivelys, le profil du raisin, power point de cours disponible sur Ticéa
- BingbingDuan, ChangzhengSong, HaijuChen, JiangfeiMeng, PengbaoShi, ZhenwenZhang, 2018, Foliar Applications of Iron Promote Flavonoids Accumulation in Grape Berry of *Vitis vinifera* cv. Merlot Grown in the Iron Deficiency Soil, *Food chemistry* 1;253:164-170
- Birch, R.M, M. Ciani, Walker G.M, 2003, Magnesium, calcium and fermentative metabolism in wine yeasts, *Journal of Wine Research* 14:3-15
- Bould C, Hewitt EJ, Needham P, 1983, *Diagnosis of Mineral Disorders of Higher Plant, Principles*, Her Majesty's Stationery Office
- Broadley MR, White PJ, 2010, Eats roots and leaves. Can edible horticultural crops address dietary calcium, magnesium and potassium deficiencies?, *Proceedings Nutrition Society* 69:601–612
- Cakmak I, Kirkby EA, 2008, Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage, *Physiologia Plantarum* 133:692–704
- Cakmak I, Yazici AM, 2010, Magnesium: a forgotten element in crop production, *Better Crops* 94:23–25
- Capital Sol, 2008, Fertilisation basique calcique et magnésienne de la vigne, N°22 printemps-été
- Carbonneau A., Torregrossa L., 2020, *Traité de la vigne 3ème édition*, Dunod
- Chambre d'agriculture du Gard, 2010, Analyse pétiolaires 2010 et fertilisation 2010/2011
- Choné, X, Trégoat, O, Van Leeuwen C, Dubourdiou D, 2000, Vine water deficit : among the 3 applications of pressure chamber, stem water potential is the most sensitive indicator, *OENO One* 34, 169
- Claverie M, 2007, Des m<sup>2</sup> de feuilles pour produire des kg de raisins : 1,2 au minimum ; 1,5 c'est mieux !, *Institut français de la Vigne et du Vin*
- De brei R, Fuentes S, Gilliam M, Tyerman S, Bianchini N, Smith J, Collins C, 2016, VitiCanopy: A Free Computer App to Estimate Canopy Vigor and Porosity for Grapevine, *Sensors* 16(4), [585]
- Deloire A., Ojeda H., Zebic O., Bernard N., Hunter J.J. et Carbonneau A., 2006, Influence de l'état hydrique de la vigne sur le style de vin, *Revue internet de la viticulture et oenologie*, N° 19
- Deloire A., 2007, *Métabolismes secondaires - Les composés phénoliques*, fiche N°9



- Dies El-Anes, 1994, Effect of foliar application of manganese, iron and zinc on yield and quality of grape (*Vitis vinifera* L.), National Agricultural Documentation Center
- Dorenstouter H, Pieters G, Findenegg G, 1985, Distribution of magnesium between chlorophyll and other photosynthetic functions in magnesium deficient, *Journal of Plant Nutrition* 8: 1088–1101
- Dubernet M., Toussaint M., Camper P.M, Paricaud T., Coste1 M., Kalanquin D., Prabonnaud S., Thomas G., Fil J., Fourment J-D, Tregoat O., 2014, Dynamique annuelle de la nutrition de la vigne et ses conséquences œnologiques : cas de l'Azote et du Potassium, Laboratoire Dubernet
- Dufourcq T, Adaptation de la conduite du vignoble : la gestion du rapport feuilles/fruits, Institut français de la vigne et du vin, 2004
- Dufourcq T, Gontier L, Serrano E, Ollat N, 2005, Rapport surface foliaire et poids de récolte : indices sur l'alimentation hydrique de la vigne, la qualité du moût, la qualité du vin de quatre cépages de Midi-Pyrénées, GESCO
- Dupuch V, 1998, Maturité phénolique et dates de récolte, les apports de la méthode « CASV », extrait de « les composés phénoliques » compte rendu de la Journée Technique
- Ebert G, Fernández V, 2005, Foliar Iron Fertilization – A Critical Review, *Journal of Plant Nutrition*
- Elizabeth M. Rees R. Et Graham G. Stewart, 1997, The effects of increased Magnesium and Calcium concentrations on yeast fermentation performance in high gravity worts, *Journal of the Insitute of Brewing*, Vol. 103, pp. 287-291
- Ericsson T, Kahr M, 1995, Growth and nutrition of birch seedlings at varied relative addition rates of magnesium, *Tree Physiology* 15:85–93
- Farhat N, Rabhi M, Krol M, Barhoumi Z, Ivanov AG, McCarthy A, Abdelly C, Smaoui A, Huner NPA, 2016, Starch and sugar accumulation in *Sulla carnosa* leaves upon  $Mg^{2+}$  starvation, *Acta Physiol Plant*
- Filipčík R, Hlušek J, Lošák T, Pavloušek P, Sedláček M, Zatloukalová, 2010, The effect of soil ans foliar applications of magnésium fertilizers on yields ans quality of vines grapes, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 59(3):221-226
- Garcia M, Daverede C, Gallego P, Toumi ,1999, Effect of varions potassium-calcium ratios on cation nutrition of grape grown hydroponically, *Journal of Plant Nutrition* 22: 417– 425
- Glories Y., 1984, La couleur des vins rouges (2ème partie) origine et interprétation, *Connaissance de La Vigne et Du Vin* 18, 253–271
- Graham HT., 2010, Photosynthesis, Pennstate
- Grape Growers's Handbook, 2018, Essential plant nutrients, chapitre 16
- Guilbault P, 2003, Identification des principales carences de la vigne, *Avenir Agricole Aquitain*
- Hermans C, Jhonson GN, Strasser RJ, Verbruggen N, 2004, Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II, *Planta* 220:344–355
- Hellin E., Hernandez-Cortez J. A., Piqueras A., Olmos E. et Sevilla F., 1995, The influence of the iron content on the superoxide dismutase activity and chloroplast ultra structure of *Citrus limon* in iron nutrition in soil and plants, *Journal of Plant Nutrition*, 5, 211–229
- Igamberdiev AU, Kleczkowski LA, 2003, Membrane potential, adenylate levels and  $Mg^{2+}$  are interconnected via adenylate kinase equilibrium in plant cells, *Biochimica Biophysica Acta* 1607:111–119
- Institut Français de la Vigne et du Vin, Estimation de l'état hydrique de la vigne, disponible sur : <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/estimation-de-letat-hydrique-de-la-vigne/>
- Institut Français de la Vigne et du Vin, Fertilisation phosphatée, potassique et magnésienne de la vigne, disponible sur : <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/fertilisations->

[phosphatee-p-potassique-ket-magnésienne-mg-de-la-vigne/](#)

- Institut Français de la Vigne et du Vin, Le rapport feuilles/fruits ou indice SECV/PR, disponible sur : <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/le-rapport-feuilles-fruits/>
- Kobayashi T et al., 2003, Identification of novel cis-acting elements, IDE1 and IDE2, of the barley IDS2 gene promoter conferring iron-deficiency-inducible, root-specific expression in heterogeneous tobacco plants, *Plant Journal* 36: 780-93
- KS-France, Vignes de qualité informations sur la fertilisation potassium et magnésienne, disponible sur : <https://www.ks-france.com/shared/data/kali-fertiliser-broschures-pdf/broschures-fr/fr-wine-A4-1011.pdf>
- Lindsay WL, Role of chelating in micronutrient availability, 1976, *The Plant Root and Its Environment*, University Press of Virginia
- Lopes C. et Pinto P.A., 2005, an easy and accurate estimation of grapevine leaf area with simple mathematical models, *Vitis* 44 (2), 55–6
- Lorenz, D, Eichhorn, K, Bleiholder H, Klose R, Meier U et Weber E, 1995, Growth Stages of the Grapevine: Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*) Codes and descriptions according to the extended BBCH scale, *Australian Journal of Grape and Wine Research* 1(2) 100-103
- McDonagh B., Padilla A., Pedrajas J.R., Barcena J.A., 2011, Biosynthetic and iron metabolism is regulated by thiol proteome changes dependent on glutaredoxin-2 and mitochondrial peroxiredoxin-1 in *Saccharomyces Cerevisiae*, *Journal of Biological Chemistry*, 286(17):15565-76
- Mengel K, Kirkby EA, 2001, Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Ojeda H., Deloire A. et Carbonneau A., 2001, Influence of water deficit on grape berry growth, *Vitis* 40, 141–145
- Pakrasi H, Ogawa T, Bhattacharya-Pakrasi M, 2001, Transport of metals: a key process in oxygenic photosynthesis, *Advances in Photosynthesis and Respiration book series (AIPH, volume 11)*
- Pasquier G, 2014, Le potassium, un élément déterminant de la vivacité des vins, *La Vigne*
- PengbaoShi, Bing Li, Haiju Chen, Changzheng Song, Jiangfei Meng, Zhumei Xi, Zehnten Zhang, 2017, Iron Supply Affects Antocyanin Content and Related Gene Expression in Berries of *Vitis Vinifera* cv., Cabernet Sauvignon, *Molecules* 22(2):283
- Reynier A., 2016, Manuel de viticulture REYNIER 12ème édition
- Ribéreau-Gayon A., Glories P., Maujean Y. et Dubourdieu, D., 2004, *Traité d'oenologie: Tome 2, Chimie du vin, Stabilisation et traitement*
- Rodriguez Lovelle B, Trambouze W, Jacquet O, 2009, Évaluation de l'état de croissance végétative de la vigne par la « méthode des apex », *Progrès Agricole et Viticole* 126 (4), 77-88
- SADEF, 2006-2010, la carence en magnésium de la vigne, disponible sur : <http://www.fluorimetrie.com/la-carence-en-magnesium-de-la-vigne.html>
- Rousseau J, Dupin S, Acevedo-opazo C, Tisseyre B, Ojeda H, 2008, l'imagerie aérienne : application à la caractérisation des potentiels viticoles et oenologiques, 31ème Congrès OIV
- Scandalios JG, 2005, Oxidative stress: molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* 38:995–1014
- Shayan Akram Mustafa, Shawkat Mustafa Al-Atrushy, 2018, Effect of foliar application of Iron and Microgreen fertilizer on vegetative growth, quantitative and berries characteristics of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. Khoshnaw under non-irrigated condition, Conference of the 2nd International Conference of Agricultural Sciences College of Agricultural Sciences at University

of Sulaiman

- Siedow JN, 1991, Plant lipoxygenase: Structure and function, *Plant Molecular Biology* 42: 145-188
- Skinner P, Matthews M, 1990, A novel interaction of magnesium translocation with the supply of phosphorus to roots of grapevine (*Vitis vinifera* L.) plant, *Cell and Environment* 13: 821–826
- Spiers A, Trolove SN, Wheeler S, 2008, A comparison of three methods of magnesium application to grapes, *New Zealand Institute for Crop and Food Research*
- Syngenta, 2020, Carence en magnésium de la vigne, disponible sur : <https://www.syngenta.fr/traitements/carence-en-magnesium-de-la-vigne>
- Tognetti VB et al., 2007, Enhanced plant tolerance to iron starvation by functional substitution of chloroplast ferredoxin with a bacterial flavodoxin, *Proceeding of National Academy of Sciences*, 104: 11495-11500
- Van Leeuwen C, Gaudillère JP, Trégoat O, 2011, The assessment of vine water uptake conditions by <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C discrimination in grape sugar, *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 35(4):195-205
- Viganì G, Zocchi G, Bashir K, Philippar K and Briat JF, 2013, Signals from chloroplasts and mitochondria for iron homeostasis regulation, *Trends Plant Science* 18: 305-311
- Vignoble&viticulture.fr, Chlorose ferrique de la vigne, disponible sur : <https://viticulturevignoble.fr/chlorose-ferrique-vigne.html>
- Viti-notes, trace elements, disponible sur : [https://www.awri.com.au/wp-content/uploads/4\\_nutrition\\_trace\\_elements.pdf](https://www.awri.com.au/wp-content/uploads/4_nutrition_trace_elements.pdf)
- Vivin P, 2008, Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisin, *Innovations Agronomiques* 159-167
- Walker G.M., 1998, Magnesium as a stress-protectant for industrial strains of *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of American Society of Brewing Chemist.* 56, 109-113
- Wallace A, Lunt OR, 1960, Iron chlorosis in horticultural plants, *Journal of American Society for Horticultural Science* 75: 819-841
- Wicks A.S. et Kliewer W.M., 1983, *American Journal of Enology and Viticulture* 34, 114
- Zufferey V., Spring J-L., Verdenal T., Dienes A., Belcher S., Lorenzini F., Koestel C., Rosti J., Gindro K., Spangenberg J., Viret O., 2017, The influence of water stress on plant hydraulics gas exchange, berry composition and quality of Pinot Noir wines in Switzerland, *OENO One* Vol. 51 No.1

ANNEXE 1 : Récapitulatif des différents paramètres mesurés

<b>Paramètres mesurés</b>	<b>Méthode utilisée</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Informations apportées</b>
Statut hydrique	Méthode des apex	Tous les 10 jours à partir de la floraison	Croissance de la plante
Statut hydrique	$\delta C_{13}$	Avant la récolte	Stress potentiel sur l'ensemble du cycle
Statut hydrique	Potential de tige	4 stades clés : - Avant stress - Fermeture de la grappe - Avant récolte	Stress à un moment précis du cycle
Suivi phénologique	Échelle de Lorentz et Baglioni	Début avant la floraison puis toutes les semaines	Retards ou avances dans le cycle végétatif et reproducteur
Croissance des rameaux	Mesure des rameaux	Début avant la floraison puis toutes les semaines	Croissance de la plante Vigueur
Biomasse relative	NDVI	Une fois fin Août	Bon fonctionnement de la photosynthèse Indirectement sur la qualité
Surface foliaire	SECV/PR	Une fois à la véraison	Interception des rayons lumineux (qualité de la photosynthèse) Qualité du raisin Rendement
Statut minéral	Analyse pétioleaire	3 stades clés : - Avant floraison - Fermeture de la grappe - Mi véraison	Assimilation des minéraux Déterminer des carences
Rendement	Nombre de grappes/pied Poids de 200 baies Volume des baies Rendement parcelle	Une fois avant la récolte	Impact sur le rendement
Cinétique de chargement en sucres et teneurs en polyphénols	Prélèvements de 200 baies envoyées au laboratoire	Toutes les semaines à partir de la véraison	Qualité du raisin

## ANNEXE 2 : Scripts R des différents paramètres mesurés

### - Test de Student pour la SF (Malbiche puis Couchebouc 1) :

```
> fer<- c(21893, 20056, 39589, 36011, 40667, 34715, 34782, 31971, 29520, 34718)
> temoin<- c(32550, 39011, 21995, 21702, 16201, 25566, 14685, 25346, 33415, 24101)
> shapiro.test(fer)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: fer
W = 0.89299, p-value = 0.1832
```

```
> shapiro.test(temoin)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: temoin
W = 0.95487, p-value = 0.7262
```

```
> var.test(fer,temoin)
```

F test to compare two variances

```
data: fer and temoin
F = 0.79832, num df = 9, denom df = 9, p-value = 0.7427
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.1982904 3.2140148
sample estimates:
ratio of variances
 0.7983158
```

```
> t.test(fer,temoin)
```

Welch Two Sample t-test

```
data: fer and temoin
t = 2.1371, df = 17.776, p-value = 0.04675
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 111.2597 13758.7403
```

```
> fer<-c(41864, 28870, 31760, 34210, 20400, 28161, 27789, 24788, 55622, 38277)
> temoin<-c(24894, 26499, 26131, 16241, 28510, 15129, 30362, 19303, 25476, 17117)
> shapiro.test(fer)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: fer
W = 0.9151, p-value = 0.3179
```

```
> shapiro.test(temoin)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: temoin
W = 0.89951, p-value = 0.2164
```

```
> var.test(fer,temoin)
```

F test to compare two variances

```
data: fer and temoin
F = 3.3601, num df = 9, denom df = 9, p-value = 0.0855
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.834591 13.527576
sample estimates:
ratio of variances
 3.360058
```

```
> t.test(fer,temoin)
```

Welch Two Sample t-test

```
data: fer and temoin
t = 2.8109, df = 13.921, p-value = 0.01394
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 2414.903 18000.897
sample estimates:
mean of x mean of y
 33174.1 22966.2
```

- ANOVA à deux facteurs pour le potentiel de tige (Terrasson 4-5 puis Couchebouc 1) :

```
> library(readxl)
> potentieltigeR <- read_excel("Desktop/potentieltigeR.xlsx")
> View(potentieltigeR)
> mod1<-lm(Contrainte~Traitement*Date, contrasts =list(Traitement = contr.sum), data =
potentieltigeR)
> Anova(mod1,type=3)
Anova Table (Type III tests)
```

```
Response: Contrainte
```

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
(Intercept)	0.991	1	0.4792	0.4987
Traitement	0.237	1	0.1144	0.7396
Date	92.407	1	44.6687	5.255e-06 ***
Traitement:Date	0.496	1	0.2398	0.6310
Residuals	33.100	16		

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
> library(readxl)
> potentieltigeR <- read_excel("Desktop/potentieltigeR.xlsx")
> View(potentieltigeR)
> mod1<-lm(Contrainte~Traitement*Date, contrasts =list(Traitement = contr.sum), data =
potentieltigeR)
> Anova(mod1,type=3)
Anova Table (Type III tests)
```

```
Response: Contrainte
```

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
(Intercept)	1.870	1	1.0941	0.3111103
Traitement	1.748	1	1.0229	0.3268866
Date	41.818	1	24.4647	0.0001459 ***
Traitement:Date	5.919	1	3.4626	0.0812504 .
Residuals	27.349	16		

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

- Test du Khi2 pour la méthode des apex (exemple pour Malbiche) :

```
> traite = c(39,10,1)
> non_traite = c(27,24,1)
> tableau = matrix(c(traite,non_traite), 2,3, byrow = T)
> khi_test=chisq.test(tableau)
> khi_test
```

Pearson's Chi-squared test

```
data: tableau
X-squared = 7.9103, df = 2, p-value = 0.01916
```

- Test de Wilcoxon pour l'accroissement des rameaux (Couchebouc 1) :

```
> library(readxl)
> croissance <- read_excel("Desktop/STAGE fin d'étude/croissance/croissance.xlsx")
> View(croissance)
> wilcox.test(reponse~traitement, data = croissance)
```

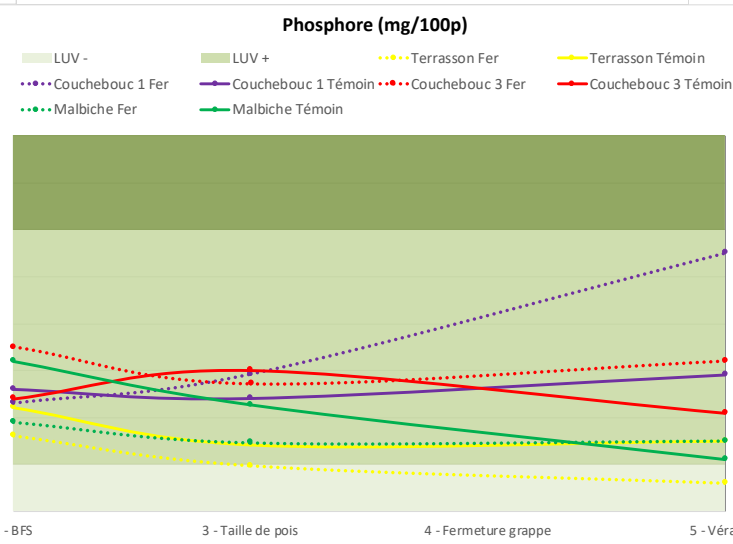
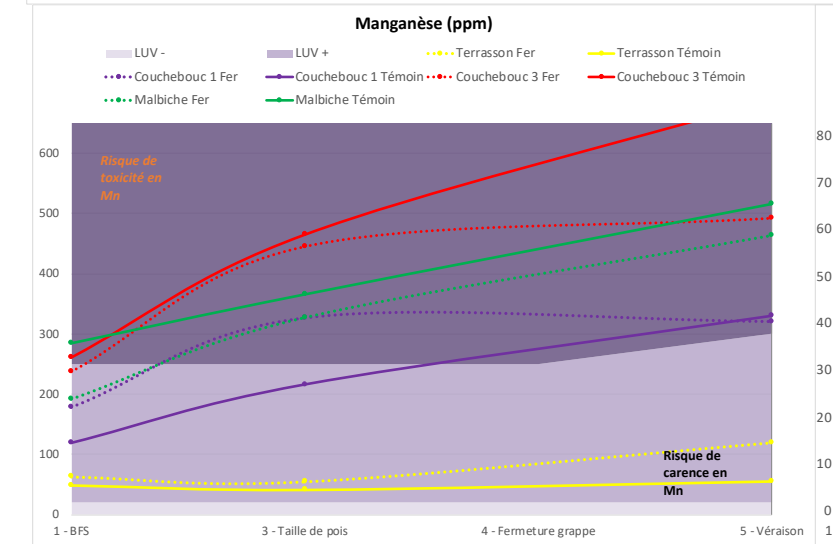
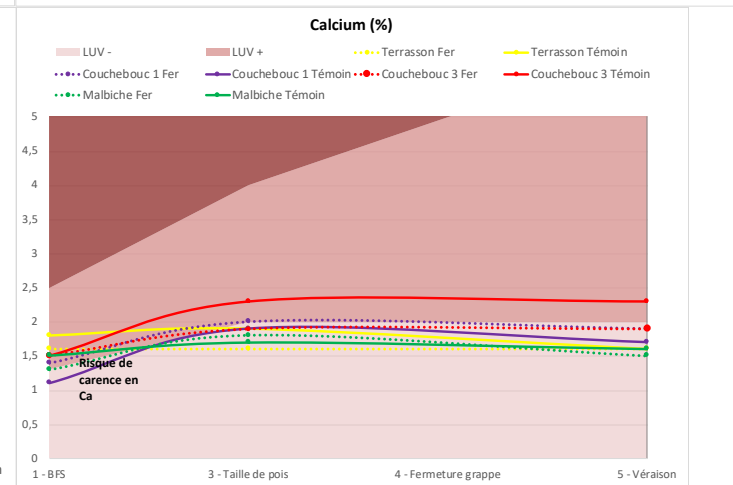
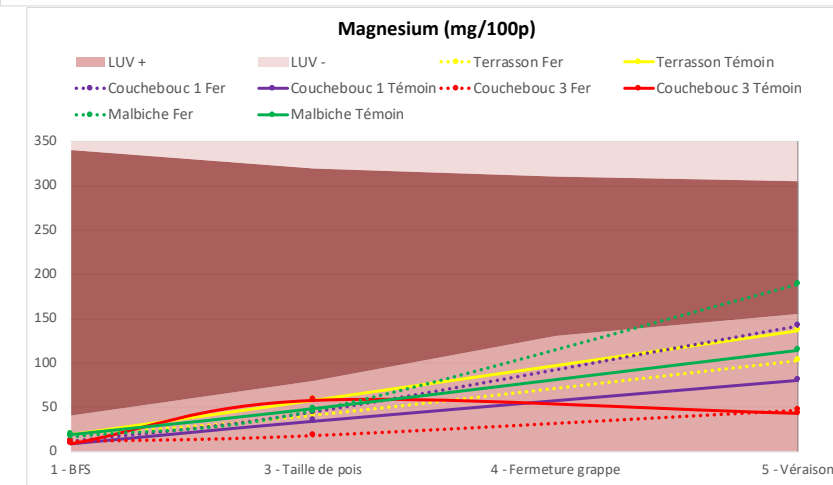
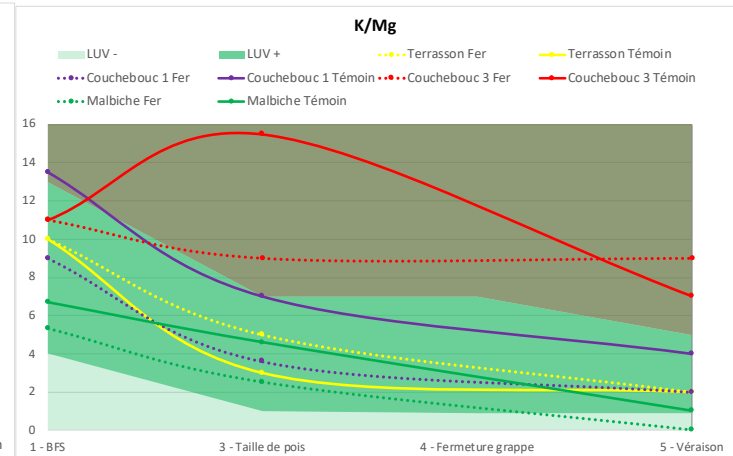
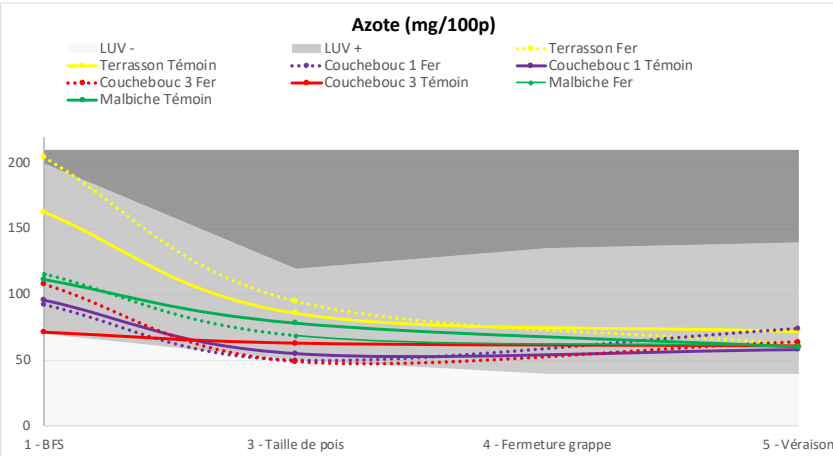
Wilcoxon rank sum test with continuity correction

```
data: reponse by traitement
W = 711, p-value = 0.01388
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

ANNEXE 3 : Coûts de l'ensemble des traitements réalisés sur le parcellaire en conventionnel hors traitement fer et traitement magnésium

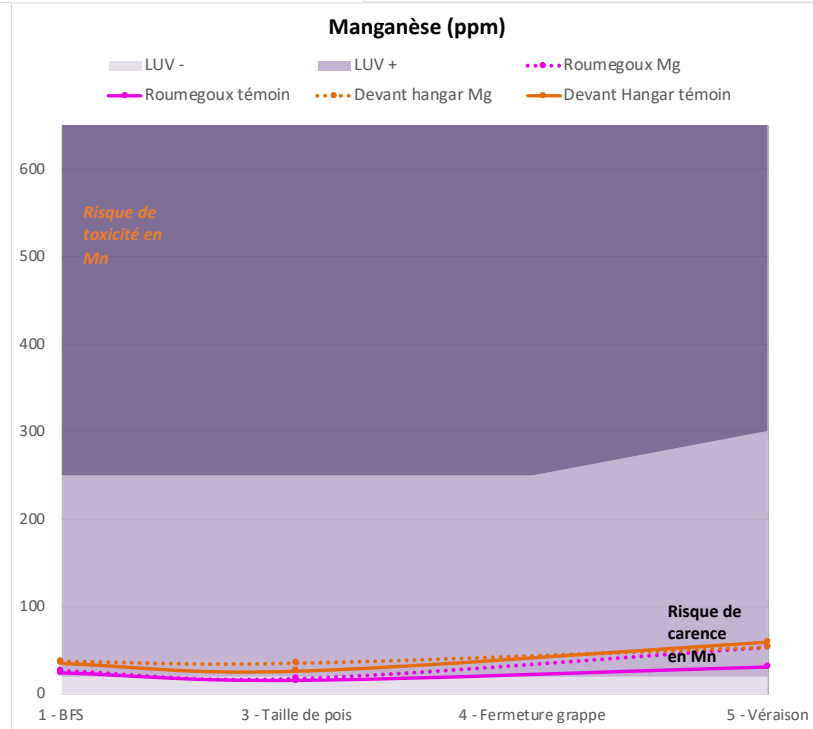
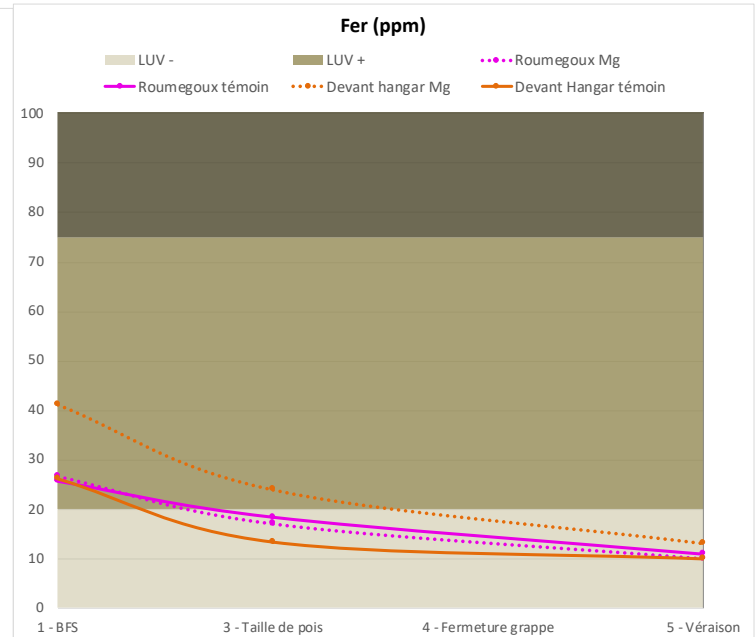
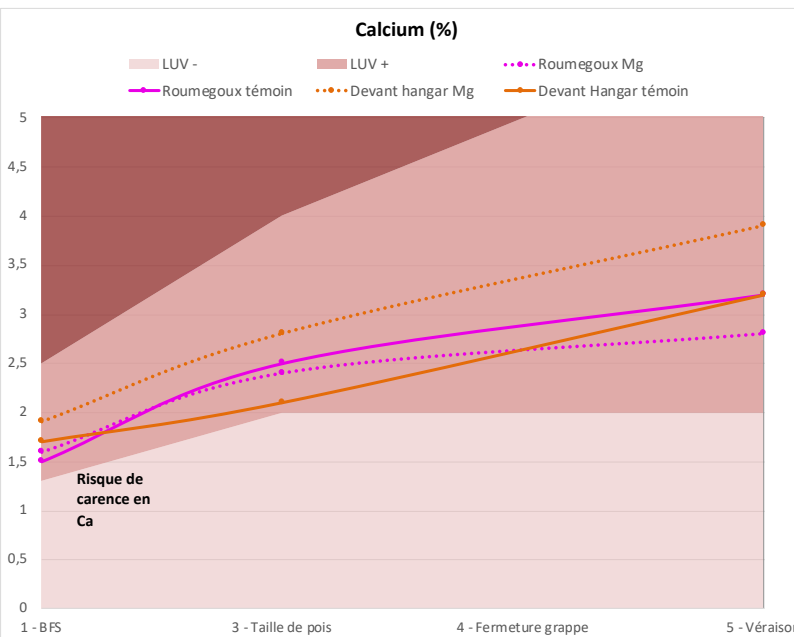
Date	Surface traitée GPS (ha)	Cible	Produit commercial	Dose/ha appliquée (kg ou L)	Quantité totale (kg ou L)	Prix unitaire (en euros)	Prix total (en euros)
16-avr.	551,8	Mildiou	Etonan	1,5	828	10	8277,6
24-juin	551,8	Mildiou	BBRSR	0,4	221	4,75	1048,496
16-avr.	551,8	Oïdium	Sulbari	3	1656	0,98	1622,4096
25-avr	551,8	Mildiou	Etonan	2	1104	10	11036,8
25-avr	551,8	Mildiou	Polyram	1	552	9	4966,56
25-avr	551,8	Oïdium	Sulbari	3	1656	0,98	1622,4096
05-mai	551,8	Mildiou	Etonan	3	1656	10	16555,2
05-mai	551,8	Mildiou	Polyram	2	1104	9	9933,12
05-mai	551,8	Oïdium	Dynali	0,5	276	18,4	5076,928
19-mai	551,8	Mildiou	Zorvec Zelavin	0,4	221	55	12140,48
19-mai	551,8	Mildiou	Vantaro	2,4	1324	18,4	24369,2544
19-mai	551,8	Mildiou	Etonan	2	1104	10	11036,8
19-mai	551,8	Oïdium	Karamat pro	1,5	828	6,16	5099,0016
26-mai	220,0	Flavescence dorée	Klartan max	0,2	44	6,16	271,04
30-mai	551,8	Mildiou	Polyram	2	1104	9	9933,12
30-mai	551,8	Mildiou	Redeli	2,5	1380	8,5	11726,6
30-mai	551,8	Oïdium	Algebre	0,2	110	66,45	7333,9536
30-mai	551,8	Flavescence dorée	Klartan max	0,2	110	63	6953,184
10-juin	551,8	Oïdium	Sulbari	3	1656	0,98	1622,4096
10-juin	551,8	Mildiou	Amaline flow	2,8	1545	18,4	28430,7968
10-juin	551,8	Mildiou	Redeli	2,5	1380	8,5	11726,6
24-juin	551,8	Mildiou	BBRSR	1	552	4,75	2621,24
24-juin	551,8	Oïdium	Vitisan	6	3311	7,35	24336,144
24-juin	551,8	Vers de grappes	Proclaim	1,5	828	19,39	16050,2664
						TOTAL	233790

# ANNEXE 4 : Assimilation des autres éléments non présentés ultérieurement pour les parcelles de fer





# ANNEXE 5 : Assimilation des autres éléments non présentés ultérieurement pour les parcelles de magnésium



## ***Étude de l'impact de traitement de Magnésie et de Fer sur la physiologie de la vigne, son rendement et sa qualité***

### Résumé :

Le fer et le magnésium sont au cœur de nombreux processus métaboliques (photosynthèse, synthèse de sucres etc.) qui sont directement liés au développement et à la croissance du végétal. Ainsi, des carences dans ces deux éléments peuvent être néfastes pour le bon fonctionnement du végétal.

C'est dans une volonté d'augmentation des rendements, des qualités organoleptiques des vins mais aussi pour que le végétal ait une bonne longévité et des performances optimales tout au long de son existence que ces deux expérimentations ont été réalisées.

Les résultats du traitement au fer sont particulièrement encourageants notamment sur le Cabernet Sauvignon. En effet, ce traitement a permis une augmentation de la surface foliaire, du rendement et de la qualité du raisin. En revanche, les résultats pour le Merlot sont trop disparates, surtout concernant la qualité.

Pour le traitement au magnésium, les résultats sont moins évidents. Le magnésium étant peu mobile dans le sol, les résultats peuvent mettre plus de temps à se dessiner. L'étude reste donc à poursuivre les prochaines années pour constater d'un effet potentiel.

## ***Study of the impact of Magnesium and Iron treatment on the physiology of the vine, its yield and quality***

### Abstract :

Iron and magnesium are responsible for many metabolic processes (photosynthesis, synthesis of sugars, etc.) which are directly linked to the development and growth of plants. Deficiencies in these two elements however, can be detrimental to the proper functioning of the plant. These two experiments were carried out in order to increase yields, ameliorate the organoleptic qualities of wines and to also ensure that the plant has good longevity and optimal performance throughout its life cycle. The results of the iron treatment are particularly encouraging, especially on Cabernet Sauvignon. This treatment allowed an increase in leaf area, yield and grape quality. On the other hand, the results for Merlot are too contrasting, especially concerning the quality. For the magnesium treatment, the results are less obvious. Since magnesium is not very mobile in the soil, the results may take longer to appear. The study therefore remains to be continued over the next few years to see a potential effect.



***Pour citer ce document : Sicard, Coline (2020). Étude de traitement de Magnésie et de Fer sur la physiologie de la vigne, son rendement et sa qualité. Mémoire de fin d'études. Diplôme d'ingénieur agronome, spécialisation Viticulture et Œnologie, Montpellier SupAgro. 29 p.***

***Montpellier SupAgro, Institut National d'études supérieures agronomiques de Montpellier, 2 place Pierre Viala F 34060 MONTPELLIER cedex 2.***

