



HAL
open science

Assimilation et effets d'apports foliaires de phosphore et de calcium sur l'équilibre minéral de parcelles de vignes du Languedoc-Roussillon

Nadège Goëbau

► **To cite this version:**

Nadège Goëbau. Assimilation et effets d'apports foliaires de phosphore et de calcium sur l'équilibre minéral de parcelles de vignes du Languedoc-Roussillon. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-01869965

HAL Id: dumas-01869965

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01869965>

Submitted on 7 Sep 2018

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

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

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE



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

**Assimilation et effets d'apports foliaires
de phosphore et de calcium sur l'équilibre minéral
de parcelles de vignes du Languedoc-Roussillon**

par
Nadège GOËBAU

Année de soutenance : 2017

Organisme d'accueil : Société de Recherche et de Développement Viticole (SRDV)

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE



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

**Assimilation et effets d'apports foliaires
de phosphore et de calcium sur l'équilibre minéral
de parcelles de vignes du Languedoc-Roussillon**

par
Nadège GOËBAU

Mémoire préparé sous la direction de :
Anne Pellegrino

Organisme d'accueil :
Société de Recherche et de Développement
Viticole (SRDV)

Présenté le :
03/11/2017

Maître de stage :
Guillaume Desperrières

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Guillaume Desperrières, mon maître de stage. Je le remercie pour son aide considérable au quotidien et sa patience. Il a su me guider et m'accompagner tout en partageant son expérience. Ses nombreux et détaillés conseils ont été une aide plus que précieuse dans l'avancée de ce travail. J'ai pu apprendre énormément en méthodologie, synthèse bibliographique et structure du raisonnement grâce à ses remarques. Je lui suis également très reconnaissante pour l'entière confiance qu'il m'a accordée dans toutes les tâches réalisées.

J'adresse mes sincères remerciements à Matthieu Dubernet pour m'avoir accueillie au sein de la SRDV et des Laboratoires Dubernet.

Je remercie Anne Pellegrino, ma tutrice, pour avoir été disponible afin de m'apporter ses conseils.

Merci à toute l'équipe Dubernet pour leur écoute, leur aide et leurs nombreux conseils: Nicolas, Damien, Benoît, Tatiana, Cathy, Albane, Sylvain, Fanny, Victor, François, Vincent, Katia, Corinne, Sandrine, Françoise, Perrine, Clarice, Amélie, Frédéric et Julie.

Merci à toute l'équipe des Laboratoires Dubernet pour leur écoute, leur disponibilité, leur patience et leurs réponses face à mes différentes interrogations.

Je remercie les ingénieurs conseils CICOVI : Jérôme Fil, Jean-Dominique Fourment et Coline Siegel et les ingénieurs conseils Natoli : Stéphanie et Fabien de m'avoir permis de les accompagner afin de partager leur passion et leur expérience du terrain.

Je tiens également à remercier Laurent Torregrosa pour ces conseils et son aide ainsi que Philippe Abbal pour ces après-midi enrichissantes.

Merci aux viticulteurs pour leur disponibilité lorsque je les ai sollicité.

Je remercie Guillermina Van Houten qui a été à mes côtés tout au long de ce stage et dont les nombreuses discussions m'ont été d'une grande aide.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail de près ou de loin par leur aide, leur conseil et leur soutien.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	2
II. La nutrition minérale	
1. Les éléments essentiels	
2. Assimilation	3
3. La fertilisation	4
III. Le phosphore	5
1. Disponibilité et besoins en phosphore	
2. Assimilation et transport du phosphore	
3. Rôle	6
IV. Le calcium	7
1. Disponibilité et composition de la plante en calcium	
2. Assimilation et transport du calcium	8
3. Rôle du calcium	9
4. Carence et toxicité pour la plante	12
5. Fertilisation	
PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	14
MATÉRIELS ET MÉTHODES	15
I. Dispositif expérimental	
1. Parcelles étudiées	
2. Modalités testées	
II. Mesures	16
1. Suivi des conditions météorologiques	
2. Caractéristiques agronomiques	
3. Caractérisation de la phénologie de la vigne	
4. Caractérisation de la vigueur et du rendement	
5. Mesures expérimentales	17
6. Echantillonnage	18
7. Homogénéité	
8. Analyses statistiques	19
RESULTATS	20

I. Caractérisation du millésime 2017	
1. Un hiver doux et pluvieux	
2. Des accidents climatiques : le gel	
3. Un printemps et un été chauds et secs	
II. Composition minérale des pétioles et des limbes	21
1. Phosphore	
2. Calcium	
III. Indicateurs physiologiques et œnologiques	22
1. Phosphore	
2. Calcium	
DISCUSSION	24
I. Phosphore	
II. Calcium	25
III. Limites de l'étude et pistes d'amélioration	26
CONCLUSION	27
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	28

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1 : Evolution des TAV de 1984 à 2016, moyennes des vins finis dans la zone des Laboratoires Dubernet (Languedoc-Roussillon). Source : Laboratoires Dubernet

Figure 2 : Evolution des pH de 1984 à 2016, moyennes des vins finis dans la zone des Laboratoires Dubernet (Languedoc-Roussillon). Sources : Laboratoires Dubernet

Figure 3 : Collaborateurs et associés de la SRDV.

Figure 4 : Carte du vignoble du Languedoc-Roussillon © www.la-wine-ista.com

Figure 5 : Relation entre la teneur en élément et le rendement en biomasse. (Medici, 2016)

Figure 6 : Quantités d'éléments dans les feuilles au cours du cycle de la vigne. (Champagnol, 1984)

Figure 7 : Exemple d'évolution des principaux éléments minéraux du cépage Riesling. (Deloire, 2007)

Figure 8 : Effet du pH du sol sur la disponibilité des nutriments pour la vigne (Truog, 1947)

Figure 9 : Transport des minéraux dans la plante (Medici, 2016)

Figure 10 : Évolution de la taille et de la couleur des baies, des composés et du sucre accumulés et du fonctionnement du xylème et du phloème dans la baie. (Coombe et McCarthy, 2000)

Figure 11 : Composition minérale des principaux organes de la vigne au différents stades pour du Chenin blanc sur 99R. (F/N : floraison/nouaison, V : véraison, M : maturation) (D'après Conradie, 1980)

Figure 12 : Accumulation du calcium dans les différents organes pour du Chenin blanc sur 99R et dans un sol sableux. (Conradie, 1980)

Figure 13 : Accumulation du calcium dans la baie (Syrah) (Rogiers et al, 2006)

Figure 14 : Evolution des proportions respectives du calcium pariétal et intracellulaire de la pulpe et de la pellicule au cours du développement du raisin. (Donèche et Chardonnat, 1992)

Figure 15 : Schéma de la structure de la pectine montrant le rôle du Ca dans les zones de jonctions entre les chaînes de polysaccharides. (à gauche) (Nunan, 1999) Détail de la structure en "boîte à œufs" (à droite) (Caffall et Mohnen, 2009)

Figure 16 : Schéma récapitulatif des rôles du calcium sur la vigne.

Figure 17 : Symptôme de carence en calcium sur la vigne. © VEGEDIAG Expert

Figure 18 : Schéma récapitulatif du contexte et des problématiques soulevées

Figure 19 : Localisation des parcelles pour les essais phosphore et calcium. © Google 2017

Figure 20 : Relation entre le TAP et la densité pour le tri des baies

Figure 21 : Schéma du rhéomètre Pénélaup. (Robin et al., 1997)

Figure 22 : Cumul des pluies sur les trois dernières années. (Station de Ferrals-les-Corbières)

Figure 23 : Pluviométrie - écarts à la normale (moyenne des 30 dernières années) de 2011 à 2017 (en noir). (Station de Ferrals-les-Corbières)

Figure 24 : Somme des températures à partir du 1er mars. (Station Ferrals-les-Corbières)

Figure 25 : Températures - écarts à la normale (moyenne des 30 dernières années) de 2011 à 2017. (Station de Ferrals-les-Corbières)

Figure 26 : Résultats $\Delta 13C$ des analysés sur les cinq parcelles.

Figure 27 : Suivi hydrique de la parcelle de Viognier. Source : Cicovi

Figure 28 : Assimilation du phosphore (en mg/100 pétioles) sur la saison sur les parcelles de l'essai phosphore.

Figure 29 : Quantités de phosphore contenues dans les limbes (en mg/100 limbes) sur les parcelles de l'essai phosphore.

Figure 30 : Assimilation du calcium (en % de MS) sur la saison sur les 3 parcelles étudiées et pour les 4 modalités.

Figure 31 : Teneur en calcium (en % de MS) dans les limbes sur les 3 parcelles étudiées et pour les 4 modalités.

Figure 32 : Moyennes des valeurs de LAI mesurées sur la parcelle Grand Merlot.

Figure 33 : Quantités de phosphore contenues dans les baies (en mg/L) sur la parcelle de Grand Merlot.

Figure 34 : Résultats du classement des modalités après comparaison multiple par paire pour la fermeté des baies sur les trois parcelles étudiées.

Figure 35 : Quantités en g/L d'acide gluconique, de glycérol et d'acide citrique mesurées à maturité dans les moûts de Viognier.

Figure 36 : Teneur en calcium (mg/L) dans les baies sur les 3 parcelles étudiées et pour les 4 modalités.

Figure 37 : TAVP (%vol.) dans les baies sur les 3 parcelles étudiées et pour les 4 modalités.

Tableau 1 : Quantités d'éléments absorbées par la vigne (Champagnol, 1984 ; Delas, 2000)

Tableau 2 : Interactions des éléments au niveau de l'absorption racinaire. (+ synergie, - antagonisme) (Champagnol, 1984; Christensen, 2005)

Tableau 3 : Le phosphore au niveau du sol. (Crespy, 2005; Bertoni, 2011)

Tableau 4 : Caractéristiques des parcelles pour les essais phosphore et calcium.

Tableau 5 : Modalités de l'essai phosphore

Tableau 6 : Modalités de l'essai calcium

Tableau 7 : Composition et doses des engrais foliaires utilisés.

Tableau 8 : Seuils pour l'interprétation des analyses pétiolaires (selon Robinson et al., 1997, Goldspink et Howes, 2001)

Tableau 9 : Analyses individuelles effectuées sur le moût, à véraison.

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Protocole de prélèvement de terre pour les analyses de sol
- Annexe 2 : Résultats des analyses de sol sur les parcelles de l'essai phosphore
- Annexe 3 : Résultats des analyses de sol sur les parcelles de l'essai calcium
- Annexe 4 : Les principaux stades phénologiques de la vigne selon Baggiolini (lettres) et Eichhorn et Lorentz (chiffres). Source : IFV
- Annexe 5 : Protocole d'utilisation de l'application smartphone VitiCanopy
- Annexe 6 : Protocole de prélèvement pétiolaire
- Annexe 7 : Principe du spectromètre d'émission atomique ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) et MP-AES (New Microwave Plasma-Atomic Emission Spectrometer)
- Annexe 8 : Principe du spectromètre proche infra-rouge : NIRSystem 6500
- Annexe 9 : Protocole de prélèvement de baies
- Annexe 10 : Principe de l'IRTF : WineScan FT 120 de la société FOSS electric
- Annexe 11 : Protocole de tri densimétrique des baies
- Annexe 12 : Eléments minéraux dans les pétioles - Essai phosphore
- Annexe 13 : Eléments minéraux dans les limbes - Essai phosphore
- Annexe 14 : Eléments minéraux dans les pétioles - Essai calcium
- Annexe 15 : Eléments minéraux dans les limbes - Essai calcium
- Annexe 16 : Analyses statistiques sur le développement végétatif - Essai phosphore
- Annexe 17 : Analyses statistiques sur la LAI et la porosité - Essai phosphore
- Annexe 18 : Analyse de la composition des moûts - Essai phosphore
- Annexe 19 : Analyses statistiques sur la fermeté des baies - Essai calcium
- Annexe 20 : Analyse de la composition des moûts - Essai calcium

LISTE DES ABRÉVIATIONS

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

LEXIQUE

ALIMENTATION DE LA VIGNE : ne pas confondre alimentation qui est l'apport fait à la plante comme la fertilisation et la nutrition qui est ce que la plante utilise pour se développer. (Champagnol, 1984)

RHÉOMÈTRE : appareil permettant de mesurer la rhéologie

RHÉOLOGIE : étude de la déformation et du flux de la matière (Barnes et al., 1989)

*Les termes décrits ici sont signalés dans le texte par **

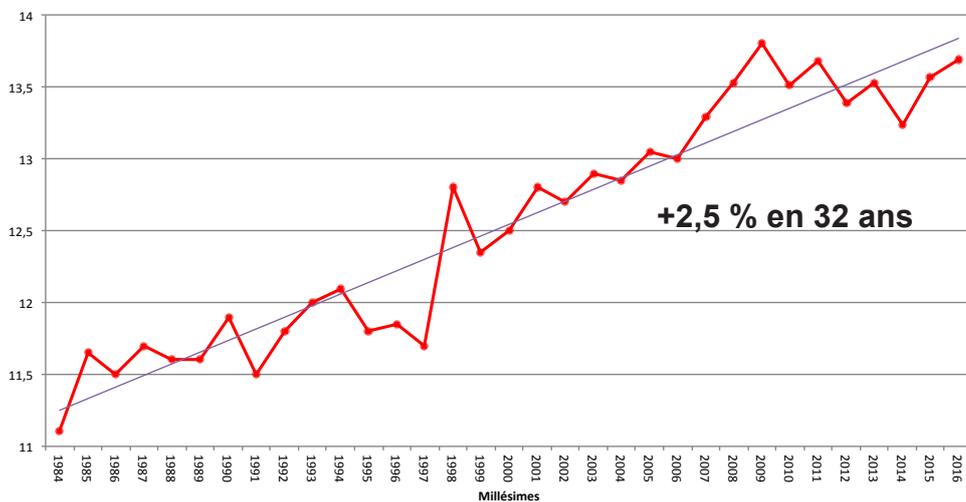


Figure 1 : Evolution des TAV de 1984 à 2016, moyennes des vins finis dans la zone des Laboratoires Dubernet (Languedoc-Roussillon). Source : Laboratoires Dubernet

Figure 2 : Evolution des pH de 1984 à 2016, moyennes des vins finis dans la zone des Laboratoires Dubernet (Languedoc-Roussillon). Sources : Laboratoires Dubernet

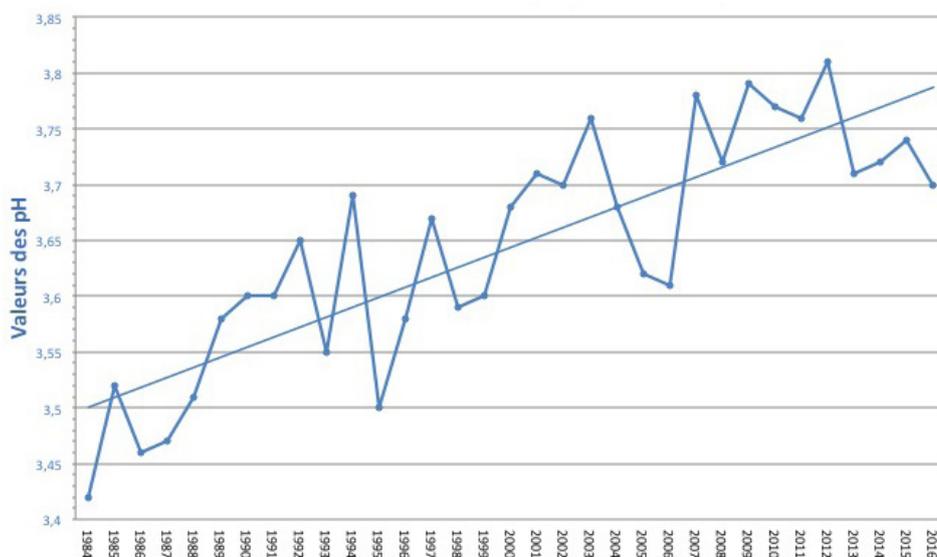


Figure 3 : Collaborateurs et associés de la SRDV.

INTRODUCTION

Le vignoble du Languedoc-Roussillon est le plus grand vignoble français par sa superficie avec 244 698 ha en 2013/14. Il se répartit sur 4 départements : Pyrénées-Orientales, Aude, Hérault et Gard. (FranceAgriMer, 2014) Sa surface est aujourd'hui stable mais la région a subi de profondes crises depuis les années 80, où la surproduction a conduit à une campagne d'arrachage et une modification des pratiques. La surface s'est réduite de 40% et les volumes produits d'environ 60% depuis la fin des années 70 (Aigrain et al., 2013). La reconnaissance de la qualité de ce vignoble s'est faite grâce aux innovations que des viticulteurs ont osé (Garcia-Parpet, 2007). Aujourd'hui, dans un contexte d'évolution du rendement et du climat, ils sont confrontés à une augmentation du pH et du TAV (Figures 1 et 2). Ainsi, les vigneronnes sont de plus en plus demandeurs d'outils d'aide à la décision pour adapter les pratiques et apporter des réponses aux nouvelles problématiques liées au réchauffement climatique et à la limitation des intrants.

La gestion des produits phytosanitaires et de leurs apports est aujourd'hui de plus en plus fine. Pourtant, bien que la santé de la vigne passe d'abord par son alimentation*, la gestion de la fertilisation est restée relativement basique devenant le premier poste économisé. Outre l'azote, les autres éléments nutritifs sont donc moins pris en considération. Pourtant, que ce soit au sol ou en foliaire, la fertilisation permet d'obtenir un bon équilibre minéral tout au long du cycle afin d'obtenir des raisins puis des moûts de qualité.

Face à ce constat, la SRDV (Société de Recherche et Développement Viticole) a été créée à partir de l'association de quatre sociétés de conseil agronomiques et/ou œnologiques dont deux sont des laboratoires d'analyse (Figure 3). L'objectif est de mieux connaître les mécanismes et l'état de nutrition minérale de la plante afin d'ajuster les stratégies culturales pour répondre aux problèmes rencontrés à la vigne et à la cave. Pour cela, un réseau de parcelles de référence permet un suivi du millésime et des essais apportent des réponses concrètes sur les éléments minéraux. Durant la saison, le conseil agro-œnologique s'appuie sur un outil d'aide à la décision : l'analyse pétiolaire qui est un indicateur de la dynamique d'absorption des nutriments par la plante. En fin de saison, des analyses de limbes, de moûts et vins puis de sarments complètent la vision d'ensemble pour ajuster les préconisations.

Si pendant longtemps on s'est intéressé aux éléments N, K et Mg pour l'équilibre de la vigne, ce fût au détriment des autres éléments dont les symptômes engendrés par des carences ou des excès de ces éléments sont rares. (Crespy, 2005) Aujourd'hui, c'est encore le cas pour le phosphore et le calcium pour lesquels peu d'études permettent aujourd'hui de connaître les besoins et leur assimilation par la vigne afin de gérer au mieux leurs apports.

Un essai sur le phosphore a été mis en place l'an dernier dans le but de mieux comprendre l'assimilation du phosphore par la vigne via un apport en fertirrigation. Cette thématique sur le phosphore est reconduite cette année pour définir l'impact d'un apport foliaire de phosphore. En parallèle, une étude sur le calcium permettra de mieux connaître son impact sur la vigne car malgré des effets observés nous manquons de données expérimentales (Delas, 2010).

On cherche donc à définir quand et comment on doit gérer la nutrition en phosphore et en calcium durant le cycle grâce à une meilleure compréhension de leur assimilation et de leur rôle. Ceci dans le but d'apporter des préconisations adaptées en fonction des outils dont nous disposons.

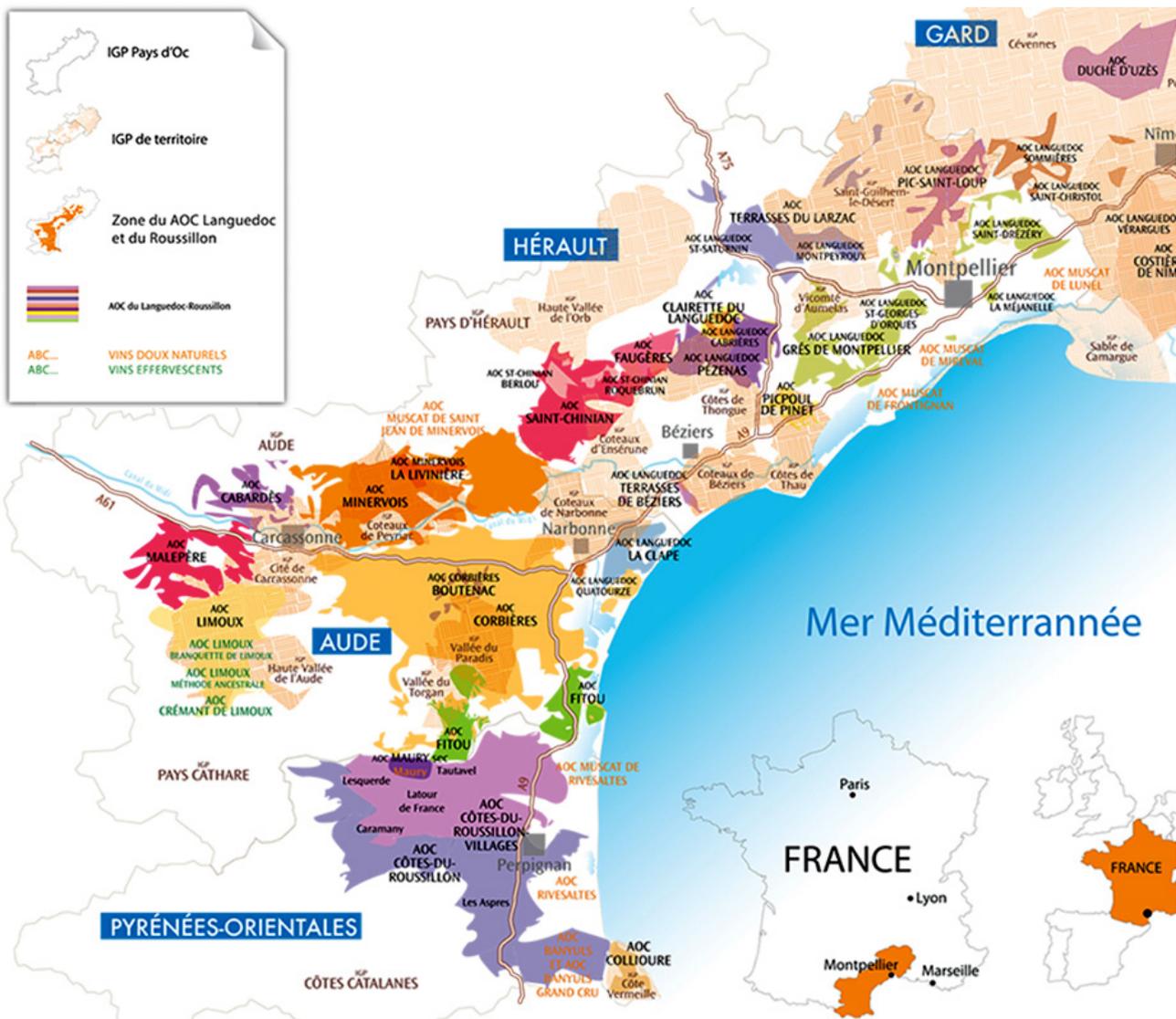
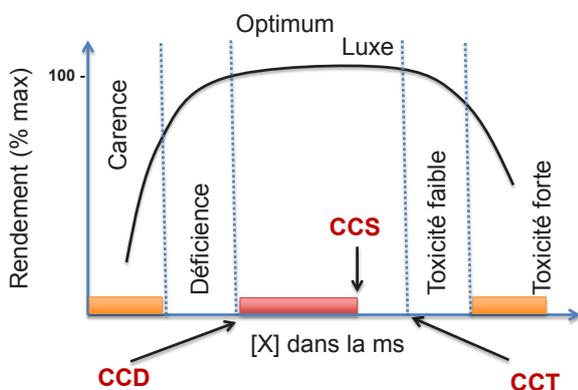


Figure 4 : Carte du vignoble du Languedoc-Roussillon
© www.la-wine-ista.com

Tableau 1 : Quantités d'éléments absorbés par la vigne (Champagnol, 1984 ; Delas, 2000)

ÉLÉMENT	QUANTITÉ ABSORBÉE (kg/ha/an)
N	20-70
P	3-10
K	25-70
Ca	28-130
Mg	6-15
Fe	0,4-0,8
Mn	0,08-0,16
Cu	0,06-0,12
Zn	0,1-0,2
B	0,08-0,15



CCD Concentration critique de Déficience
 CCT Concentration critique de Toxicité
 CCS Concentration critique de Suffisance
 En rouge: la zone entre la CCD et la CCS est la zone favorable à la culture
 En jaune: zones caractérisées par l'apparition de symptômes

Figure 5 : Relation entre la teneur en élément et le rendement en biomasse. (Medici, 2016)

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I. La viticulture du Languedoc-Roussillon (Figure 4)

La région du Languedoc-Roussillon borde la Méditerranée au sud / sud-est et est encadrée par les massifs montagneux des Pyrénées au sud-ouest et des Cévennes au nord. La région offre une grande diversité de terroirs avec des sols de schistes, galets roulés, argilo-calcaires, sables, grès, ... qui se prêtent à la culture de cépages très variés dont les principaux sont : Grenache, Syrah, Mourvèdre, Carignan, Merlot, Cabernet Sauvignon, Chardonnay, Cinsault, Sauvignon, Muscat Petits Grains. La production en 2014 était de 12,4 millions d'hectolitres dont 30% provenant de caves particulières, 77% étant du vin rouge. 40% de la surface est classée en AOP (FranceAgriMer, 2014)

II. La nutrition minérale

Palissy et Lavoisier sont les premiers à apporter des explications quand au rôle des minéraux dans les plantes au XVI^{ème} puis fin XVIII^{ème}. Lorsqu'on abordait le sujet de nutrition des plantes, deux écoles existaient au XVIII^{ème} siècle : ceux qui prônent le travail du sol qui permet une aération et ceux qui prônent l'apport de nutriments via le fumier. On sait aujourd'hui que les deux vont de paire. (Pédro, 2007)

A partir de l'ère industrielle, les engrais se développent, la potasse et l'azote seront les éléments majeurs permettant un meilleur rendement et plus de sucres dans les baies, puis le trio N-P-K deviendra incontournable (Crespy, 2005). La notion de nutrition minérale de la vigne a été largement développée dans "Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale" de Champagnol. Mais depuis cet ouvrage de 1984, peu d'études ont suivi.

1. Les éléments essentiels

a. Composition et besoins de la plante

Une plante est composée au minimum à 90 % de carbone (40-50%), d'oxygène (42-45%) et d'hydrogène (6-7%) en poids sec (Delas, 2007). Mais les éléments minéraux, bien que présents en moindre quantité ne sont pas pour autant moins importants. Si l'un manque l'équilibre de la plante tout entier est modifié, c'est la notion de facteur limitant. Cette notion apparaît dès 1828 avec Carl Sprengel puis Liebig en 1844, l'expliquera par la "loi du minimum". Ainsi, c'est l'élément disponible dans sa quantité minimale par rapport aux besoins de la plante qui limitera sa croissance. Il est alors inutile d'apporter d'autres éléments tant que ce besoin n'est pas satisfait. L'intérêt de connaître les besoins de la plante pour piloter la fertilisation est donc déterminante. (Barroin, 2004) Enfin, une relation existe entre les teneurs en élément et le rendement en biomasse avec des seuils plaçant la plante en déficit, voire carence, ou en toxicité si la quantité en élément est trop faible ou trop importante. Entre ces deux extrêmes, l'optimum correspond au maximum de rendement obtenu. La zone de "luxe" signifie qu'un apport supplémentaire ne donne pas un rendement supérieur et est donc une dépense inutile. (Figure 5)

On évalue les besoins des différents éléments de la plante en fonction des quantités absorbées. (Tableau 1)

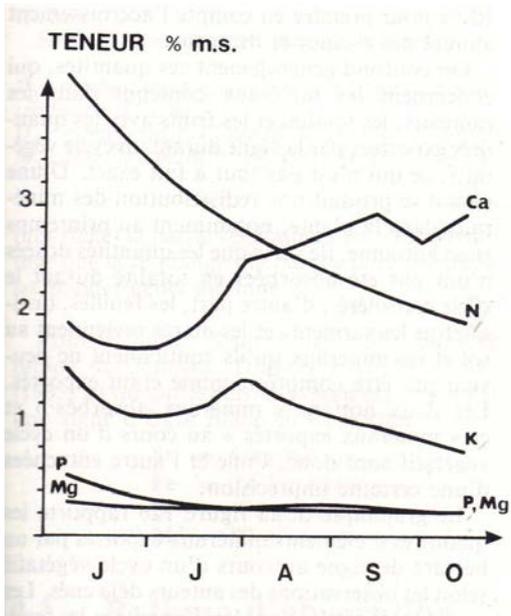


Figure 6 : Quantités d'éléments dans les feuilles au cours du cycle de la vigne. (Champagnol, 1984)

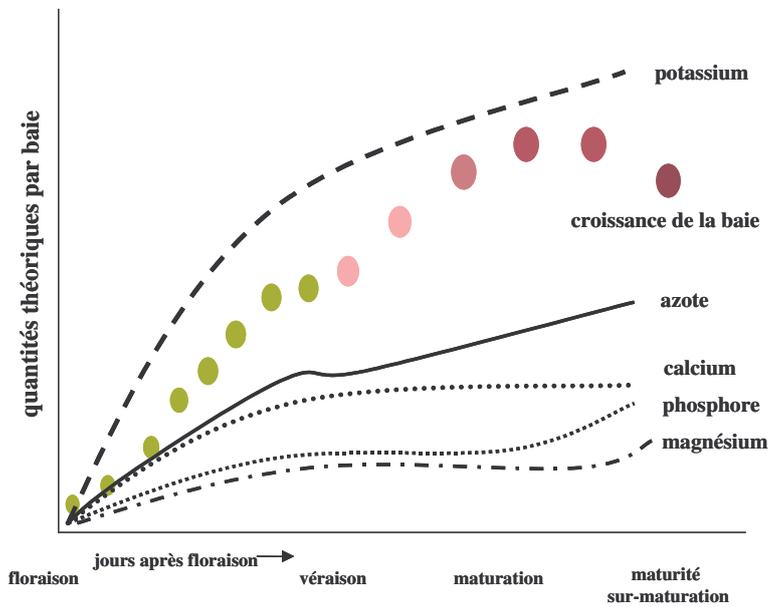


Figure 7 : Exemple d'évolution des principaux éléments minéraux du cépage Riesling. (Deloire, 2007)

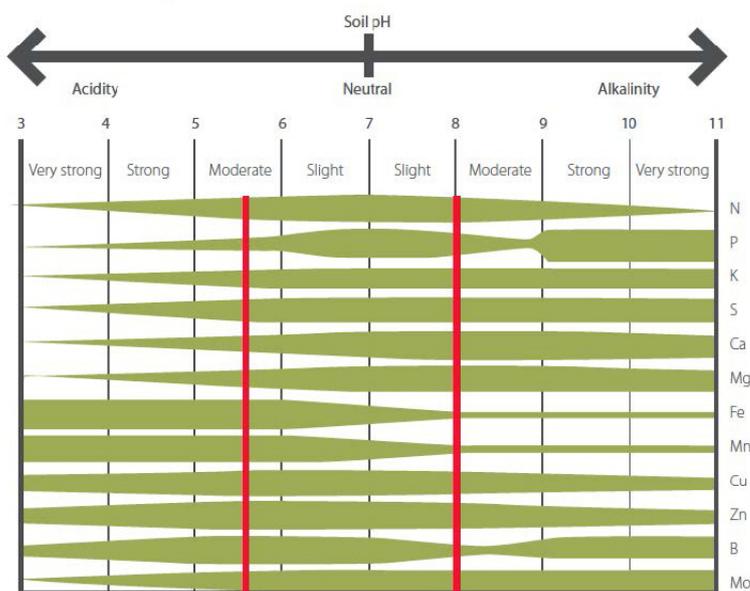


Figure 8 : Effet du pH du sol sur la disponibilité des nutriments pour la vigne (Truog, 1947)
La gamme de pH optimale pour l'assimilation des nutriments se situe entre 5,5 et 8 (en rouge sur le diagramme).

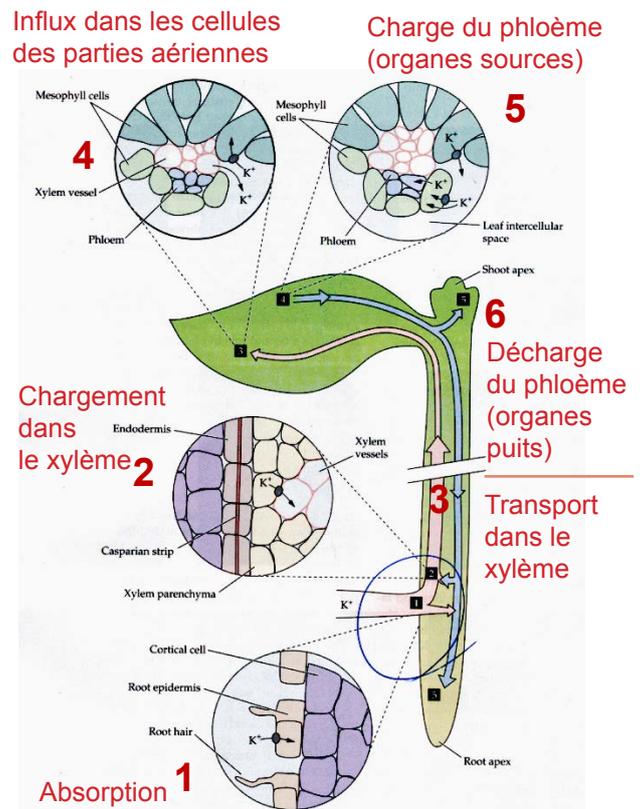


Figure 9 : Transport des minéraux dans la plante (Medici, 2016)

b. Les macroéléments et microéléments

Champagnol (1984) a classé les éléments minéraux en deux catégories selon leur proportion dans la matière sèche :

- les macroéléments : N, P, K, S, Ca et Mg (en kilo par hectare)
- les microéléments : Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo (en gramme par hectare)

A cela s'ajoute des éléments non indispensables : Si, Al, Cl, Na à prendre en compte car certains peuvent devenir toxiques. (Champagnol, 1984; Huglin, 1986)

La composition en minéraux a surtout été étudiée dans les limbes. Les pétioles ont une composition légèrement différente avec plus d'azote nitrique (ou nitrate, NO_3^-), plus de K (pour permettre le transport actif), Na, Mg et parfois aussi plus de Ca. Mais ils contiennent moins de N (car faible activité nitrate réductase), P, S, Mn, Fe. (Champagnol, 1984) Ces teneurs varient selon le cépage, le sol, le climat et le rendement et évoluent au cours du cycle en fonction des stades et donc des besoins. Par exemple, à partir de la nouaison :

- dans les feuilles : N, P, K diminuent / Ca, Mg, Fe augmentent (Figure 6)
- dans les baies : N, K augmentent / Ca, Mg diminuent ou stagnent (Figure 7)

La vigne est relativement riche en Ca et en K en comparaison à la moyenne des végétaux.

Dans la plante, les éléments se trouvent sous différentes formes en fonction de leur rôle. L'azote et le soufre sont constitutifs des molécules carbonées. Le phosphore a un rôle prépondérant dans le stockage de l'énergie. Les éléments K, Ca, Mg, Cl et Mn sont sous la forme ionique. Fe, Cu, Zn, Mo et Ni interviennent dans les réactions red-ox. (Champagnol, 1984)

2. Assimilation

L'assimilation des éléments n'intervient pas dès le début du cycle. La plante mobilise d'abord ses réserves du débourrement jusqu'à ce que les racines soient prêtes à prendre le relais, soit avant la floraison. L'assimilation dépend alors de l'absorption racinaire.

L'absorption varie au cours du cycle mais aussi pendant la journée, en lien avec l'absorption d'eau. Elle est donc corrélée à la croissance et à l'énergie reçue (donc au rythme journalier/saisonnier et à la transpiration). (Champagnol, 1984; Medici, 2016)

a. Absorption racinaire

Aujourd'hui, on sait que la nutrition ne suffit pas : de bonnes conditions au niveau du sol sont nécessaires pour que les nutriments puissent être assimilés par la plante telles qu'une humidité et une aération. (Pédro, 2007) Ainsi, la disponibilité des éléments minéraux est conditionnée par différents facteurs dont :

- la profondeur de sol
- la disponibilité en eau
- la MO
- la texture du sol
- le pH du sol (Figure 8)
- la porosité et l'aération

C'est le système sol-plante-atmosphère qui doit être pris en compte.

Par exemple, au niveau du sol, la CEC permet de fixer des cations et la MO augmente cette capacité à échanger des cations. Certains éléments sont fixés plus fortement et ne sont plus échangeables. C'est le cas notamment pour le potassium qui peut être rétrogradé, c'est-à-dire retenu entre les feuillets d'argile et devenir non-échangeable. (Huglin, 1986)

D'une manière générale, les éléments sont absorbés au niveau des racines puis chargés dans le xylème qui les acheminent vers les parties aériennes. (Figure 9) Les

systèmes de transport sont différents selon les éléments et souvent spécifiques. (Medici, 2016) L'absorption peut être améliorée par la plante avec le développement d'une symbiose plante-champignon : les mycorhizes. Le champignon apporte de l'eau et des éléments minéraux à la plante grâce au réseau d'hyphes qui permet une exploration démultipliée du sol. En échange, le champignon puise des molécules carbonées. Attention cependant aux excès d'intrants qui diminuent la formation de mycorhizes. (Delas, 2010)

b. Absorption foliaire

Une partie des minéraux apportés en engrais foliaires peuvent pénétrer la plante via les feuilles mais ces mécanismes sont peu connus. Ils doivent alors passer la cuticule hydrophobe puis la membrane plasmique. La voie stomatique est plus favorable à l'absorption. La pénétration est facilitée chez les jeunes feuilles étant donnée leur cuticule plus fine et leur nombre de stomates plus importants. (Delas, 2010)

c. Remobilisation

Les minéraux peuvent être remobilisés des organes sources vers les organes puits de la plante via le phloème. C'est le cas pour l'azote et le phosphore lors de la mobilisation des réserves. Bien que les apports de K et Mg sont, eux, liés à l'absorption ils sont aussi remobilisés plus tard dans la saison pour aller vers les baies. (Schreiner et al., 2006)

Si l'on se concentre sur la maturation de la baie, on observe un basculement à véraison. (Figure 10) En effet, le xylème périphérique de la baie perd sa fonction, les minéraux ne sont plus acheminés que par le phloème. Les minéraux non mobiles et dépendants de l'eau, comme le calcium, ne sont donc plus apportés à la périphérie de la baie. (Medici, 2016)

d. Synergies et antagonismes

Les éléments interagissent entre eux au niveau de l'assimilation et/ou de la mobilisation. Par exemple, un excès de potassium bloque l'assimilation du calcium et du magnésium en freinant leur absorption. (Crespy, 2005, Huglin, 1986; Gärtel, 1960). Des éléments peuvent aussi être « prioritaires » par rapport à d'autres pour l'absorption. Au niveau des cations, on observe les affinités dans cet ordre : $Ca > Mg > K > NH_4 > Na$. (Champagnol, 1984) Ainsi une fertilisation peut ne pas avoir l'effet escompté, il faut donc prendre en compte ces synergies et antagonismes rassemblées dans le tableau 2.

3. La fertilisation

Une nutrition équilibrée, variée et saine est le premier garant de la santé d'où l'importance de bien gérer la fertilisation. (Crespy, 2005) Les amendements et engrais interviennent dans le développement de la plante, le volume de la récolte et la qualité des vendanges. (Medici, 2016) Déjà, à l'époque romaine, des apports étaient fait au sol pour rééquilibrer les sols et/ou pour améliorer les rendements (potasse). Chez la vigne, une fertilisation adaptée permettrait également à la plante de mieux se défendre contre les ravageurs. (Crespy, 2005)

Pour raisonner la fertilisation, il faut se poser les questions suivantes :

- que met le sol à disposition de la plante ?
- qu'assimilent les tissus de la vigne ?
- quand et comment doivent-être fait les apports ?

La fertilisation doit permettre d'éviter les carences sans être dans l'excès.

Tableau 3 : Le phosphore au niveau du sol.
(Crespy, 2005; Bertoni, 2011)

	Sol
Concentrations	0,1 à 1 ‰ de MS 0,001 à 1 mmol/L de solution du sol
Formes du P	<p>P peu soluble :</p> <ul style="list-style-type: none"> - phosphate de Ca (sol neutre) - phosphate d'Al et de Fe (sol acide) - adsorbé sur les hydroxydes de Fe et Al - P organique <p>P soluble :</p> <ul style="list-style-type: none"> - P organique (=20-70% du P total)
Forme disponible pour la plante	$H_2PO_4^- / HPO_4^-$
Limitations à la solubilisation	<ul style="list-style-type: none"> - acidité - ions Al^{3+}, Fe^{3+} => précipitation sous la forme phosphate d'aluminium et phosphate de fer (jusqu'à pH 6) - ions Ca^{2+} => précipitation sous le forme phosphate tricalcique (à partir de pH 7,5) - en sol calcaire le phosphore est rétrogradé et devient définitivement insoluble, cela est accentué par un faible taux de MO (<2%)

III. Le phosphore

Le phosphore est un élément chimique non métallique et un nutriment primaire.

1. Disponibilité et besoins en phosphore

a. Dans le sol (Tableau 3)

Le phosphore se trouve, au niveau du sol, sous des formes principalement peu solubles. Le phosphore est rarement insuffisant dans le sol mais la solution du sol en manque parfois par rapport à la concentration dans la phase solide. Pour un besoin de 5 à 20 μM des cellules, la quantité de phosphore assimilable par la plante dans le sol n'est que de 0,1 à 10 μM . (Crespy, 2005) En effet, le phosphore est fortement retenu au niveau du sol. Par exemple, la concentration en calcium influe sur la quantité de phosphore disponible car il fixe les phosphates, de même que le fer et l'aluminium, le rendant indisponible pour la plante. Le phosphore est très peu mobile dans le sol : l'ion H_2PO_4^- est entraîné par des flux de convection il se déplace donc de quelques centimètres seulement, ce qui crée des zones appauvries en phosphore autour des racines et réduit encore sa biodisponibilité. (Crespy, 1982)

b. Dans la plante

Les exportations en phosphore lors de la culture de la vigne sont de 15 à 20 unités/an. Les besoins de la plante sont sous la forme P_2O_5^- . La vigne contient les ions phosphore PO_4^{3-} et PO_3^{2-} . (Jean-Yves Cahurel, 2017) La vigne absorbe principalement le phosphate minéralisé et en solution : H_2PO_4^- (puis HPO_4^-) dont la teneur dans le sol est maximale pour les pH 5,5 à 6,5. Pour rendre le phosphate disponible, les microorganismes et les racines de la plante produisent des phosphatases. (Bertoni, 2011) La vigne a de forts besoins en phosphore pendant les divisions cellulaires : croissance des racines (débourrement) et croissance de ses feuilles et ses grappes (de la floraison à la récolte). (Piccin et al., 2016) Cependant, l'impact du phosphore semblent plus importants sur le développement reproductif que sur le développement végétatif. (Skinner et Matthews, 1989)

c. Dans le vin

Dans le vin, on retrouve entre 4 et 300 mg de phosphore par litre. (Crespy, 2005)

2. Assimilation et transport du phosphore

Etant donné la faible disponibilité dans le sol par rapport aux besoins de la plante, la rhizosphère joue un rôle important dans l'assimilation. Ainsi, la plante crée une symbiose avec des champignons : les mycorhizes qui permettent d'augmenter l'absorption de phosphore. De plus, le système racinaire peut acidifier son environnement proche afin de mieux assimiler les éléments. (Mortimer et al, 2005; Cangahuala-Inocente et al., 2011) Dans les vignobles à sol alcalin, la complexation du phosphore (PO_4^-) en oxydes de calcium est augmentée et la disponibilité de phosphore diminue. (White, 2015)

Lors de l'assimilation, le phosphore s'oppose par antagonisme aux éléments suivants: Fe, K, Ca, Cu, Zn. En revanche, il est assimilé en synergie avec le Mg.

Dans la plante, le phosphore a une forte mobilité. Il est absorbé puis transporté dans la plante sous la forme H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} . Le xylème achemine ce phosphore vers les jeunes feuilles puis il est redistribué via le phloème d'un organe à un autre en fonction de la demande et de la disponibilité. Il est stocké sous les formes organiques suivantes :

P inorganique, P organique dans le cytoplasme, phospholipides, phosphoprotéines, ADN et ARN. Lorsque les divisions cellulaires qui ont lieu dans les feuilles et les baies cessent (après la récolte), le phosphore est redistribué vers les organes pérennes : le bois mais surtout les racines qui sont le principal organe de réserve (Piccin et al., 2016)

3. Rôle

a. Dans la plante

Le phosphore a un rôle plastique dans la composition des membranes plasmiques (phospholipides, phosphoprotéines). (Grant et al., 2001) Mais l'acide phosphorique est primordial dans le métabolisme énergétique puisqu'il est constitutif de composés phosphorylés, de nucléotides et de phospholipides membranaires. (Champagnol, 1984) Il a une fonction dans la transmission de l'information génétique puisqu'il participe aux liaisons esters des molécules d'ADN, d'ARN et de ribosomes Il joue un rôle majeur dans le stockage d'énergie (ATP), dans la respiration et dans les synthèses. Ainsi, il influe sur la croissance de la plante. Enfin, le phosphore intervient dans la synthèse et la dégradation de l'amidon grâce aux oses phosphates. (Grant et al., 2001)

Les besoins en P sont particulièrement important aux premiers stades phénologiques, une déficience en début de saison impacte de façon beaucoup plus importante la croissance et le rendement. (Grant et al., 2001) En effet, la prolifération des racines dans l'horizon de surface du sol dépend de la quantité de P disponible. (Morlat et Jacquet, 2003)

Effet carence

Des déficiences apparaissent lors des analyses telles que l'analyse pétioleaire. Cependant les symptômes de carence sont rares et peu visibles. Quelques cas peuvent être observés en sol sableux. Le P impliqué dans les réactions métaboliques n'est pas immédiatement impacté par une déficience en P, la plante puisera sur ses réserves de P inorganique. Les fonctions métaboliques telles que la respiration et la photosynthèse seront réduits qu'en cas de carence importante (Grant et al., 2001)

L'impact d'une déficience sur la plante se limite principalement à la fertilité des bourgeons lors de l'initiation florale (juin) et est donc visible l'année n+1. Une étude de Skinner et Matthews (1989) confirme qu'une déficience en phosphore du sol entraîne un nombre d'initiations florales inférieur mais à cela s'ajoute un nombre de baies moins important et un poids des grappes plus faible l'année n.

En cas de déficience, on remarque un fort pouvoir d'adaptation de la plante pour puiser du P dans le sol par le développement des racines, la modification du pH de la rhizosphère et le développement de mycorhizes. (Grant et al., 2001)

La fertilisation phosphatée doit être finement pilotée car les engrais contiennent des phosphates légèrement plus solubles et s'ils sont apportés en excès cela peut engendrer des pollutions via le ruissellement conduisant à l'eutrophisation des cours d'eau. (Crespy, 2005)

b. Dans le vin

Une étude a montré sur des parcelles de Tannat que le sol qui contenait plus de phosphore entraînait une augmentation de phosphore dans les feuilles et donnait un goût avec des quantités supérieures en polyphénols et en anthocyanes. (Piccin et al., 05/2017)

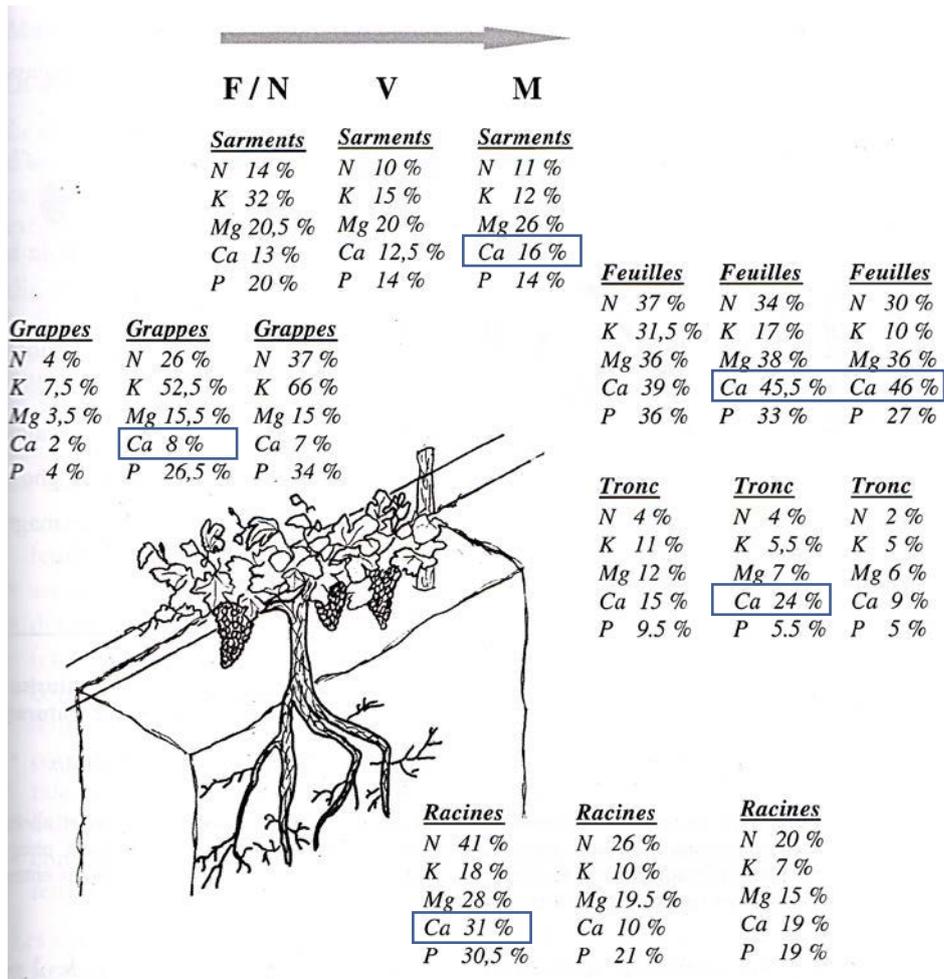


Figure 11 : Composition minérale des principaux organes de la vigne au différents stades pour du Chenin blanc sur 99R. (F/N : floraison/nouaison, V : véraison, M : maturation)
(D'après Conradie, 1980)

IV. Le calcium

Le calcium est un cation métallique faisant partie des 9 macro-éléments nécessaires au développement de la vigne. (Huglin, 1986) Il se trouve dans le sol et dans la plante sous sa forme ionique Ca^{2+} . Son origine est minérale et c'est un nutriment secondaire. Malgré une abondance du calcium dans les sols calcaires, d'après les analyses pétiolaires, la vigne contient souvent de faibles teneurs en cet élément.

1. Disponibilité et composition de la plante en calcium

a. Dans le sol

La disponibilité du calcium présent dans les sols dépend de la composition de la roche mère, des phénomènes d'érosion et de lixiviation, cet élément étant facilement lixivié. (Mengel et Kirkby, 1982) Dans le sol, le calcium (chargé positivement) est fixé par attraction électrostatique sur l'argile et la matière organique (chargées négativement). Le Ca^{2+} est l'ion le plus retenu sur le complexe argilo-humique et occupe la plus grande partie de la CEC (60 à 80%) avec H^+ et Al^{3+} , on le retrouve également dans la solution du sol. Ce calcium est abondant dans les sols calcaires sous la forme CaCO_3 (carbonate de calcium) et CaSO_4 (gypse), en sol acide un amendement peut être fait par chaulage (CaO) ou par apport de gypse. Le calcium peut se lier aux phosphates ou aux sulfates formant des molécules peu solubles. (Champagnol, 1984). Sous forme carbonatée (CaCO_3), il est, pour une faible partie, solubilisé en Ca^{2+} grâce aux pluies. (Verrecchia, 2002)

Les plus forts besoins en calcium sont au début de la formation des fruits et à l'expansion des parties végétatives avec un maximum de besoin à la véraison. (Calmés et Carles, 2014; Lacroix, 1999).

b. Dans la plante

En sol acide, la vigne absorbe en moyenne 28 kg/ha/an et 130 kg/ha/an en sol calcaire. Un dixième de ce calcium se retrouvera dans la vendange. (Champagnol, 1984 ; Delas, 2010) Le calcium représente 1,4% de la matière sèche de la vigne. (Gärtel, 1971) La composition en calcium selon les différents organes de la plante et à différents stades est détaillée dans la figure 11. Jusqu'à véraison, le calcium s'accumule dans les baies, dans les feuilles mais aussi dans le tronc, alors que les racines en contiennent moins par rapport à nouaison. Le calcium est accumulé essentiellement dans les parois cellulaires. (Champagnol, 1984)

Au niveau des racines, le calcium reste dans la vacuole et est peu présent dans le cytoplasme. (Storey et al., 2003) On retrouve essentiellement des cristaux d'oxalate de calcium monohydratés dans les limbes et les pétioles. Ils sont donc éliminés lors de la chute des feuilles. (Calmés et Carles, 2014) La feuille accumule du calcium dans ses cellules alors que les éléments N, P, S, K diminuent. Cela est lié au fait que le calcium n'est pas mobile et n'est donc pas remobilisé. (Champagnol, 1984) La composition en calcium de la feuille est très corrélée à la composition en calcium du fruit dans le cas de la fraise. (Chéour et al., 1990) A noter que le calcium dans la baie de raisin évolue de manière irrégulière avec une variabilité entre les cépages et selon le climat. (Chardonnet, 1995)

Le xylème contient 1 à 5 mM de calcium alors que le phloème en contient 0,1 à 2 mM. (Medici, 2015)

c. Dans le vin

Le vin contient entre 0,03 et 0,2 g/L de calcium.

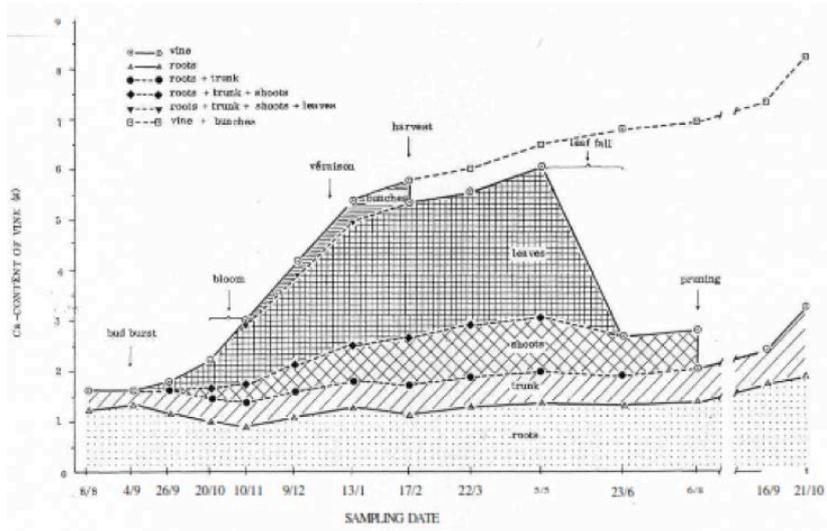


Figure 12 : Accumulation du calcium dans les différents organes pour du Chenin blanc sur 99R et dans un sol sableux. (Conradie, 1980)

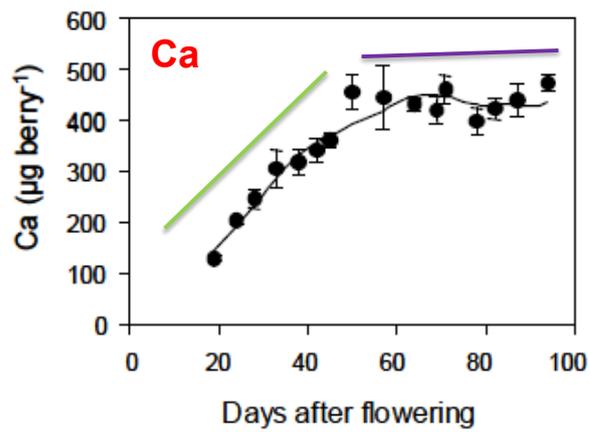


Figure 13 : Accumulation du calcium dans la baie (Syrah) (Rogiers et al, 2006)

2. Assimilation et transport du calcium

a. Formes du calcium

La forme d'absorption du calcium dans la plante est le cation divalent (Ca^{2+}) (Hopkins, 2013) Le calcium est ensuite assimilé dans l'apoplasme racinaire sous forme de phosphate. Le calcium transporté dans la plante peut se lier à l'acide oxalique pour le neutraliser formant alors des cristaux qui précipitent dans les vacuoles sous la forme monohydraté ($(\text{CO}_2)_2\text{Ca}$, H_2O) ou trihydraté ($(\text{CO}_2)_2\text{Ca}$, $3\text{H}_2\text{O}$). (Lacroix, 1999; Calmés et Carles, 2014)

b. Conditions d'assimilation

Le niveau de calcium dans le sol ne permet pas de savoir ce que la plante va utiliser car d'autres facteurs agissent : le type de sol (pH, CEC, ...), la température, l'humidité, l'âge de la plante, le matériel génétique (cépage, porte-greffe) et la concentration en autres minéraux. (Ferguson, 1984; Champagnol, 1984) Par exemple, dans le cas de la pomme de terre, le calcium a été mieux assimilé dans un sol sableux contenant peu de calcium et une faible CEC. (Conway et al., 1994)

c. Assimilation passive

Les cations peuvent être absorbés de manière active ou passive. L'absorption du calcium est dite passive car elle se fait grâce à l'alimentation hydrique au niveau de l'extrémité des racines. (Lacroix, 1999 ; Clarkson et Hanson, 1980) C'est l'équilibre électro-négatif des cellules qui permet l'assimilation du calcium. (Champagnol, 1984) Son accumulation est d'autant plus importante que la transpiration est importante et que la réserve utile du sol est importante. (Conway et al., 1994 ; Lacroix, 1999 ; Clarkson, 1984, Mengel et Kirkby, 1982). Les feuilles basales et médianes reçoivent donc plus de calcium car elles transpirent plus que les bractées, les jeunes feuilles et les fruits. (Champagnol, 1984) Du fait de la lente migration du bas vers le haut de la plante, on observe un gradient de concentration du calcium décroissant. (Calmés et Carles, 2014)

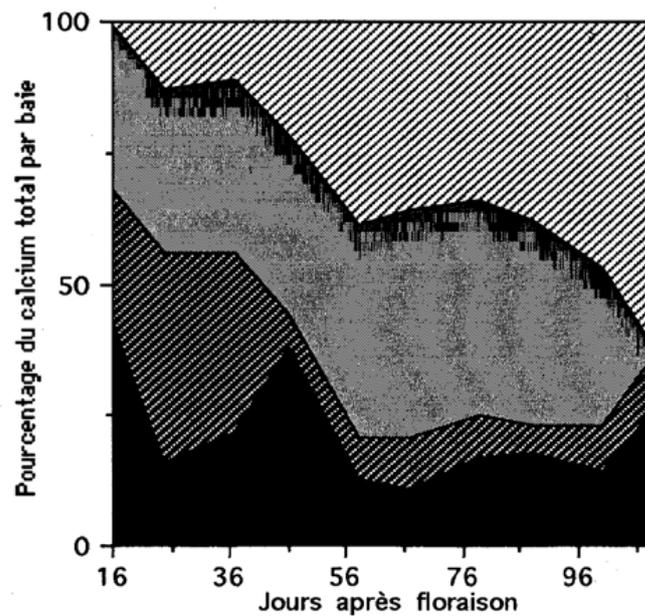
L'accumulation est plus forte en sol calcaire et sous climat méditerranéen, où la transpiration est accrue, en comparaison au climat océanique. En effet, la température joue sur la transpiration et donc sur l'absorption qui est favorisée si le sol est humide et réchauffé. (Champagnol, 1984 ; Lacroix, 1999) Donèche et Chardonnet (1992) ont pu démontrer que l'accumulation du calcium dans la baie est corrélée à l'intensité de la transpiration.

d. Dynamique au cours du cycle (Figure 12)

Au cours du cycle, l'absorption est active environ trois semaines après le débourrement et jusqu'à six semaines avant la chute des feuilles. A la floraison, l'absorption des nutriments augmente avec la production de nouvelles racines. En revanche de la véraison à la récolte, les baies ne semblent plus accumuler de calcium (Figure 13). (Rogiers et al., 2006) Pourtant, à maturité les baies contiennent deux fois plus de calcium que les baies vertes. Elles se chargent autant en magnésium mais 15 fois plus en potassium. (Donèche et Chardonnet, 1992)

c. Voies d'assimilation

- Voie racinaire (cf II, 2)



- ▨ Calcium pariétal de la pellicule - Cell walls-calcium of the skin
- ▩ Calcium intracellulaire de la pellicule - Intracellular calcium of the skin
- ▧ Calcium pariétal de la pulpe - Cell-walls-calcium of the flesh
- Calcium intracellulaire de la pulpe - Intracellular calcium of the flesh

Fig. 2: Evolution des proportions respectives du calcium pariétal et intracellulaire de la pulpe et de la pellicule au cours du développement du raisin.

Figure 14 : Evolution des proportions respectives du calcium pariétal et intracellulaire de la pulpe et de la pellicule au cours du développement du raisin.
(Donèche et Chardonnet, 1992)

• Voie aérienne (feuilles et baies)

D'après Lacono (1986), les feuilles et les grappes absorbent facilement le calcium appliqué en foliaire. L'assimilation de calcium semble se faire par les stomates et/ou par un mécanisme de transport actif à travers la cuticule; les jeunes feuilles étant plus actives. (Champagnol, 1984) Mais l'entrée du calcium peut aussi se faire via les lenticelles et les microfissures puisque plus la maturation est avancée, meilleure est l'absorption du calcium (Conway et al., 1994).

d. Transport et mobilité

Comme nous l'avons vu, l'assimilation du calcium vers les baies se fait via le xylème jusqu'à véraison. Le calcium est donc acheminé vers les feuilles et les fruits où il s'accumule et n'est pas redistribué par le phloème. (Lacroix, 1999; Champagnol, 1984; Ruffner, 1982; Hanger, 2008)

Cependant, il semble qu'au développement des feuilles, les cristaux d'oxalate répartis le long des nervures migrent et se répartissent progressivement sur toute la surface du limbe. Les nervures continuent ensuite à alimenter le limbe en cristaux pendant sa croissance. (Calmés et Carles, 2014) De même, d'après Donèche et Chardonnet (1992), il existe un phénomène de migration du calcium de la pulpe vers les pellicules à véraison (Figure 14). D'abord brutalement puis progressivement entraînant la solubilisation des pectines contenues dans la pulpe qui se ramollit. Le phénomène se répète dans la pellicule lorsque la baie grossit et que la concentration en calcium est diluée. Ces migrations varient selon le cépage, les conditions climatiques et le type de sol. (Donèche et Chardonnet, 1992) Ces migrations au sein des organes ont été peu étudiées.

e. Synergies et antagonismes

Le calcium est en concurrence avec d'autres cations lors de son absorption au niveau des racines, comme l'ammonium (NH_4^+), le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}) et le sodium (Na^+) (Lacroix, 1999). K^+ , plus soluble, est plus absorbé que Ca^{2+} qui est plus absorbé que Mg^{2+} . Ainsi, le calcium, s'il est en excès, peut gêner l'assimilation de magnésium mais, à l'inverse, un excès de magnésium peut empêcher l'absorption du calcium. Garcia et al. montrent qu'il existe un fort antagonisme entre le calcium et le potassium. Un apport en calcium entraîne une diminution de l'assimilation du potassium et donc, potentiellement, une augmentation de l'acidité dans les vins. (Garcia et al., 2008) Si les autres cations, le phosphore ou les nitrates (NO_3^-) sont peu abondants, le calcium sera mieux assimilé. De plus, on remarque que la forme NH_4^+ induit une plus forte concurrence que NO_3^- . (Lacroix, 1999)

Par rapport aux autres éléments, les cations métalliques sont moins absorbés en quantité. La nutrition azotée diminue la teneur en cations de la plante. (Champagnol, 1984; Jade International, 2014). Le calcium est antagoniste pour la plupart des autres éléments et peut donc induire des carences.

Dans le cas du fer, l'antagonisme est présent mais l'interaction se passe au niveau du sol. (Bertamini et al., 2002) La présence de calcium autour des racines ferait précipiter le fer et empêcherait donc son assimilation ce qui induit une chlorose. (Champagnol, 1984)

3. Rôle du calcium

a. Rôle au niveau du sol

Le calcium joue un rôle dans la stabilité structurale du sol et entraîne une meilleure pénétration de l'eau. Il permet de rééquilibrer le pH du sol en réduisant l'acidité, il limite la

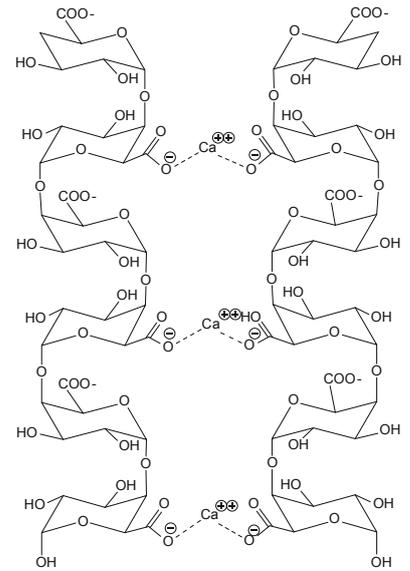
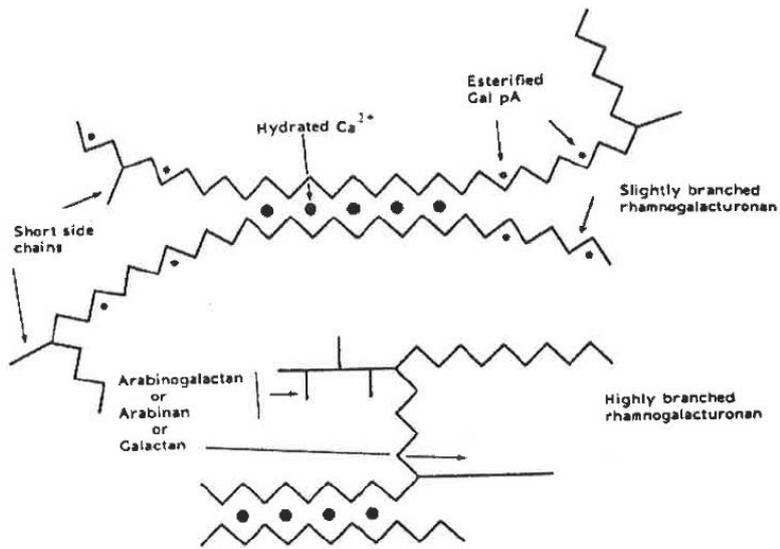


Figure 15 : Schéma de la structure de la pectine montrant le rôle du Ca dans les zones de jonctions entre les chaînes de polysaccharides. (à gauche) (Nunan, 1999)
 Détail de la structure en "boîte à œufs" (à droite) (Caffall et Mohnen, 2009)

toxicité des ions Al^{3+} et H^+ . Il augmente la disponibilité du phosphore et de la MO. (Winkler et al., 1974)

b. Rôle au niveau de la plante (Figure 16)

Le calcium est plutôt utilisé en arboriculture pour protéger les fruits. Il donne la fermeté aux pommes et réduit les points amers et le brunissement. (Laroche, 2005). Sur la vigne, des études ont été réalisées pour les raisins de table car leur tenue lors du stockage et jusqu'à la consommation est primordiale.

La vigne en a besoin au moment de la formation de la grappe et nécessite de l'eau pour une bonne assimilation.

• Echelle moléculaire

Le calcium, comme le magnésium, a trois fonctions :

> une fonction d'effecteur enzymatique en activant les protéines kinases et les phosphatases. Il régule donc les activités enzymatiques et la phosphorylation de protéines. (Champagnol, 1984) Le calcium joue donc un rôle dans la composition en protéines de la plante mais aussi dans la composition en chlorophylle. (Chéour et al., 1990) L'apport important de calcium semble diminuer la concentration en chlorophylle dans la plante (Chen et al., 2004 ; Smith et Cheng, 2006 ; Sabir et al., 2010)

> une fonction physico-chimique : ils jouent aussi un rôle dans la neutralisation du cytoplasme et sont présents dans la structure des parois pour neutraliser les fonctions acides des composés pectiques qui seraient toxiques pour la plante. Ils participent donc au potentiel osmotique cellulaire. (Champagnol, 1984; Lacroix, 1999)

> une fonction dans le transport à travers la membrane pour permettre la régulation stomatique et la migration des métabolites entre cellules et à travers le phloème. (Champagnol, 1984).

Le calcium est aussi un messager secondaire et il intervient dans l'initiation des réactions de stress et dans les réponses hormonales (infections parasitaires, stress environnementaux tels que le froid) (Lacroix, 1999)

• De la cellule à l'organisme

Le calcium joue un rôle structurel majeur.

> Il est à la base de la division cellulaire en intervenant directement au niveau du faisceau mitotique et en formant des pectates de calcium entre les deux cellules filles. Ainsi, il intervient dans la multiplication et l'élongation cellulaire au niveau de la croissance racinaire. (Lacroix, 1999; Marschner, 2011)

> Le calcium participe à la structure des parois grâce aux ponts calciques créés au niveau de la couche intercellulaire. Ces ponts forment des liaisons non covalentes entre les chaînes polygalacturoniques donnant une structure flexible et viscoélastique sous forme de gel. (Nunan, 1999) Cette structure parfois appelée "boîte à œufs" est présente dans 70% des gels de pectine renforçant leur rôle de "ciment intercellulaire". Le schéma 15 illustre ces liaisons calcium. Pendant la maturation ce sont ces chaînes pectiques qui sont dégradées par des polygalacturonases. Les ponts calciques rendant l'accès plus difficile aux enzymes, le ramollissement des fruits est retardé. (Conway et al., 1994; Buescher et al., 1979; Jona, 1983; Champagnol, 1984).

Ces liaisons joueraient également un rôle sur l'ouverture des cellules stomatiques via la rigidité qu'elles peuvent leur conférer. Ces cellules étant particulièrement riches en pectines. (Jones et al., 2003) Une étude montre que le risque d'abscission des fleurs et des fruits est supprimé grâce au dépôt de lignine et à un enrichissement en calcium. L'abscission étant liée à l'hydrolyse des pectines de la lamelle moyenne des parois. (Sexton et Roberts, 1982)

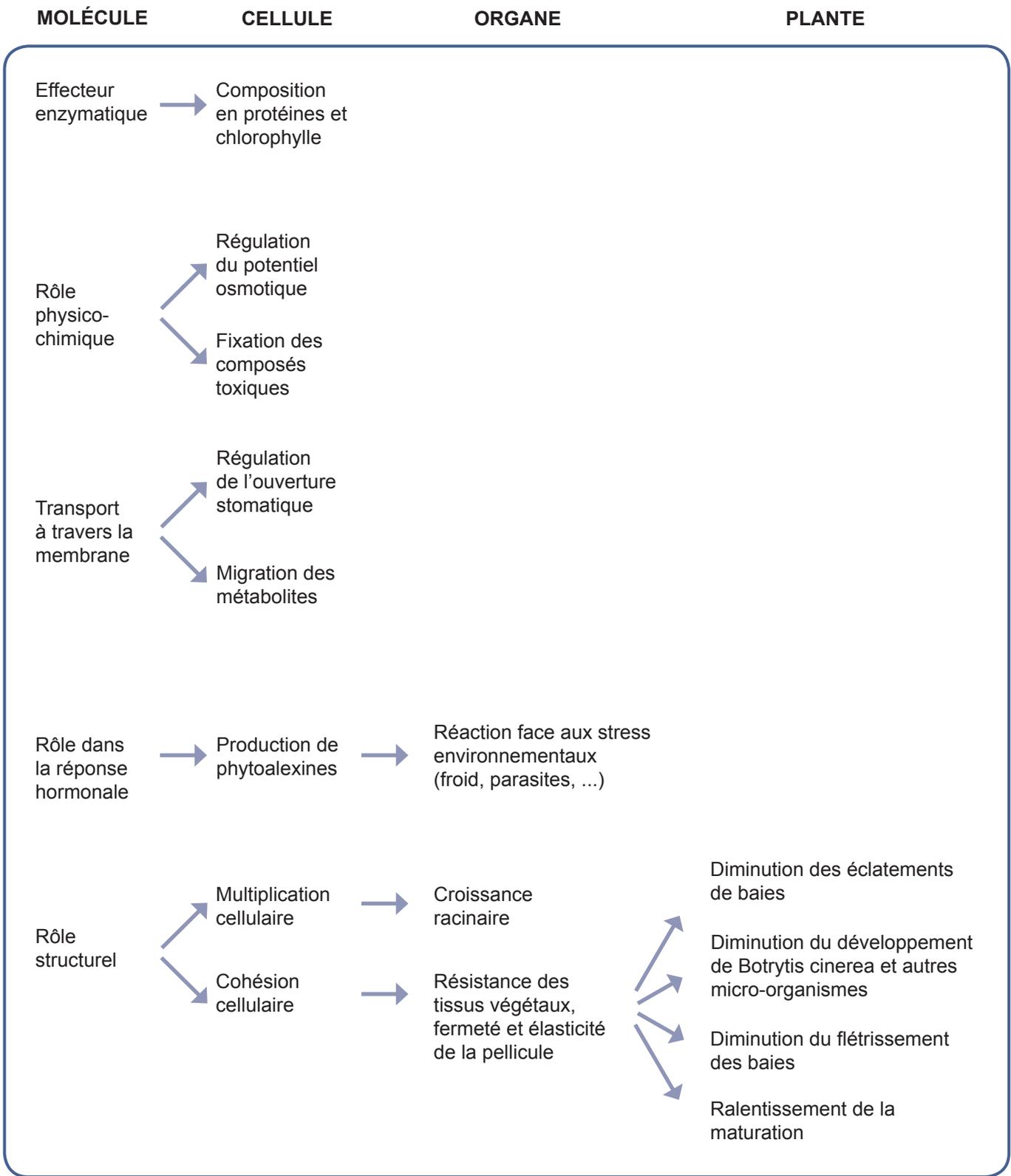


Figure 16 : Schéma récapitulatif des rôles du calcium sur la vigne.

Ainsi grâce aux ponts calciques, le calcium augmente la cohésion, l'élasticité et la résistance des pellicules et renforce leur rôle de barrière physique face aux bio-agresseurs. (Poovaiah 1986 ; Cheour et al. 1990; Nunan, 1999; Caffall et Mohnen, 2009)

Les conséquences au niveau de la baie sont multiples :

> Elasticité

En augmentant l'expansibilité des parois, les baies sont donc moins soumises à des éclatements ce qui limite le développement de micro ou macro-organismes (Caffall et Mohnen, 2009)

> Fermeté : flétrissement limité et résistance au stress hydrique

Il a été démontré que lors de la maturation le ramollissement du fruit est principalement dû à la modification des composés des parois cellulaires et surtout des composés pectiques. (Poovaiah et al., 1988).

Les pellicules sont plus résistantes limitant le phénomène de flétrissement lié notamment au stress hydrique.

Le produit Megagreen® a montré un effet sur la résistance au stress hydrique grâce à une surface foliaire permettant l'étalement des gouttes d'eau et donc une plus grande surface de contact avec la feuille. (Besnard et al., 2013)

Un produit permettant de lutter contre le stress hydrique a mis en évidence une augmentation du calcium dans le cytosol sur des suspensions cellulaires. Cette réaction implique une action de type éliciteur. (Attia, 2007)

> Résistance aux attaques des micro-organismes (dont Botrytis)

La baie résiste mieux aux attaques des micro-organismes grâce à une barrière physique renforcée mais aussi via la stimulation de la production de phytoalexines induite grâce au calcium. (Stäb et Ebel, 1987)

Face à la digestion enzymatique de la paroi, comme c'est le cas lors d'une attaque de *Botrytis cinerea*, les baies les plus résistantes sont celles contenant le plus de calcium pariétal. (Chardonnet, 1994; Heale, 1985; Chardonnet et Bonèche, 1995) Des cépages ont cependant besoin de plus de calcium pour une même résistance, c'est le cas du Merlot ou de la Muscadelle par rapport au Cabernet-Sauvignon. Ceci est à mettre en relation avec le fait que le Merlot contient huit fois plus de substances pectiques solubilisées par l'oxalate d'ammonium que le Cabernet-Sauvignon. Il faut donc beaucoup plus de calcium chez le Merlot pour complexer ces substances pectiques et obtenir la même cohésion des parois (Chardonnet et Bonèche, 1995; Chardonnet, 1994)

D'après une étude réalisée avec l'engrais foliaire Megagreen®, l'apport de calcium permet également à la vigne de mieux résister aux chocs et aux nécroses au niveau des feuilles. Celles-ci sont plus vertes, plus épaisses et sont moins sensibles au mildiou mosaïque en fin de cycle. A noter que cette étude a été réalisée sur un seul cépage (Cot), sous serre et sur une parcelle à Cahors, sur 4 années. Le produit Megagreen® apporte du calcium mais aussi du CO₂ et de la silice. (Besnard et al., 2013)

> Maturation et sénescence

Pendant la maturation, le calcium joue un rôle de régulateur. (Fergusson, 1984) L'enrichissement de la pellicule en calcium permet de ralentir le processus de sénescence. (Donèche et Chardonnet, 1992) Durant la maturation, le degré d'estérification diminue et permet une augmentation des liaisons non-covalentes telles que les ponts calciques. Pour la vigne ce degré d'estérification des polygalacturonanes passe de 58% à 48% à la véraison puis reste stable. (Nunan, 1999) L'apport de calcium retarde la maturation de la fraise et cet effet est accentué avec l'augmentation de la concentration en calcium dans les tissus. (Chéour, 1990)



Figure 17 : Symptôme de carence en calcium sur la vigne.
© VEGEDIAG Expert

Au niveau du développement de la plante, le calcium a peu d'effet sur la vigueur. (Champagnol, 1984) Toutefois, la nano-fertilisation foliaire augmente le développement végétatif de la plante. (Sabir et al., 2014)

d. Le calcium dans le vin

Le calcium, comme le potassium peut entraîner un précipité dans le vin. Le tartrate neutre de calcium précipite plus lentement que le bitartrate de potassium et peut donc mettre plusieurs années. La cristallisation du tartrate de calcium peut être observé même à des pH très bas. Le risque de dépôt en bouteille existe lorsque le taux de calcium dépasse 60 mg/L pour les vins rouges et 80 mg/L pour les vins blancs, c'est donc un facteur à prendre en compte. (Ribéreau-Gayon et al., 2012)

Une étude menée sur le produit Megagreen® a montré un effet sur les vins issus de ce traitement : ils contiennent plus d'anthocyanes et leurs tanins sont plus souples et moins asséchants possiblement grâce à une meilleure résistance face au stress hydrique (Besnard et al., 2013)

Aucune étude ne démontre que le calcium entraîne une diminution du pH dans le vin.

4. Carence et toxicité pour la plante

Les carences en calcium dans le sol sont rares (Hopkins, 2013). Chez la plante, des carences s'observent chez la tomate lorsque l'apport d'eau est irrégulier (nécrose apicale) et parfois chez le pommier en sol acide. (Laroche, 2005) Chez la vigne les symptômes de carence en calcium sont extrêmement rares mais peuvent apparaître dans des conditions où les sols sont lessivés (Blancard et Deluche, 2017; Delas, 2000). En laboratoire, les symptômes de carence sont : des feuilles qui jaunissent à la périphérie (Figure 17), qui se recourbent vers la face inférieure puis se nécrosent. Le calcium étant plutôt immobile, les symptômes s'observent d'abord sur les jeunes feuilles. Au niveau des racines, leur croissance peut être ralentie et elles peuvent apparaître gélatineuses. (Blancard et Deluche, 2017; Hopkins, 2013) La plupart du temps il s'agira de carence induite liée à une sécheresse qui entraîne une faible translocation du calcium dans le sol et la plante. (Camberato et Pan, 2000; Pilbeam et Morely, 2007)

Il n'existe pas de toxicité connue du calcium sur la vigne. Dans les terroirs calcaires, on peut observer des chloroses mais cela est dû aux ions bicarbonate de ces sols et non aux ions calcium. Les ions bicarbonates entraînent une synthèse d'acides organiques importantes ce qui provoque une accumulation de cations dans les cellules et une alcalinisation de la plante rendant le fer insoluble bien qu'il soit absorbé, ce qui entraîne une carence physiologique. Parfois appelée chlorose calcaire, il s'agit d'une carence en fer. (Champagnol, 1984)

5. Fertilisation

L'apport de calcium est particulièrement important chez le pommier afin d'assurer la fermeté et la conservation des fruits. Les traitements conseillés pour la pomme sont : une application à nouaison puis tous les 7 à 10 jours jusqu'à la récolte. (Lacroix, 1999) Les sources d'apports foliaires utilisés sont principalement le nitrate de calcium et le chlorure de calcium. L'apport de calcium sous la forme chlorure peut cependant occasionner des dégâts sur les fruits. (Conway et al., 1994; Delas, 2000) Il existe également des formes chélatées, moins concentrées en calcium.

Chez la fraise, la date d'apport pendant la maturation et la fréquence de traitement n'ont pas d'impact sur la concentration en calcium dans les tissus. La dose est corrélée à la

quantité de calcium présent dans les feuilles et les fruits. (Chéour et al., 1990)

Les raisins transpirent très peu, le calcium y est donc peu acheminé pourtant son rôle y est significatif. Pour maintenir l'absorption du calcium, même en foliaire, il faut maintenir une humidité au sol pour une bonne assimilation. (Lacroix, 1999) A noter que le calcium peut se combiner à des fongicides ou des traitements de contrôle biologique, il doit donc être appliqué seul. (Conway et al., 1994)

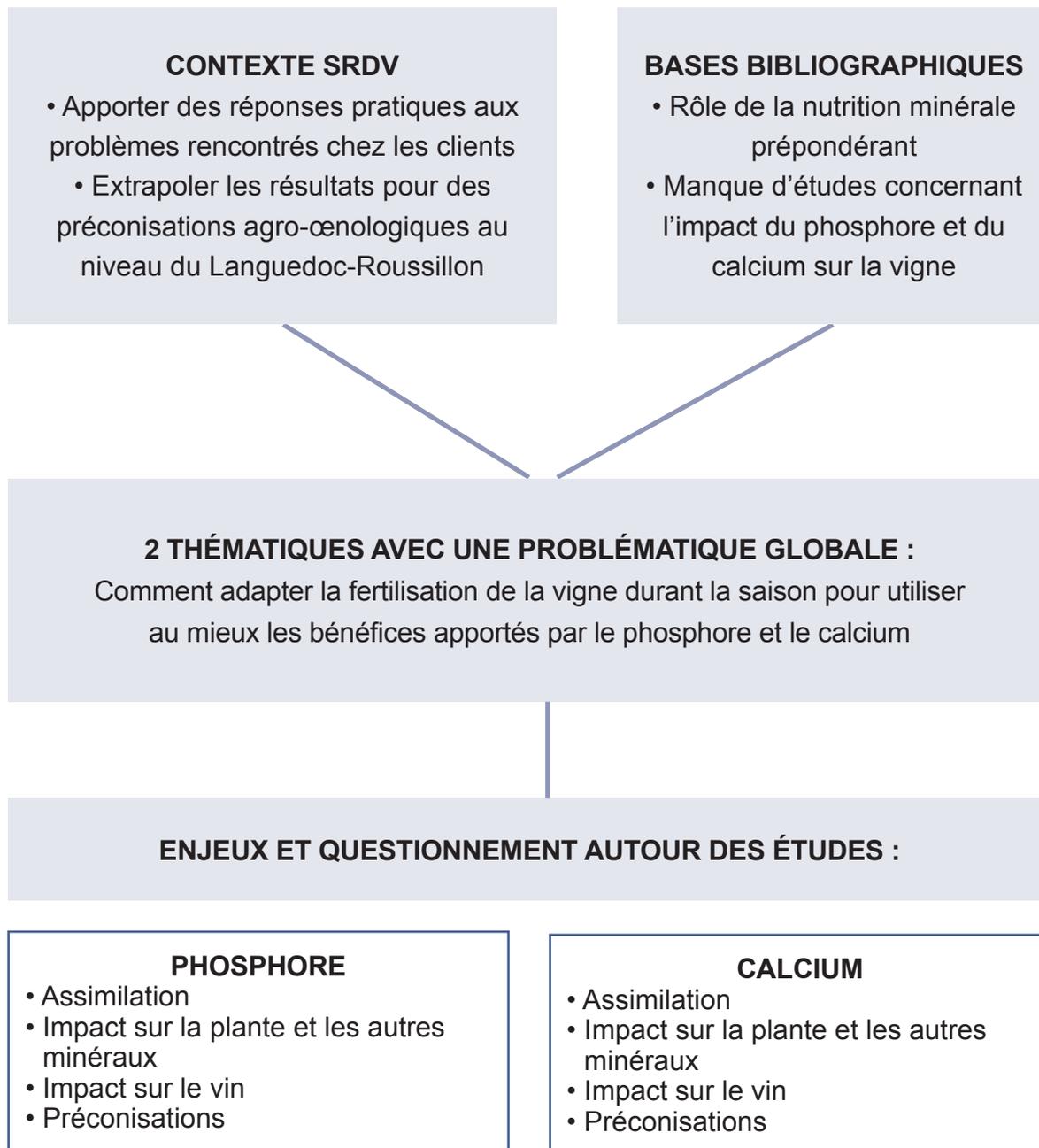


Figure 18 : Schéma récapitulatif du contexte et des problématiques soulevées

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

L'objectif de ces essais est d'étudier l'assimilation du phosphore et du calcium par la vigne afin de mieux comprendre leurs impacts et leurs fonctionnements et aboutir à des préconisations adaptées aux problématiques des clients.

Comment adapter la fertilisation de la vigne durant la saison pour obtenir des plantes équilibrées et tirer les bénéfices agronomiques et œnologiques de ces macro-éléments ?

Pour ajuster au mieux la fertilisation foliaire en phosphore et en calcium, il faut répondre à ces questions :

PHOSPHORE

• Assimilation :

- L'apport foliaire permet-il d'avoir une meilleure assimilation et donc une augmentation de la quantité de phosphore dans les pétioles ?
- Existe-t-il une différence d'assimilation entre des produits formulés ?
- L'apport de phosphore impacte-t-il l'assimilation des autres éléments (synergie ou antagonisme) pendant le cycle ?

• Impact de l'apport :

- Le phosphore permet-il d'accroître le développement végétatif de la plante, donc la vitesse de croissance ?
- Quel est l'impact d'un apport en foliaire sur la composition minérale des baies à véraison et à maturité ?
- Quel est l'impact d'un apport en foliaire sur l'équilibre des baies ?

CALCIUM

• Assimilation :

- L'apport foliaire de calcium est-il assimilé par la plante ?
- A quel(s) stade(s), l'apport de calcium est-il le mieux assimilé ?
- L'apport de calcium impacte-t-il l'assimilation des autres éléments (synergie ou antagonisme) pendant le cycle ?

• Impact de l'apport :

- Quel est l'impact d'un apport en foliaire sur la composition minérale des baies à véraison et à maturité ?
- Quel est l'impact d'un apport en foliaire sur l'équilibre des baies ?
- La teneur en calcium dans les baies change-t-elle entre véraison et maturité ?
- L'apport de calcium permet-il d'augmenter la fermeté des baies ?
- L'apport de calcium a-t-il un effet sur le poids des baies et la récolte ?

Afin d'analyser l'influence d'apports foliaires de phosphore et de calcium sur la vigne, des expérimentations en champ ont été menées.

La figure 18 récapitule le contexte et les problématiques soulevées.

Tableau 4 : Caractéristiques des parcelles pour les essais phosphore et calcium.

PARCELLE	GRAND MERLOT	MERLOT LE JARDIN	SYRAH	PINOT	VIIGNIER
Localisation	Vendres	Azille	Peyriac-de-mer	Mirepeisset	Armissan
Surface d'essai	7,5 ha	1 ha	0,27 ha	0,8 ha	1,37 ha
Clone		346	174	667	642
PG	SO4	Gravesac	R140	SO4	R110
Plantation	mars 2000	fev. 1999	2003	2012	2006
Sol - type	argilo-calcaire	limono-calcaire, peu profond	argilo-limoneux calcaire	limon argilo-sableux	limono-calcaire
- pH eau	8,3	7,8	8,4	8,3	8,4
Densité (pieds/ha)	4000	4166	5050	5000	4938
Rendement moyen	90 hl/ha	10,2 t/ha	55 hl/ha	90 hl/ha	45 hl/ha
Production	IGP	IGP	AOC / BIO	IGP	IGP
Taille	Guyot simple	Guyot simple puis double en 2014	Guyot simple	Taille Rase de Précision	Guyot simple
Irrigation	non	asperseur	non	goutte à goutte	goutte à goutte
Problématique :	difficulté d'assimilation du phosphore	faibles rendements	flétrissement, carence en fer	flétrissement, maturité technologique tardive	sensible au Botrytis, partie gelée

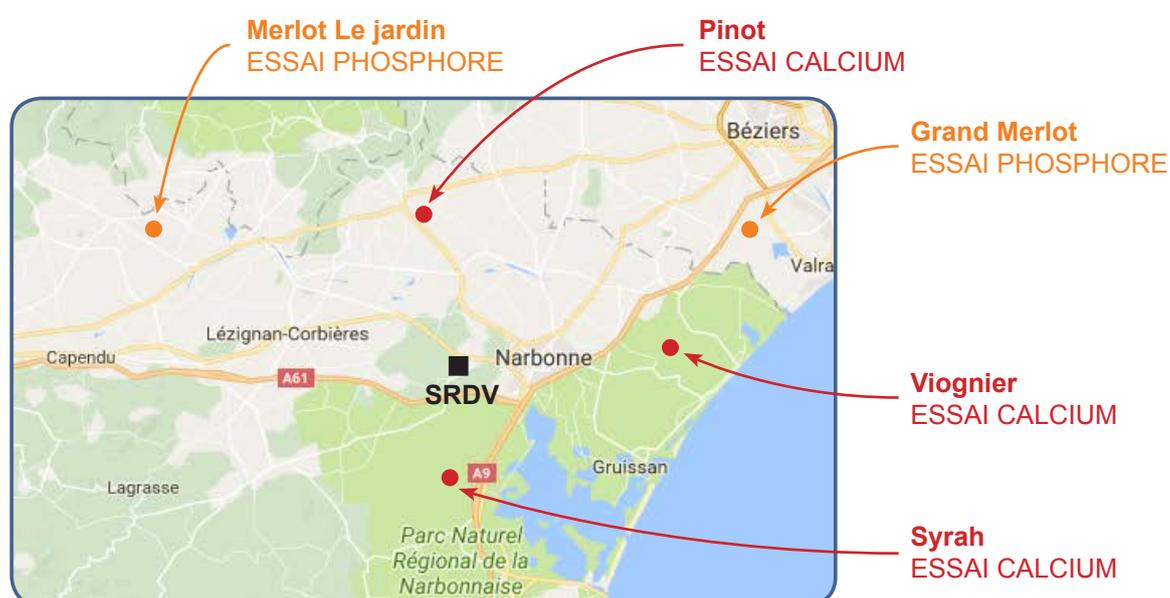


Figure 19 : Localisation des parcelles pour les essais phosphore et calcium.

© Google 2017

MATÉRIELS ET MÉTHODES

I. Dispositif expérimental

1. Parcelles étudiées

Cinq parcelles ont été sélectionnées pour ces essais : deux pour l'essai phosphore (Grand Merlot et Merlot Le jardin), trois pour l'essai calcium (Syrah, Pinot et Viognier). Ces vignes sont celles de clients de la SRDV ou de ses partenaires qui cherchent à trouver une réponse à une problématique de leur parcelle. Le but de ces essais étant de tester une potentielle réponse à ces problématiques.

Le tableau 4 et la figure 19 rassemblent les caractéristiques de ces parcelles et leur localisation.

2. Modalités testées

Dans ces essais nous pouvons faire varier le moment de l'apport, le nombre d'apport, la dose et le type de produit. Les tableaux 5 et 6 récapitulent ces modalités.

Dans un premier temps, pour l'essai phosphore, nous voulons comparer l'effet de l'apport "habituel" du viticulteur par rapport à une absence d'apport de l'élément étudié. C'est le cas pour la parcelle Merlot Le Jardin où trois apports de phosphore sont faits sur la saison avec le produit DAP (Phosphate Diammonique). De même pour la parcelle Grand Merlot qui reçoit habituellement du produit MAP (Phosphate Monoammonique). Ces produits contiennent des phosphates et de l'azote sous forme ammoniacal. Sur la parcelle de Grand Merlot, une modalité supplémentaire a été faite afin de tester également le produit Phorti Max qui est un engrais à base de phosphore et de potassium.

Pour l'essai calcium, trois produits différents ont été utilisés sur les trois parcelles. Ce sont des produits couramment utilisés sur les pommiers et homologués pour la vigne. Le produit Megagreen est également homologué en agriculture biologique. D'après la bibliographie, le calcium est assimilé au niveau des baies jusqu'à la véraison puisqu'il n'est pas redistribué. Il est important à la multiplication cellulaire donc de la floraison à la nouaison puis au moment du grossissement cellulaire pour la constitution des parois. Le stade clé d'apport de calcium semble donc être le stade taille de pois qui a été choisi pour l'apport de base. Le calcium ne doit pas être mélangé à un autre produit phytosanitaire. Son utilisation est donc contraignante pour les viticulteurs qui optimisent les apports afin de minimiser le nombre de passages dans les vignes. Dans un objectif pratique, cet essai se base sur un unique apport contrairement aux recommandations des fournisseurs d'engrais qui préconisent 3 à 5 passages selon les produits. Nous avons toutefois testé en parallèle l'effet d'un deuxième apport autour de floraison ou autour de véraison afin de déterminer si un deuxième apport serait intéressant et, si oui, à quel stade. Ce qui donne quatre modalités testées pour l'essai calcium.

Concernant les doses, les recommandations des fabricants ont été suivies, ne pouvant pas aller au delà des doses maximales afin d'éviter les brûlures sur la vigne. Les apports sont faits par les viticulteurs avec leur pulvérisateur habituel. La parcelle de Syrah a été traitée avec un pulvérisateur à dos sur les deux rangs centraux de chaque modalité. Le détail des apports effectués est résumé dans le tableau 7.

Pour faciliter les apports, les parcelles ont été divisées par le nombre de modalités dans le sens des rangs. Les rangs de bordure et les éventuelles zones hétérogènes ont été

Tableau 5 : Modalités de l'essai phosphore

GRAND MERLOT		MERLOT LE JARDIN	
PRODUIT :	APPORTS :	PRODUIT :	APPORTS :
<ul style="list-style-type: none"> • Témoin non traité • Apport MAP • Apport PHORTI MAXI 	<ul style="list-style-type: none"> • BFS + NOU/TP • BFS + NOU/TP 	<ul style="list-style-type: none"> • Témoin non traité • Apport DAP 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 apports selon habitudes du viticulteur
Modalités : 3		Modalités : 2	

Tableau 6 : Modalités de l'essai calcium

SYRAH	PINOT	VIIGNIER	APPORTS :
PRODUIT :	PRODUIT :	PRODUIT :	identiques aux trois parcelles
<ul style="list-style-type: none"> • Témoin non traité • Folical E 	<ul style="list-style-type: none"> • Témoin non traité • Megagreen 	<ul style="list-style-type: none"> • Témoin non traité • Calfruix 	<ul style="list-style-type: none"> • FLO + NOU/TP • NOU/TP • NOU/TP + VER
Modalités : 4			

Tableau 7 : Composition et doses des engrais foliaires utilisés.

	PRODUIT	COMPOSITION	DOSE
PHOSPHORE	DAP	46% P ₂ O ₅ / 18% NH ₄	1 apport à 0,7 U puis 2 apports à 1,5 U
	MAP	54% P ₂ O ₅ / 12% NH ₄	10 kg/ha soit 5,4 U
	PHORTI MAXI	580 g/L P ₂ O ₅ / 145 g/L K ₂ O Oligo-éléments (B, Cu, Mn, Mo, Zc)	4 L/ha soit 2,32 U
CALCIUM	FOLICAL E	202,5 g/L CaO (Chlorure de Ca)	8 L/ha soit 1,62 U
	MEGAGREEN	41,7 % CaO + 3% MgO	2 kg/ha soit 0,83 U
	CALFRUIX	200 g/L CaO	5 L/ha soit 1 U

éliminés. Seule la parcelle de Syrah comportait une légère pente dont l'effet potentiel est annulé par l'échantillonnage puisqu'elle est dans le sens des rangs.

II. Mesures

Les mesures sont toujours réalisées sur des pieds représentatifs de la parcelle.

1. Suivi des conditions météorologiques

Les données météorologiques sont récoltées au niveau de la station météorologique de Ferrals-les-Corbières qui est relativement centrale pour les cinq parcelles étudiées.

Le développement de la vigne et la maturation du raisin sont conditionnés par l'alimentation hydrique. Une contrainte hydrique favorise l'arrêt de croissance et accélère la maturation. (Van Leeuwen, 2008) Le $\Delta^{13}\text{C}$ est une mesure simple qui reflète cette contrainte hydrique pendant la maturation grâce à l'analyse du rapport isotopique $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$. En effet, lorsque les stomates sont ouverts, la plante favorise l'absorption de $^{12}\text{CO}_2$, plus léger mais plus la plante subit une contrainte hydrique, plus elle absorbe de ^{13}C . (Van Leeuwen et al., 2001) Cette mesure se fait sur le moût, au moment de la récolte. La méthode utilisée aux Laboratoires Dubernet repose sur une analyse par spectroscopie IRTF et par comparaison du spectre à des échantillons analysés par la méthode de référence, à l'aide d'un spectromètre de masse de rapport isotopique (SMRI). (OIV, 2001) Les valeurs varient de -20‰ (contrainte hydrique sévère) à -26‰ (aucune contrainte hydrique). (Van Leeuwen et al., 2001)

2. Caractéristiques agronomiques

Sur les parcelles de Merlot des prélèvements de sol ont été faits sur les 30 premiers centimètres selon le protocole décrit en annexe 1 puis analysés par le laboratoire LDM (Laboratoire de Développement Méditerranéen) (Annexe 2). Des analyses de sol ont été fournies pour les parcelles de l'essai calcium (Annexe 3).

Le mode de conduite et l'itinéraire technique (y compris l'irrigation) sont identiques sur la totalité de la surface de chaque parcelle.

3. Caractérisation de la phénologie de la vigne

Le suivi des stades permet de comparer les échantillons sur une même échelle. C'est un repère chronologique à partir duquel on détermine la date des prélèvements à effectuer. Les stades phénologiques sont déterminés selon la méthode de Baillod et Baggiolini (1993): le stade est atteint lorsque 50% des ceps l'ont atteints. Pour caractériser ces stades, les échelles de Eichhorn et Lorenz (1977) et Baggiolini (1952) sont utilisées (Annexe 4).

4. Caractérisation de la vigueur et du rendement

a. La vigueur et le développement végétatif

Le développement végétatif est analysé pour le phosphore par une mesure de l'élongation. La nutrition minérale impacte de façon plus importante les ramifications secondaires, ce sont ces rameaux qui seront mesurés. Les rameaux choisis se situent tous au même éloignement par rapport à la souche et par rapport au rameau primaire. Pour chaque modalité 10 rameaux seront mesurés sur les 10 souches représentatives.

L'augmentation du diamètre de ces 10 mêmes rameaux est mesuré pour analyser la

Tableau 8 : Seuils pour l'interprétation des analyses pétiolaires
(selon Robinson et al., 1997, Goldspink et Howes, 2001)

Nutrient	Deficient	Marginal	Adequate	High	Toxic
Nitrogen (%)	<0.7		0.8–1.1	>1.2	
Nitrate nitrogen (mg/kg)	<340	340–499	500–1500	1500–2500	>2500
Phosphorus (%)	<0.15	0.15–0.24	0.25–0.50	>0.50	
Potassium (%)	<1.0	1.0–1.3	1.3–3.0	>3.0	
Calcium (%)	<1.0		1.2–2.5		
Magnesium (%)	<0.30	0.30–0.39	>0.40		
Sodium (%)			0.1–0.3	0.4–0.5	>0.5
Chloride (%)			<1.0	1.0–1.5	>1.5
Zinc (mg/kg)	<15	15–26	>26		
Manganese (mg/kg)	<20	20–29	30–60		>500
Iron (mg/kg)		7	70		
Copper (mg/kg)	<3	3–6	>6		
Boron (mg/kg)	<25	25–30	31–70	71–100	>100

vigueur. La vigueur est également visible dans les poids frais des pétioles.

En parallèle, la surface foliaire est mesurée à l'aide d'un outil simple : Viticanopy (Annexe 5). Cette application permet, à partir d'une photo, d'obtenir l'indice de surface foliaire (LAI) et le pourcentage de trous dans la canopée. L'annexe 4 détaille le protocole utilisé pour ces mesures.

b. Le rendement

Pour évaluer le rendement, 10 grappes ont été prélevées à maturité et pesées par modalité. Le poids est multiplié par le nombre de grappes par souche, lui-même calculé sur un comptage sur 10 souches représentatives par modalité. Puis le tout est multiplié par la densité à l'hectare. Sur les parcelles "phosphore" ce dernier prélèvement n'ayant pu être fait, le poids de 100 baies sera comparé entre les modalités.

5. Mesures expérimentales

a. Analyses de l'assimilation des minéraux : pétioles et limbes

L'analyse pétiolaire réalisée sur plusieurs stades permet d'avoir une vision de la dynamique d'assimilation des éléments sur la saison. Le pétiole est également plus sensible aux variations des conditions de nutrition que le limbe et reflète donc plus rapidement les états de carence ou d'excès (Delas, 2010) Les résultats sont à relier au contexte pédo-climatique de chaque parcelle.

Les prélèvements de pétioles sont réalisés aux stades clés suivants : boutons floraux séparés, floraison, taille de pois, véraison et maturité et selon le protocole en annexe 6. Le poids frais des pétioles est déterminé à la parcelle.

A maturité, un prélèvement de limbes est également réalisé. Il permet d'apporter plus d'informations concernant l'assimilation et de confirmer ou non les résultats pétiolaires. Ce prélèvement se fait selon le même protocole que pour les pétioles.

Après préparation des échantillons (séchage 12h-60°C puis broyage) et pesée des échantillons secs, les minéraux sont analysés par spectrométrie MP-AES (Microwave Plasma-Atomic Emission Spectroscopy, Annexe 7). On obtient la quantité en P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, B. L'azote total et le carbone total sont obtenus à l'aide du NIRs (Near Infrared Spectroscopy system 6500, Annexe 8) de la marque FOSS. Ces deux derniers éléments sont régulièrement dosés en parallèle par la méthode Dumas (méthode de référence) sur le FLASH 2000.

Pour interpréter les résultats des analyses de pétioles une table, réalisées à partir des résultats de Robinson et al. (1997) et Goldspink et Howes (2001), donne des seuils en lien avec l'état de la plante. (Tableau 8) Les Limites Usuelles de Variations (LUV) sont également utilisées car elles donnent un intervalle dans lequel se situent 80% des échantillons analysés par la SRDV. Les extrêmes (> LUV+ ou < LUV-) témoignent d'un déséquilibre nutritionnel (excès ou d'un déficit d'assimilation).

b. Analyses œnologiques : baies

L'analyse de baies est faite sur un prélèvement de 200 baies (protocole en annexe 9) pesées, broyées puis la préparation est filtrée pour pouvoir être analysée. Ces prélèvements sont faits à véraison puis à maturité. Les éléments minéraux (B, Zn, Ca, Na, K, Mg, Mn, P, Cu, Fe) sont analysés par MP-AES, comme pour les pétioles. A maturité, les variables œnologiques suivantes sont analysées par IRTF (Infra-Rouge à Transformée de Fourier,

Tableau 9 : Analyses individuelles effectuées sur le moût, à véraison.

Analyse	Méthode
pH	Lecture sur pH-mètre Inolab (WTW)
Acidité totale (AT)	Titration par une solution de soude à 0,1 M pour obtenir l'acidité en g/L d'H ₂ SO ₄ .
Acides organiques: malique et tartrique	Electrophorèse Capillaire (EC)
Quantité de sucres	Lecture du Titre Alcoométrique Potentiel (TAP) sur un réfractomètre portatif à main

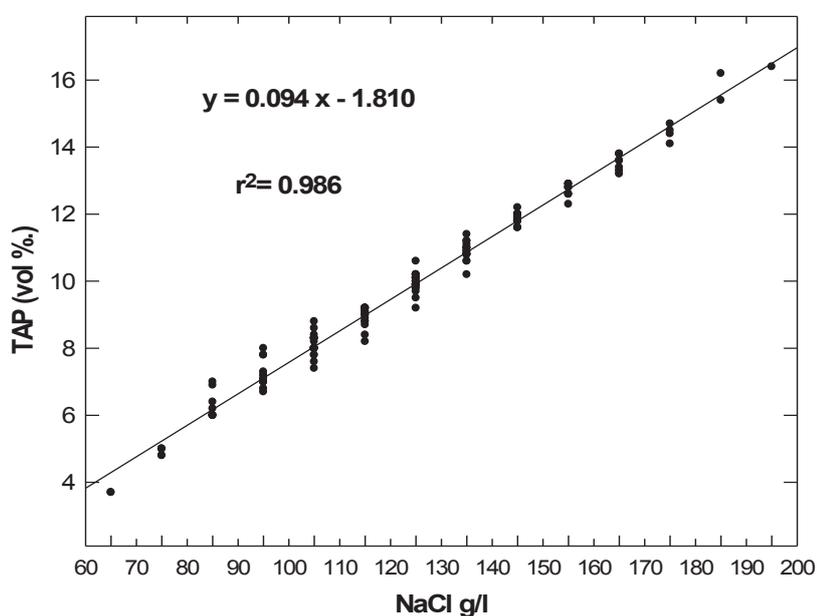


Figure 20 : Relation entre le TAP et la densité pour le tri des baies.

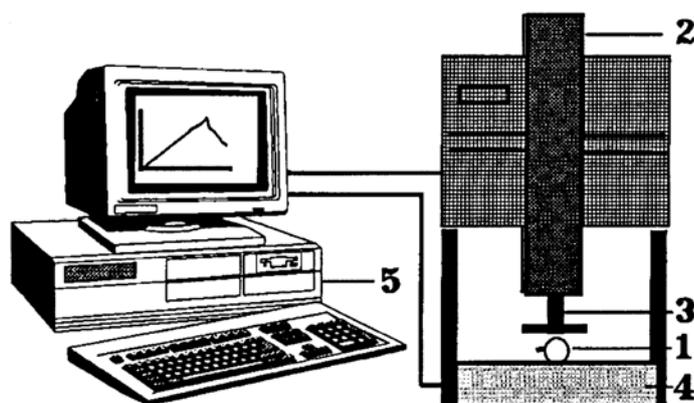


Figure 21 : Schéma du rhéomètre Pénélaup.

1. baie de raisin; 2. colonne et système de déplacement à vis sans fin asservie et vitesse variable de 0,5 à 3 mm/s; 3. mandrin et outil d'écrasement plat; 4. balance de précision; 5. ordinateur (Robin et al., 1997)

(Annexe 10) sur le WineScanFT 120 de FOSS electric : l'acidité totale (g/L de H₂SO₄), le pH, l'acide malique (g/L), le taux de sucres (g/L), l'acide tartrique (g/L), l'acide malique (g/L), le $\Delta^{13}\text{C}$ et l'azote assimilable (g/L). A véraison, des mesures individuelles doivent être effectuées car le FOSS n'est pas paramétré pour analyser des moûts à ce stade. Le tableau 9 détaille ces analyses individuelles.

c. Analyse technologique : fermeté des baies (essai calcium)

L'évolution de la fermeté est différente en fonction du cépage et des conditions environnementales et notamment des conditions hydriques lors de la maturation. Par exemple, la pellicule des baies de Syrah est moins résistante que celle des baies de Gamay. La fermeté est corrélée à la couleur des baies. La fermeté est aussi fonction du diamètre des baies. On observe un écart-type très important sur la fermeté des baies d'un échantillon autour de véraison où l'asynchronisme est maximal puis les différences se lissent. On note que le ramollissement n'est pas homogène au sein d'une baie. (Robin et al., 1997)

Pour les trois parcelles concernant l'étude sur le calcium des mesures de fermeté sont réalisées à maturité pour évaluer l'impact du calcium sur la structure de la baie. Pour analyser des baies de densités et donc de stades relativement proches (Figure 20) les baies seront trier par densité à l'aide de bains de chlorure de sodium dilué dans de l'eau. (Protocole annexe 11). Pour chaque modalité, 10 grappes auront été prélevées puis 7 baies seront prélevées par grappes. Le nombre total de baies analysées sera fonction du tri densimétrique.

Les baies de diamètre inférieur à 5 mm sont éliminées car leur comportement vis à vis de la fermeté est différent des autres baies, la fermeté étant corrélée au diamètre des baies (Carreño et al., 2015).

La mesure de fermeté est réalisée à l'aide du rhéomètre* Pénélaup™ (Figure 21). L'appareil est paramétré pour écraser la baie sur un certain pourcentage de son diamètre. Pour cet essai, l'écrasement a été réglé à 10% du diamètre. Durant l'écrasement, 10 mesures de contrainte sont effectuées à l'aide de la balance de précision en plus de la mesure finale (Fmax) à l'écrasement maximal (Xmax). Le résultat correspond à la contrainte (F) et est donné en gramme force (gf). La mesure du diamètre est effectuée en même temps que la mesure de fermeté par l'appareil Pénélaup. La fermeté est considérée comme le rapport entre la contrainte F et le déplacement X en mm. (Robin et al., 1997)

6. Echantillonnage

Les prélèvements de pétioles, de limbes et de baies ont été faits en passant dans l'inter-rang central de chaque modalité et en répartissant l'échantillonnage pour la moitié sur le rang de gauche et pour l'autre moitié sur le rang de droite. Les 10 premiers et 10 derniers ceps du rang ne sont pas prélevés pour éviter l'effet de bordure.

7. Homogénéité

Les parcelles ont été réduites pour conserver une partie homogène pour l'essai. Ont été éliminées les parties comportant une différence au niveau du sol ou des rangs qui avaient comme des zones ayant gelé en avril. L'homogénéité a été évaluée par des observations terrains, l'historique de la parcelle et l'observation du sous-sol via InfoTerre.

8. Analyses statistiques

Dans cette étude, les analyses statistiques ont été réalisées avec XLSTAT.

Pour comparer l'effet des différents traitements (apports/produits), une comparaison de variances a été effectuée lorsque des répétitions ont pu être faites sur le matériel végétal. C'était le cas pour les mesures de fermeté dans l'essai calcium et pour les mesures de développement végétatif dans l'essai phosphore. Au préalable, la normalité des résidus est vérifiée à l'aide du test Shapiro-Wilks et l'homogénéité des variances est vérifiée avec le test de Bartlett. Si l'une des conditions n'est pas remplie (normalité des résidus, homogénéité des variances), alors le test de Kruskal-Wallis est utilisé à la place de l'ANOVA (plus robuste).

Le test de Whiteness donne les résidus centrés-réduits. Cela permet de visualiser les valeurs extrêmes par rapport à l'intervalle contenant 95% des valeurs. Si nécessaire, les valeurs extrêmes qui semblent aberrantes seront éliminées et le test sera à nouveau réalisé sur les valeurs conservées.

Si l'ANOVA rejette l'hypothèse d'égalité des moyennes, le test REQWQ est réalisé pour effectuer une comparaison de moyennes et un classement des différentes modalités. Le test de REQWQ réalise une comparaison par paire et permet de classer les échantillons par groupe significativement différents. Ce test est plus fiable que Tukey et Fisher.

Le calcul de ces tests s'est fait avec une prise de risque de 5%. Les barres d'erreur des analyses statistiques correspondent aux erreurs standards alors que les barres d'erreur utilisées dans les analyses sans répétitions correspondent à l'incertitude de mesure.

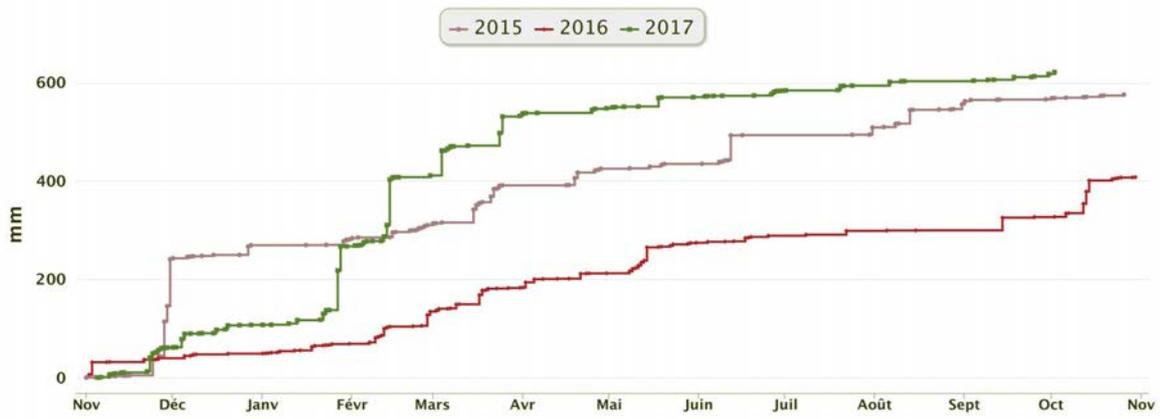


Figure 22 : Cumul des pluies sur les trois dernières années. (Station de Ferrals-les-Corbières)

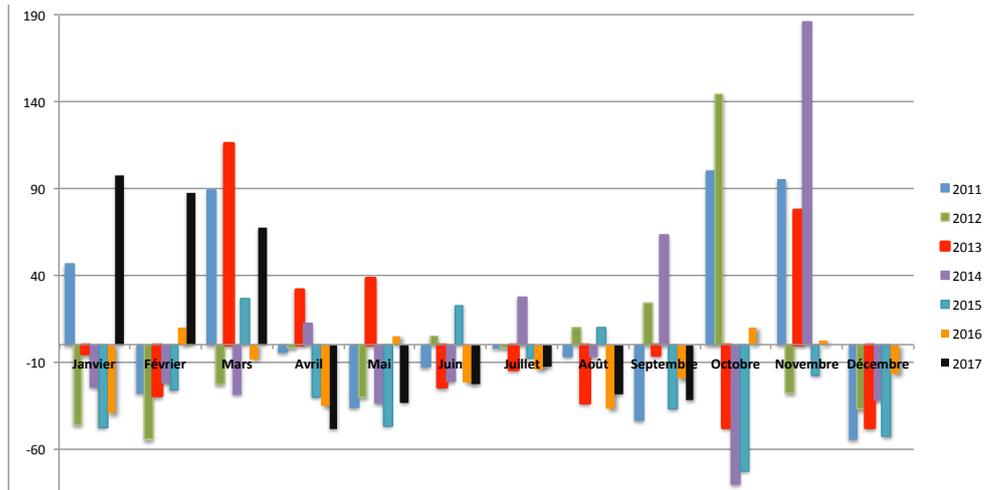


Figure 23 : Pluviométrie - écarts à la normale (moyenne des 30 dernières années) de 2011 à 2017 (en noir). (Station de Ferrals-les-Corbières)

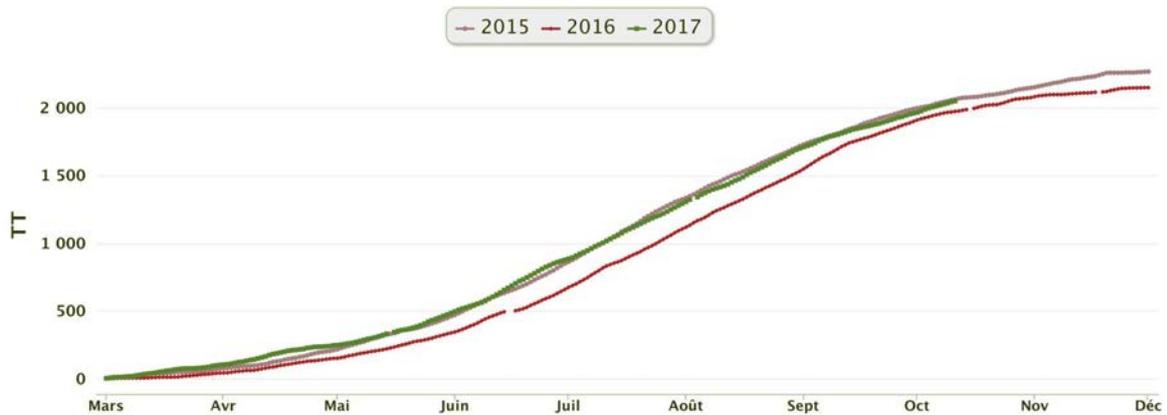


Figure 24 : Somme des températures à partir du 1^{er} mars. (Station Ferrals-les-Corbières)

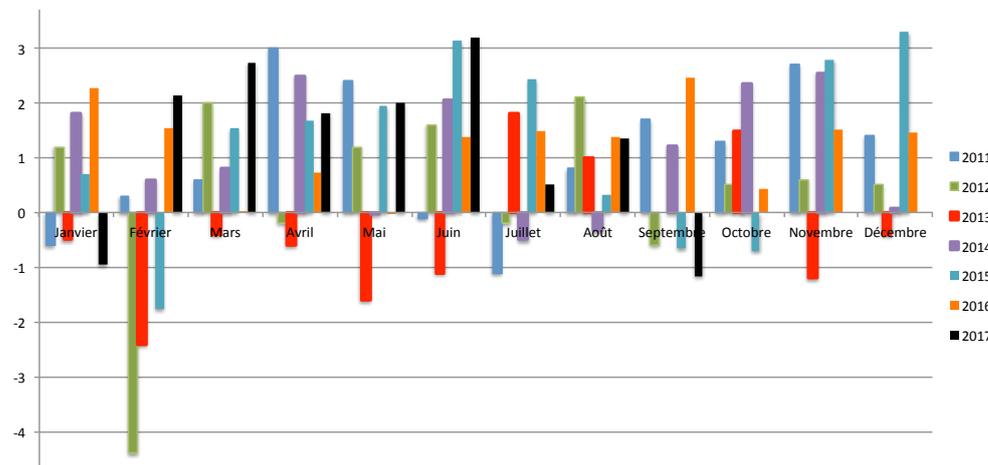


Figure 25 : Températures - écarts à la normale (moyenne des 30 dernières années) de 2011 à 2017. (Station de Ferrals-les-Corbières)

RÉSULTATS

I. Caractérisation du millésime 2017

1. Un hiver doux et pluvieux

Contrairement à l'année 2016 qui a été particulièrement sèche, 2017 a commencé par un hiver pluvieux permettant une bonne reconstitution des réserves en eau du sol. Les pluies se concentrent de septembre 2016 à mars 2017 (Figure 22 et 23). Après un mois de janvier froid, les températures ont été élevées dès le mois de février avec, en mars, jusqu'à 2,7°C de plus que la moyenne des 30 dernières années (Figure 25). Les bonnes conditions climatiques de début de saison compensent la sécheresse de 2016 qui a entraîné de faibles mises en réserve des éléments minéraux. Cet hiver doux et pluvieux a entraîné un débourrement précoce avec une bonne reprise de l'assimilation prenant le relais sur les réserves. Les sorties ont été plutôt homogènes; en revanche, elles ont pu être limitées par une initiation florale qui avait pu être impactée par la sécheresse 2016.

2. Des accidents climatiques : le gel

Deux périodes de gel ont touché le Languedoc-Roussillon fin avril dont la plus forte les 21 et 22 avril atteignant les vignes de façon hétérogène. Ce gel a pu atteindre l'extrémité des rameaux ou la totalité des pieds et donc des grappes. Les impacts sont un décalage phénologique, une architecture buissonnante et une perte de récolte plus ou moins importante.

3. Un printemps et un été chauds et secs

La précocité de 2017 a ensuite été conservée grâce aux températures chaudes des mois de juin, juillet et août avec un extrême de +3,2°C par rapport à la normale pour le mois de juin (Figure 24). Ces chaleurs entraînent un développement végétatif important soutenu par les réserves hydriques. L'été sec et les stades phénologiques s'enchaînant rapidement, les maladies sont freinées dans leur développement d'autant plus que durant la maturation, la majorité des vents provenaient du Nord-Ouest et sont donc plus secs. Malgré des réserves en eau importantes celles-ci s'épuisent en l'absence des épisodes de pluies voire d'orages pouvant arriver l'été. Certaines parcelles ont donc pu souffrir d'un stress hydrique plus important qu'attendu. Une avance de 10 à 12 jours par rapport à 2016 a été conservée jusqu'à la récolte, rappelant le millésime 2015 (Figure 24).

Ces conditions ont donné des goûts avec des degrés alcooliques potentiels élevés mais des maturations phénologiques lentes.

Aux regards des moyennes des $\Delta^{13}\text{C}$ analysés à maturité (Figure 26), la parcelle de Syrah est celle qui a subi un stress hydrique le plus important pour l'essai calcium cela est prévisible étant donné que les deux autres parcelles bénéficient de l'irrigation. Sur le graphique de suivi hydrique de la parcelle de Viognier (Figure 27), on observe que la parcelle est maintenue avec un stress hydrique faible à modéré. Entre les deux parcelles de Merlot, Le Jardin est celle qui a le moins souffert du stress hydrique, cela peut s'expliquer par l'irrigation qui a été plus importante sur celle-ci.

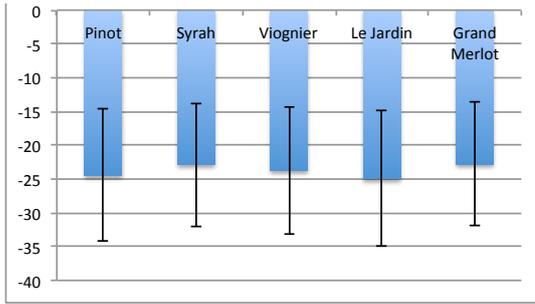


Figure 26 : Résultats $\Delta^{13}C$ des analyses sur les cinq parcelles.

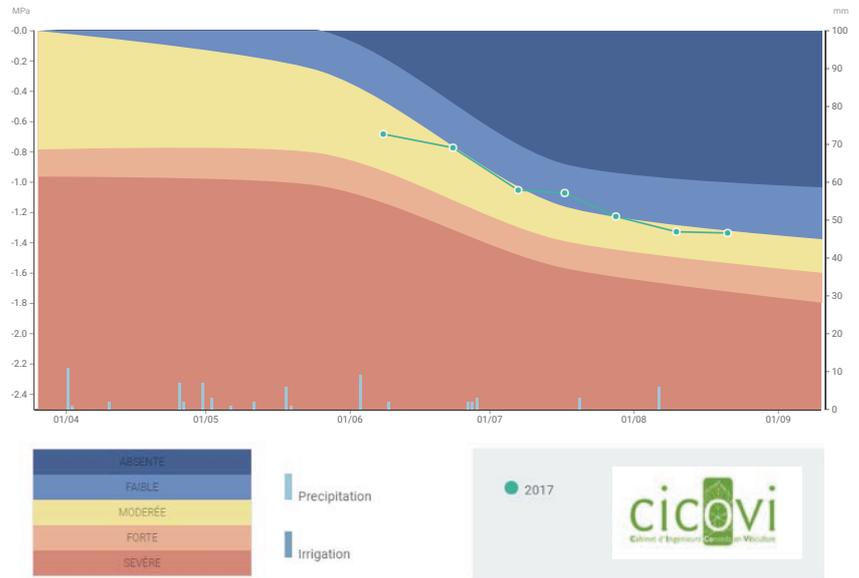


Figure 27 : Suivi hydrique de la parcelle de Viognier. Source : Cicovi

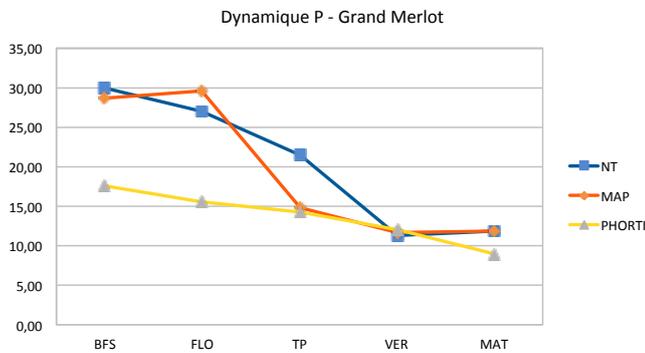


Figure 28 : Assimilation du phosphore (en mg/100 pétioles) sur la saison sur les parcelles de l'essai phosphore.

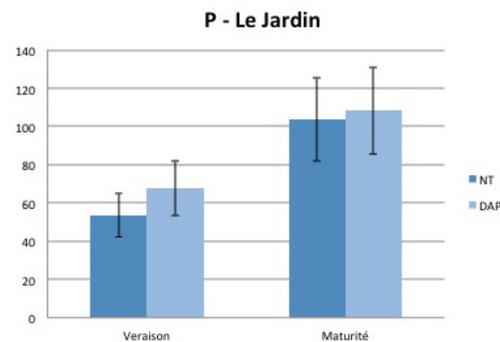
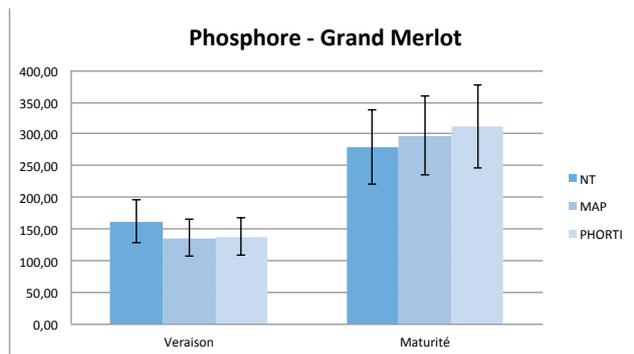


Figure 29 : Quantités de phosphore contenues dans les limbes (en mg/100 limbes) sur les parcelles de l'essai phosphore.

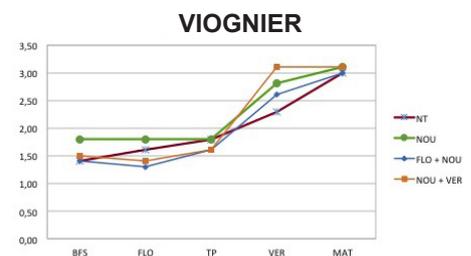
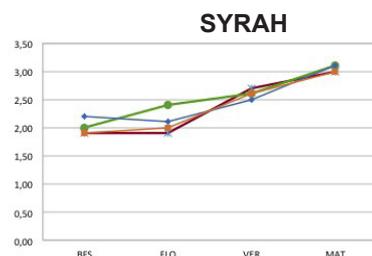
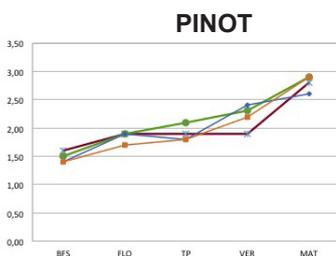


Figure 30 : Assimilation du calcium (en % de MS) sur la saison sur les 3 parcelles étudiées et pour les 4 modalités.

II. Composition minérale des pétioles et des limbes

1. Phosphore

La parcelle Le Jardin ayant été récoltée avant le dernier prélèvement nous n'avons pas de résultats pour les pétioles et les limbes à maturité. En revanche nous avons pu obtenir des moûts des modalités séparées.

a. Assimilation des minéraux

Concernant l'assimilation du phosphore sur la saison elle est décroissante.

Sur la parcelle Grand Merlot, avant le premier apport, la modalité Phorti contenait beaucoup moins de phosphore dans les pétioles que les deux autres modalités. Cependant ces deux modalités ont vu leur quantité de phosphore diminuer jusqu'au niveau de la modalité Phorti à véraison. (Figure 28) Les différences à maturité ne permettent pas d'en déduire une différence entre les modalités.

Sur la parcelle Le Jardin, la teneur en phosphore de la modalité DAP est supérieure à la modalité NT pour trois stades excepté pour le stade TP. Les différences ne sont pas significatives et la différence n'augmente pas par rapport à BFS. Or à ce stade aucun apport n'avait encore été effectué.

Parmi les éléments minéraux (Annexe 12), les résultats ne permettent pas de mettre en avant des synergies ou antagonismes étant donné les variations observées entre deux stades et les tendances qui s'inversent entre véraison et maturité.

b. Composition minérale des limbes (Annexe 13)

Alors qu'à véraison la modalité NT contenait plus de phosphore dans les limbes, c'est l'inverse que l'on observe à maturité sur Grand Merlot. En revanche, sur Le Jardin, pour les deux stades on observe une teneur supérieure en phosphore pour la modalité traitée (Figure 29). Cependant les différences ne sont pas significatives.

2. Calcium

a. Assimilation des minéraux

Les analyses pétiolaires montrent une assimilation du calcium croissante au cours du cycle. Lorsque l'on compare l'assimilation du calcium pour les trois parcelles, il n'apparaît aucune différence notable entre les modalités. A véraison, la modalité NT est celle qui contient le moins de calcium dans les pétioles pour le Vioignier et le Pinot mais ce n'est pas le cas pour la Syrah. (Figure 30)

Parmi les interactions possibles avec les autres minéraux, si l'on considère les résultats sur les trois parcelles, aucun antagonisme ni synergie n'apparaît dans la dynamique des éléments. (Annexe 14)

b. Composition minérale des limbes

Les différences entre modalités ne sont pas significatives. Aucune tendance n'est visible au niveau des modalités. (Figure 31) On peut remarquer que la quantité de calcium dans les limbes augmente entre véraison et maturité montrant une possible accumulation. Les autres minéraux ne montrent aucune tendance sur l'ensemble des 3 parcelles. (Annexe 15)

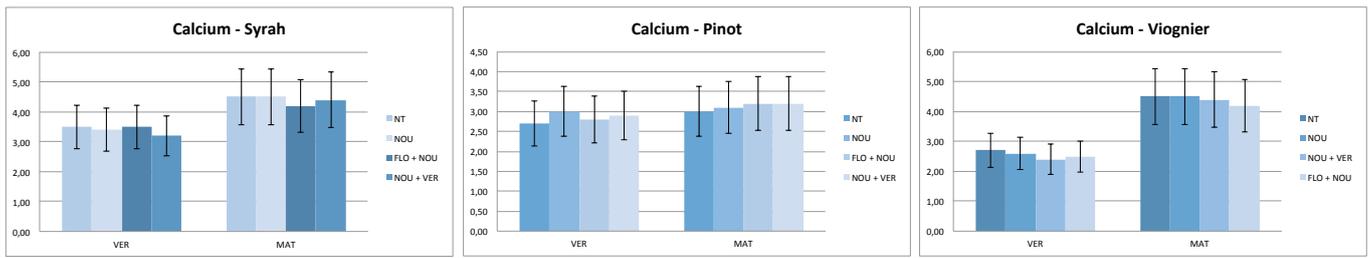


Figure 31 : Teneur en calcium (en % de MS) dans les limbes sur les 3 parcelles étudiées et pour les 4 modalités.

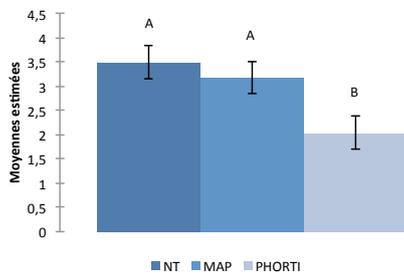


Figure 32 : Moyennes des valeurs de LAI mesurées sur la parcelle Grand Merlot.

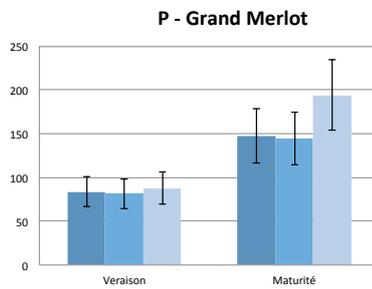


Figure 33 : Quantités de phosphore contenues dans les baies (en mg/L) sur la parcelle de Grand Merlot.

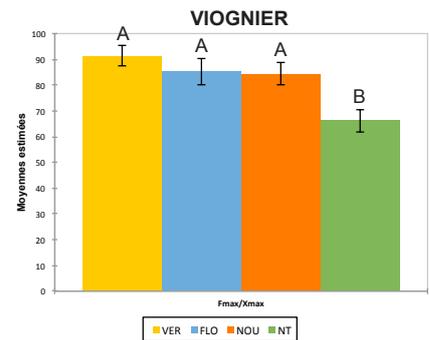
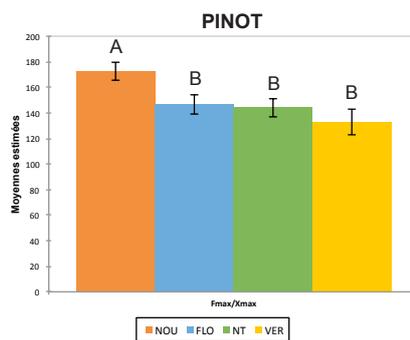
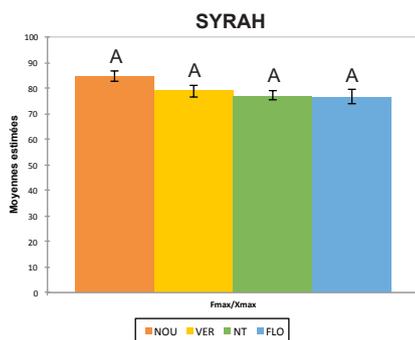
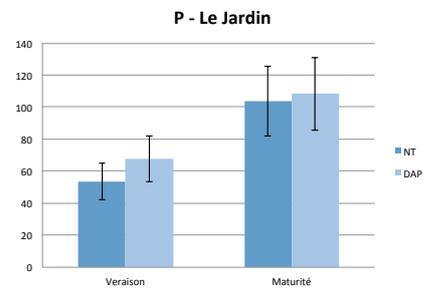


Figure 34 : Résultats du classement des modalités après comparaison multiple par paire pour la fermeté des baies sur les trois parcelles étudiées.

Notation des modalités :

NT : Non traité, NOU : apport à NOU/TP, VER : apport à NOU/TP + VER, FLO : apport à NOU/TP + FLO

III. Indicateurs physiologiques et œnologiques

1. Phosphore

a. Impact sur la croissance

• Croissance des rameaux secondaires

Les rameaux ayant conservé une croissance après le stade véraison ont été trop peu nombreux (3) pour être exploités sur la parcelle Le Jardin. Sur la parcelle Grand Merlot, l'élongation mesurée sur les ramifications secondaires entre les stades VER et FLO n'ont pas permis de montrer une différence entre les modalités. (Annexe 16)

• Développement végétatif

D'après l'analyse statistique réalisée sur la mesure de LAI et de porosité, il n'existe aucune différence significative entre les modalités pour la parcelle Le Jardin. En revanche, la parcelle Grand Merlot montre des différences significatives entre la modalité PHORTI et les modalités NT et MAP pour les 4 stades étudiés. Si l'on considère seulement la différence entre le premier et le dernier stade (VER-BFS) afin de limiter l'effet de l'hétérogénéité parcellaire, la modalité PHORTI reste significativement différente de la modalité NT pour la surface foliaire avec une moyenne inférieure pour la modalité PHORTI (Figure 32). (Annexe 17)

b. Impact œnologique

Le phosphore apporté par la formulation Phorti entraîne une quantité plus importante de phosphore dans les baies contrairement aux autres modalités. Sur la parcelle Le Jardin, le modalité DAP montre une teneur en phosphore plus importante dans les baies que pour la modalité NT. Ces différences ne sont pas significatives. (Figure 33) Aucune différence ne se dégage des analyses des différents éléments des moûts. On note que sur les éléments Na, Ca, Zn, Mg, K, la modalité Phorti semble être plus favorable à leur concentration dans les baies, à l'inverse de la modalité MAP. (Annexe 18) Au niveau des caractéristiques œnologiques (AT, TAVP, pH, acide malique, acide tartrique), les modalités traitées ne semblent pas avoir d'effet.

2. Calcium

a. Impact sur la fermeté des baies

Les résultats concernant la fermeté des baies en fonction des apports en calcium diffèrent d'une parcelle à une autre. (Figure 34) (Annexe 19)

- Sur la Syrah, sensible au flétrissement, les analyses ne montrent pas de différences significatives entre les 4 modalités. On remarque cependant que la modalité NOU, qui a donc reçu un seul apport de calcium (autour des stades NOU/TP), est la modalité pour laquelle la fermeté semble la plus forte.
- Sur le Pinot, encore une fois la modalité NOU montre une fermeté de baies supérieure aux autres modalités mais avec, cette fois, une différence significative.
- Sur le Viognier, la modalité VER est celle qui donne le plus de fermeté à la baie mais sans différence significative par rapport aux autres apports. La modalité non traitée est en revanche significativement différente des 3 autres.

Concernant l'effet sur le Botrytis sur le Viognier qui est sensible, cela n'a pas pu être évalué cette année. En effet, 2017 n'a pas été une année à forte pression *Botrytis*, la

Modalité	Ac. gluco.	Glycérol	Ac. citr.	N ass.	Glu+Fruc	Ac. Tartr.	pH
NT	-0,001	0,6	0,03	215,21	195	4,11	3,62
NOU	-0,001	-0,001	0	299,331	217	4,7	3,86
VER	-0,001	0,52	0,03	257,508	223	5,06	3,83
FLO	-0,001	0,53	0,01	207,63	214	4,57	3,86

Figure 35 : Quantités en g/L d'acide gluconique, de glycérol et d'acide citrique mesurées à maturité dans les moûts de Viognier.

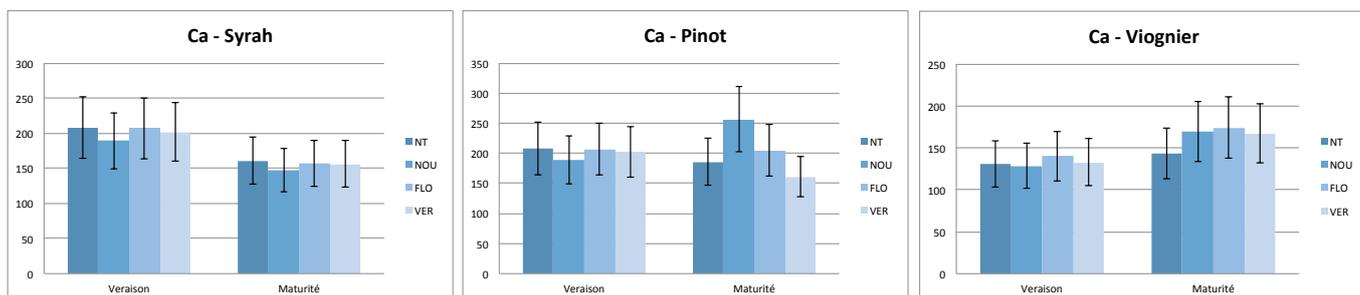


Figure 36 : Teneur en calcium (mg/L) dans les baies sur les 3 parcelles étudiées et pour les 4 modalités.

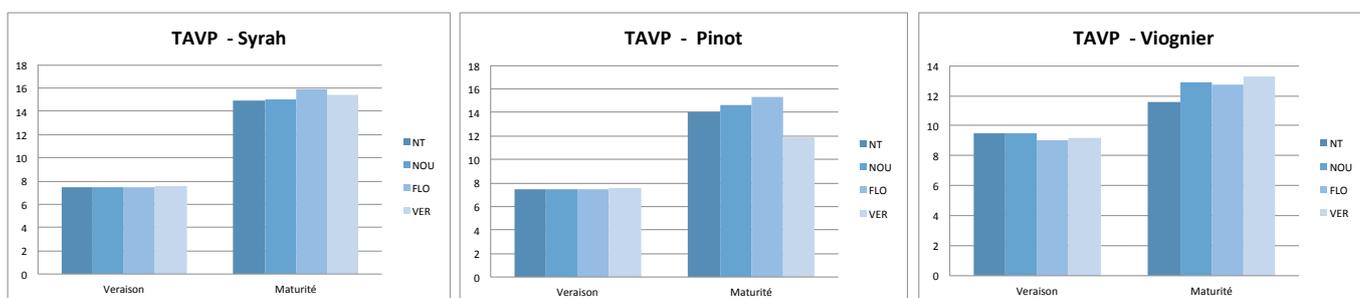


Figure 37 : TAVP (%vol.) dans les baies sur les 3 parcelles étudiées et pour les 4 modalités.

chaleur et l'été sec ayant empêché son développement. Sur l'analyse des moûts à maturité, on peut cependant observer les teneurs en acide gluconique, glycérol et acide citrique qui augmentent lors d'une attaque de *Botrytis*. (Dienes-Nagy et al., 2011) Sur les moûts de Viognier à maturité, les différences entre modalités se situent au niveau du glycérol et de l'acide citrique (Figure 35). On remarque que la modalité NOU a moins développé ces molécules que les autres modalités et particulièrement pour le glycérol dont la teneur pour des baies saines est inférieure à 0,02 g/L. (Dienes-Nagy et al., 2011) On peut également observer l'azote assimilable, les sucres et l'acide tartrique qui sont consommés par *Botrytis cinerea* (Figure 35). La modalité NT est celle qui contient le moins de sucres et d'acide tartrique, VER en contient le plus. En revanche le pH est peu impacté. Les modalités FLO et NT sont celles qui ont le moins d'azote assimilable et NOU en contient le plus. La modalité NT semble être celle qui pourrait être la plus touchée par *Botrytis*, à l'inverse, NOU serait la moins touchée. Ce constat rejoint les observations concernant la fermeté des baies ou la modalité NT donnait moins de fermeté des baies.

b. Impact œnologique

Concernant les analyses réalisées sur les moûts, si l'on regarde l'ensemble des trois parcelles (Figure 36), le calcium ne semble pas avoir d'effet sur le pH ou l'acidité totale. Les trois parcelles montrant des profils à chaque fois différents pour les modalités. On peut toutefois remarquer que la modalité VER donne une AT à chaque fois plus élevée que NT à maturité.

Le TAVP mesuré à maturité montre que la modalité NT est inférieure aux modalités traitées (excepté pour la modalité VER du Pinot). (Figure 37) Cependant ces différences ne sont pas significatives.

Le pH et la teneur en K ne montrent aucune différence à véraison et à maturité entre les 4 modalités. (Annexe 20)

DISCUSSION

I. Phosphore

• **L'absorption de phosphore est-elle corrélée à la quantité absorbée ? Existe-t-il des différences d'efficacité entre les produits utilisés ?**

Aucun lien ne peut être établi entre l'apport foliaire de phosphore et la quantité assimilée puis stockée. Concernant les produits utilisés, seul la parcelle Grand Merlot a reçu des produits différents : MAP et Phorti. Les différences ne sont pas notables. On peut supposer que le phosphore n'est pas ou mal absorbé par voie foliaire. La concentration des produits peut être trop faible pour observer un impact significatif. On peut aussi remettre en cause les formulations et notamment les adjuvants qui pourraient être améliorés pour une meilleure pénétration et/ou un meilleur étalement du produit sur les feuilles. La pulvérisation peut aussi ne pas être idéale au niveau des réglages (hauteur et direction de pulvérisation, taille des gouttes, puissance pour la pénétration du feuillage).

• **L'apport de phosphore impacte-t-il l'assimilation des autres éléments ?**

D'après les observations faites sur les analyses pétiolaires puis les limbes, il n'est pas possible d'en déduire des éventuelles synergies ou antagonismes. Etant donné que nous n'observons pas de différences dans les assimilations du phosphore, il semble que le phosphore n'ait pas été absorbé et aucune interaction liée à cet apport de phosphore n'a pu avoir lieu.

• **Le phosphore impacte-t-il le développement végétatif de la vigne ?**

Les analyses statistiques ne montrent pas de différences significatives excepté pour la modalité Phorti. Cependant la différence sur la modalité PHORTI ne peut être prise en compte car elle apparaît dès le stade BFS or le premier apport a été réalisé après le premier prélèvement. Cette différence est probablement liée à une hétérogénéité de la parcelle. En effet, le développement végétatif de cette troisième modalité a été plus faible durant la saison ce qui peut être lié au sol, plus sableux sur cette partie. Ce constat est confirmé par l'analyse de LAI qui montre une surface foliaire inférieure aux autres modalités. Il aurait été possible de mesurer cette hétérogénéité en amont afin de réduire la surface d'essai et de se concentrer sur des rangs homogènes.

• **Le phosphore modifie-t-il la composition des baies et des moûts ?**

Il semble que l'apport de DAP permet d'augmenter le phosphore contenu dans les moûts ce qui montrerait que l'apport entraînerait une hausse de l'assimilation mais celle-ci n'est pas visible dans les pétioles. De même pour la modalité Phorti qui accroît la teneur en phosphore dans les baies alors que le constat inverse est fait au niveau des pétioles. On peut se demander si le faible développement végétatif a un impact sur le développement des baies entraînant éventuellement une concentration du phosphore. On peut également supposer que le phosphore est difficilement absorbé par voie foliaire mais qu'une certaine quantité pénètre les baies via la pellicule.

Aucune différence sur la composition des moûts ne peut être mise en avant.

Pour toutes les analyses, le protocole pourrait être amélioré en établissant des répétitions pour apporter du poids au résultat.

II. Calcium

Sur la parcelle de Viognier, il faut préciser qu'une partie avait été gelée réduisant la surface expérimentale. A cela s'ajoute le faible nombre de grappes réduisant le nombre de pétioles et de limbes pouvant être prélevés. Les résultats concernant cette parcelle seront à nuancer.

• L'apport foliaire de calcium entraîne-t-il une hausse de son assimilation au niveau des pétioles et des limbes ?

Cette étude ne permet pas de montrer une meilleure assimilation du calcium liée à l'apport foliaire. Comme pour le phosphore, on peut supposer des difficultés d'assimilation, des formulations ou une pulvérisation peu adaptée à une bonne absorption du produit.

Les réserves en eau du sol ont été importantes cette année, favorisant une bonne assimilation du calcium. On peut supposer que la plante a pu absorber suffisamment de calcium dans les sols ce qui n'a pas permis de distinguer les différents apports.

• L'apport foliaire de calcium augmente-t-il la quantité que l'on retrouve dans les baies ?

L'apport foliaire de calcium n'a pas permis de montrer une augmentation des teneurs en calcium dans les limbes ni les baies.

• Quels sont les effets sur les baies ?

L'augmentation d'AT sur la modalité VER à maturité pose une question à laquelle il faudrait répondre en réalisant un essai avec des répétitions : l'apport à véraison agit-il sur l'acidité des moûts ? Comme nous l'avons vu dans la bibliographie il semble que le calcium allonge la maturité des baies, retardant ainsi la dégradation des acides. Cela pourrait expliquer une conservation supérieure de l'acidité.

On remarque un effet possible du calcium sur le TAVP à maturité avec la modalité NOU qui donne un TAVP plus important. Cela va à l'encontre de la bibliographie qui indique un effet du calcium sur une prolongation de la maturité. Cette analyse serait à reproduire pour voir si l'effet est confirmé ou non dans ce sens. On peut supposer que le calcium agit au niveau osmotique dans la baie lors du chargement en sucres.

• La fermeté des baies augmente-t-elle avec un apport de calcium ?

Bien que les différences ne soient significatives que pour le Viognier, il semble que les apports de calcium permettent une légère augmentation de la fermeté. Entre les 3 modalités traitées, malgré une attente d'avoir un gain plus important sur les modalités traitées 2 fois, c'est l'apport unique qui donne le plus de fermeté : l'apport fait à nouaison/taille de pois.

Le fait que sur la Syrah aucune différence significative n'apparaisse peut être dû à la faible concentration en calcium du produit Megagreen. A noter également que l'apport effectué à floraison a été suivi d'une légère pluie le soir pouvant lessiver en partie le calcium apporté.

Sur le Pinot la différence significative pour la modalité NOU est également visible sur les 10 grappes prélevées qui apparaissent plus flétries pour le NT.

III. Limites de l'étude et pistes d'amélioration

Concernant les deux essais, le fait d'avoir des tendances différentes selon les parcelles peut être dû à un effet pédologique, du matériel végétal ou du mode de conduite qui s'ajoute à l'effet produit utilisé. Il n'était donc pas possible de considérer les parcelles comme des répétitions d'autant plus que les problématiques étaient différentes en fonction des parcelles.

• **Durée et étendue de l'étude :**

Cette étude est valable pour la parcelle étudiée donc dans son contexte local et pour l'année 2017. Pour des raisons pratiques le dispositif ne comporte pas de répétitions ce qui limite le poids des résultats. La limitation à une situation ne permet pas d'extrapoler de façon solide les résultats pour une préconisation à une autre parcelle. L'essai pourrait à nouveau être mis en place avec des répétitions. Reconduire l'essai sur au minimum 3 années permettrait de limiter l'effet millésime.

• **Choix des modalités :**

Il pourrait être intéressant d'augmenter les concentrations appliquées pour voir si un effet apparaît à partir d'une certaine dose. Cependant cela est limité par le risque de brûlure engendré par une bouillie trop concentrée. Afin d'augmenter la concentration un essai en fertirrigation pourrait être fait sur le calcium (un essai en fertirrigation ayant déjà été réalisé pour le phosphore).

Il existe également d'autres produits utilisables en foliaire qui pourraient être testés.

• **Indicateurs étudiés :**

Concernant l'analyse de fermeté l'hétérogénéité de la baie n'a pas été prise en compte. Pour cela il aurait fallu faire 3 mesures par baie sur la position équatoriale en tournant la baie 1/3 de tour.

Le dosage du calcium pourrait être fait en ne considérant que la pellicule, puisque c'est la pellicule qui nous intéresse principalement, en utilisant la méthode des Glories. De plus, pour mettre en relation les apports avec les effets potentiels sur cette pellicule, l'appareil d'analyse de fermeté (Penelaup) pourrait être utilisé en tant que pénétromètre afin de mesurer la résistance de la pellicule. Une alternative aurait été de réaliser un écrasement jusqu'à l'éclatement de la baie pour approcher cette résistance de la pellicule.

• **Répétitions et traitements statistiques :**

Malgré des répétitions sur les mesures de développement végétatif, ceux-ci ont pu être insuffisants sur l'essai phosphore. Sur l'essai calcium, le tri des baies a réduit considérablement le nombre de baies par échantillon et cela n'a pas permis d'avoir toutes les populations suivant la loi normale.

CONCLUSION

Dans cette étude il a été testé des apports de phosphore et de calcium en foliaire afin d'analyser leurs effets agronomiques et œnologiques. Le but étant de tester cette fertilisation directement au champ pour mesurer les impacts en condition réelle.

Nous avons vu qu'il est difficile de conclure sur l'équilibre minéral n'ayant pas de répétitions des prélèvements. Cette étude ne montre pas d'effet d'un apport foliaire de phosphore sur l'équilibre minéral de la vigne ni sur le développement végétatif de celle-ci. L'essai réalisé l'an dernier montrait déjà une absence d'effet d'une fertirrigation en phosphore. La fertilisation foliaire de phosphore semblait pourtant être une bonne alternative étant donné que le phosphore est peu mobile dans le sol.

L'essai calcium n'a pas permis de mettre en évidence une augmentation de calcium dans les pétioles ni les limbes. Toutefois l'impact sur la fermeté des baies a été observé sur deux parcelles suite à un apport à nouaison. Cet effet reste trop faible pour baser des préconisations sur ces résultats. La contrainte de la pulvérisation foliaire de calcium devant se faire sans mélange s'ajoute à ces manques de résultats limitant aujourd'hui l'intérêt d'un tel apport par les viticulteurs.

Les conditions climatiques 2017 ont pourtant permis de bonnes assimilations minérales avec des réserves hydriques importantes nécessaires au calcium. A ce stade, il est difficile de conclure sur l'effet de l'un ou l'autre des apports. Ces essais devront se poursuivre dans les années à venir pour évaluer solidement des potentiels effets du calcium et du phosphore sur la vigne.

Les avantages agronomiques de la fertilisation foliaire ont été mis en évidence pour des éléments minéraux tels que l'azote ou le magnésium. Cette voie d'apports de minéraux s'inscrit dans une démarche d'utilisation plus raisonnée des intrants en permettant de pulvériser directement sur les organes cibles et en permettant de répondre à des besoins instantanés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Publications

- Aigrain, Patrick, Hervé Hannin, et Julien Vert. 2013. « Perspectives d'évolution de la filière vitivinicole dans la région Languedoc-Roussillon à l'horizon 2025 ». 55, mars, Centre d'études et de prospective édition.
- Anghinoni, I., et S. A. Barber. 1980. « Phosphorus Influx and Growth Characteristics of Corn Roots as Influenced by Phosphorus Supply ». *Agronomy Journal* 72 (4): 685-88. doi:10.2134/agronj1980.00021962007200040028x.
- Attia, Faouzi. 2007. « Effet du stress hydrique sur le comportement écophysologique et la maturité phénolique de la vigne *Vitis vinifera* L.: étude de cinq cépages autochtones de Midi-Pyrénées ». Thèse.
- Baillod, M, et M Bagglioni. 1993. « Les stades repères de la vigne ». *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture*, no 25: 7-9.
- Barnes, Howard A., John Fletcher Hutton, et Kenneth Walters. 1989. *An Introduction to Rheology*. Elsevier.
- Barroin, Guy. 2004. « Phosphore, azote, carbone... du facteur limitant au facteur de maîtrise ». *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, no 52 (septembre).
- Bertamini, Massimo, Krishnasamy Muthuchelian, et Namachevayam Nedunchezian. 2002. « Iron deficiency induced changes on the donor side of PS II in field grown grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) leaves ». *Plant Science* 162 (4): 599-605. doi:10.1016/S0168-9452(01)00604-5.
- Besnard, Elisabeth, Francis Laffargue, François Relhié, Faouzi Attia, Marc Garcia, et Thierry Lamaze. 2013. « Comportements écophysologique, métabolique et nutritionnel du Cot N (ou Malbec N) soumis au stress hydrique et incidence sur la qualité des moûts et des vins ». IFV.
- Buescher, R. W., J. M. Hudson, et J. R. Adams. 1979. « Inhibition of Polygalacturonase Softening of Cucumber Pickles by Calcium Chloride ». *Journal of Food Science* 44 (6): 1786-87. doi:10.1111/j.1365-2621.1979.tb09143.x.
- Caffall, Kerry Hosmer, et Debra Mohnen. 2009. « The Structure, Function, and Biosynthesis of Plant Cell Wall Pectic Polysaccharides ». *Carbohydrate Research* 344 (14): 1879-1900. doi:10.1016/j.carres.2009.05.021.
- Calmés, Jean, et Jules Carles. 1970. « La répartition et l'évolution des cristaux d'oxalate de calcium dans les tissus de Vigne vierge au cours d'un cycle de végétation ». *Bulletin de la Société Botanique de France* 117 (5-6): 189-97. doi:10.1080/00378941.1970.10838762.
- Camberato, J. J., et W. L. Pan. 2000. « Bioavailability of calcium, magnesium, and sulfur. » In *Handbook of soil science*, 53-61.
- Cangahuala-Inocente, Gabriela Claudia, Maguida Fabiana Da Silva, Jean-Martial Johnson, Anicet Manga, Diederik van Tuinen, Céline Henry, Paulo Emilio Lovato, et Eliane Dumas-Gaudot. 2011. « Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Elicits Proteome Responses Opposite of P-Starvation in SO4 Grapevine Rootstock upon Root Colonisation with Two Glomus Species ». *Mycorrhiza* 21 (6): 473-93. doi:10.1007/s00572-010-0352-0.
- Carreño, Iván, José Antonio Cabezas, Celia Martínez-Mora, Rosa Arroyo-García, José Luis Cenís, José Miguel Martínez-Zapater, Juan Carreño, et Leonor Ruiz-García. 2015. « Quantitative Genetic Analysis of Berry Firmness in Table Grape (*Vitis Vinifera* L.) ». *Tree Genetics & Genomes* 11 (1). doi:10.1007/s11295-014-0818-x.
- Champagnol, François. 1984. *Elements de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. [Montpellier] Saint-Gely-du-Fesc: Déhan.
- Chardonnet, C., et B. Donèche. 1995. « Relation entre la teneur en calcium et la résistance à la digestion enzymatique du tissu pelliculaire au cours de la maturation du raisin ». *Vitis*, no 34: 95-98.
- Chardonnet, C., H. Gomez, et B. Donèche. 1994. « Evolution des polyosides des parois cellulaires au cours du développement du raisin ». *Vitis*, no 33: 69-74.

- Chen, L.-S., B. R. Smith, et L. Cheng. 2004. « CO₂ assimilation, photosynthetic enzymes, and carbohydrates of "Concord" grape leaves in response to iron supply ». *Journal of the American Society for Horticultural Science* 129 (5): 738-44.
- Chéour, F., C. Willemot, J. Arul, Y. Desjardins, J. Makhlof, P.M. Charest, et A. Gosselin. 1990. « Foliar Application of Calcium Chloride Delays Postharvest Ripening of Strawberry ». *Journal of the American Society for Horticultural Science* 115 (5): 789-92.
- Christensen, P. 2005. Use of tissue analysis in viticulture. *Proceedings of Varietal Winegrape Production Short Course*.
- Clarkson, David T. 1984. « Calcium Transport between Tissues and Its Distribution in the Plant ». *Plant, Cell & Environment* 7 (6): 449-56. doi:10.1111/j.1365-3040.1984.tb01435.x.
- Conradie, W.J. 1980. « Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc in sand culture : I. Nitrogen ». *South African Journal of Enology and Viticulture* 1, sect. 59-65.
- Conway, William S., Carl E. Sams, et Arthur Kelman. 1994. « Enhancing the natural resistance of plant tissues to postharvest diseases through calcium applications ». *HortScience* 29 (7): 751-54.
- Coombe, B.g., et M.g. McCARTHY. 2000. « Dynamics of Grape Berry Growth and Physiology of Ripening ». *Australian Journal of Grape and Wine Research* 6 (2): 131-35. doi:10.1111/j.1755-0238.2000.tb00171.x.
- Crespy, André. 2005. *Viticulture et pathologie: éléments pour une viticulture raisonnable*. Chaintré: Oenoplurimédia.
- D T Clarkson, et J. B. Hanson. 1980. « The Mineral Nutrition of Higher Plants ». *Annual Review of Plant Physiology* 31 (1): 239-98. doi:10.1146/annurev.pp.31.060180.001323.
- Davies, Christopher, Paul K. Boss, et Simon P. Robinson. 1997. « Treatment of Grape Berries, a Nonclimacteric Fruit with a Synthetic Auxin, Retards Ripening and Alters the Expression of Developmentally Regulated Genes ». *Plant Physiol.*, no 115: 1155-61.
- De Bei, Roberta, Sigfredo Fuentes, Matthew Gilliam, Steve Tyerman, Everard Edwards, Nicolò Bianchini, Jason Smith, et Cassandra Collins. 2016. « VitiCanopy: A Free Computer App to Estimate Canopy Vigor and Porosity for Grapevine ». *Sensors* 16 (5): 585. doi:10.3390/s16040585.
- Deloire, Alain. 2007. « Les éléments minéraux et l'azote ». *Observatoire viticole du département de l'hérault*.
- Dienes-Nagy, Agnès, Sandrine Belcher, Katia Gindro, et Pierre-Henri Dubuis. 2011. « Indices sanitaires et marqueurs chimiques pour évaluer l'état sanitaire du raisin. 2. Marqueurs chimiques de la pourriture grise ». *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture*, no 43: 234-42.
- Donèche, B., et C. Chardonnet. 1992. « Evolution et localisation des principaux cations au cours du développement du raisin ». *Vitis*, no 31: 175-81.
- Ferguson, I. B. 1984. « Calcium in plant senescence and fruit ripening ». *Plant, cell and environment*, no 7: 477-89.
- FranceAgriMer. 2014. « La filière viti-vinicole en Languedoc-Roussillon : Chiffres-clés et représentations / Focus sur le potentiel de production - 2004 à 2013 - Observatoire de la viticulture française ». http://www.observatoire-viti-france.com/publications/view/9306?open_inline=1.
- Garcia, M., C. Daverede, P. Gallego, et M. Toumi. 1999. « Effect of Various Potassium/calcium Ratios on Cation Nutrition of Grape Grown Hydroponically ». *Journal of Plant Nutrition* 22 (3): 417-25. doi:10.1080/01904169909365639.
- Garcia-Parpet, Marie-France. 2007. « Mondialisation et transformations du monde viticole : processus de reclassement des vins du Languedoc-Roussillon ». *Sociétés contemporaines* 68 (4): 37. doi:10.3917/soco.068.0037.
- Grant, C. A., D. N. Flaten, D. J. Tomasiewicz, et S. C. Sheppard. 2011. « The Importance of Early Season Phosphorus Nutrition ». *Canadian Journal of Plant Science*, mars. doi:10.4141/P00-093.
- Hanger, B. C. 1979. « The Movement of Calcium in Plants ». *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10 (1-2): 171-93. doi:10.1080/00103627909366887.
- Heale, J. B. 1985. « The phytotoxicity of Botrytis cinerea. » *Proceedings of EC Experts Group Meeting*, 277-99.
- Hopkins, William G, et Charles-Marie Évrard. 2003. *Physiologie végétale*. Bruxelles: De Boeck.
- Huglin, Pierre. 1986. *Biologie et écologie de la vigne*. Lausanne : Paris: Payot ; Lavoisier.
- Hultberg, B., A. Lundblad, P. K. Masson, et P. A. Ockerman. 1975. « Specificity Studies on Alpha-Mannosidases Using Oligosaccharides from Mannosidosis Urine as Substrates ». *Biochimica Et*

Biophysica Acta 410 (1): 156-63.

- Iacono, F. 1986. « Foliar uptake and grape fertilization ». Terra e Vita 16.
- Jade International. 2014. « Fiche technique Vitalim® vigne : La maîtrise optimisée dans le temps du couple calcium / magnésium ».
- Jones, L., J. L. Milne, D. Ashford, et S. J. McQueen-Mason. 2003. « Cell Wall Arabinan Is Essential for Guard Cell Function ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100 (20): 11783-88. doi:10.1073/pnas.1832434100.
- Lacroix, Michel. 1999. « Nutrition en calcium. Problèmes et prévention ». Laboratoire de diagnostic en phytoprotection. Québec.
- Laroche, Manon. 2005. « Calcium : avantages ou inconvénients ? » Bulletin d'information n°06 - Pommier, Réseau d'avertissements phytosanitaires édition.
- Marschner, Horst. 2011. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
- Medici, Anna. 2016. « Physiologie des nutriments. Nutrition minérale de la vigne. Nutrition organo-minérale. » Supagro.
- Mengel, Konrad, et Ernest A. Kirkby. 1982. *Principles of Plant Nutrition*, 3rd Edition.
- Morlat, René, et Alain Jacquet. 2003. « Grapevine Root System and Soil Characteristics in a Vineyard Maintained Long-Term with or without Interrow Sward ». *American Journal of Enology and Viticulture* 54 (1): 1-7.
- Mortimer, P. E., E. Archer, et A. J. Valentine. 2005. « Mycorrhizal C Costs and Nutritional Benefits in Developing Grapevines ». *Mycorrhiza* 15 (3): 159-65. doi:10.1007/s00572-004-0317-2.
- Nunan, Kylie. 1999. « Cell wall metabolism in developing grape berries ». Australia: University of Adelaide, Dept. of Plant Science.
- OIV. 2001. « Détermination par spectrométrie de masse isotopique du rapport d'isotopes $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'éthanol du vin ou de celui obtenu par fermentation des mouts, des mouts concentrés ou du sucre de raisin. » RECUEIL INTERNATIONAL DES METHODES D'ANALYSE – OIV Ethanol, Méthode OIV-MA-AS312-06.
- Pédro, Georges. 2007. « Sol, humus et nutrition des plantes ». In *Histoire et agronomie*, édité par Paul Robin, Jean-Paul Aeschlimann, et Christian Feller, 121-37. IRD Éditions. doi:10.4000/books.irdeditions.4646.
- Piccin, Rogério, Rafael da Rosa Couto, Roque Júnior Sartori Bellinaso, Luciano Colpo Gatiboni, Lessandro De Conti, Lucas Antonio Telles Rodrigues, Luiza Somavilla Michelon, Matheus Severo de Souza Kulmann, et Gustavo Brunetto. 2017. « Phosphorus forms in leaves and their relationships with must composition and yield in grapevines ». *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 52 (5): 319-27. doi:10.1590/s0100-204x2017000500005.
- Piccin, Rogério, João Kaminski, Carlos Alberto Ceretta, Tales Tiecher, Luciano Colpo Gatiboni, Roque Junior Sartori Bellinaso, Carina Marchezan, Rodrigo Otávio Schneider de Souza, et Gustavo Brunetto. 2017. « Distribution and Redistribution of Phosphorus Forms in Grapevines ». *Scientia Horticulturae* 218 (avril): 125-31. doi:10.1016/j.scienta.2017.02.023.
- Pilbeam, David J., et P. S. Morley. 2007. « Calcium ». In *Handbook of Plant Nutrition*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Poovaiah, B. W., G. M. Glenn, et A. S. N. Reddy. 2011. « Calcium and Fruit Softening: Physiology and Biochemistry ». In *Horticultural Reviews*, édité par Jules Janick, 107-52. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781118060834.ch4.
- Poovaiah, B.W. 1988. « Calcium and Senescence ». In *Senescence and Aging in Plants*, 369-89. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-520920-5.50017-1.
- Ribéreau-Gayon, Pascal, Yves Glories, et Alain Maujean. 2012. *Traité d'œnologie*. 2, 2,. Paris: Dunod : La Vigne.
- Robin, Jean-Pierre, Philippe Abbal, et Jean-Michel Salmon. 1997. « Firmness and grape berry maturation. Definition of different rheological parameters during the ripening ». *OENO One* 31 (3): 127-38. doi:10.20870/oenone.1997.31.3.1083.
- Rogiers, Suzy Y., Dennis H. Greer, Jo M. Hatfield, Beverley A. Orchard, et Markus Keller. 2006. « Solute Transport into Shiraz Berries during Development and Late-Ripening Shrinkage ». *American Journal of Enology and Viticulture* 57 (1): 73-80.
- Ruffner, H. 1982. « Metabolism of Tartaric and Malic Acids in *Vitis* [Grapes]: A Review - Part A. » *Inst. of Plant Biology. Dept. of Physiology*. <http://agris.fao.org/agris-search/search>.

do?recordID=DE19830910747.

- Sabir, A., et Ferhan K. Sabir. 2009. « Postharvest treatments to preserve table grape quality during storage and approaches to find better ways alternative for SO₂ ». *Advances in Environmental Biology* 3 (septembre): 286-95.
- Sabir, Ali, Kevser Yazar, Ferhan Sabir, Zeki Kara, M. Atilla Yazici, et Nihal Goksu. 2014. « Vine growth, yield, berry quality attributes and leaf nutrient content of grapevines as influenced by seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) and nanosize fertilizer pulverizations ». *Scientia Horticulturae* 175 (Supplement C): 1-8. doi:10.1016/j.scienta.2014.05.021.
- Schreiner, R. Paul, Carolyn F. Scagel, et John Baham. 2006. « Nutrient Uptake and Distribution in a Mature 'Pinot Noir' Vineyard ». *HortScience* 41 (2): 336-45.
- Sexton, R, et J A Roberts. 1982. « Cell Biology of Abscission ». *Annual Review of Plant Physiology* 33 (1): 133-62. doi:10.1146/annurev.pp.33.060182.001025.
- Skinner, P.W., et M.A. Matthews. 1989. « Reproductive Development in Grape (*Vitis Vinifera* L.) under Phosphorus-Limited Conditions ». *Scientia Horticulturae* 38 (1-2): 49-60. doi:10.1016/0304-4238(89)90019-8.
- Smith, B. R., et L. Cheng. 2006. « Fe-EDDHA alleviates chlorosis in "Concord" grapevines grown at high pH ». *HortScience* 41 (6): 1498-1501.
- Ståb, Margarita R., et Jürgen Ebel. 1987. « Effects of Ca²⁺ on Phytoalexin Induction by Fungal Elicitor in Soybean Cells ». *Archives of Biochemistry and Biophysics* 257 (2): 416-23. doi:10.1016/0003-9861(87)90585-6.
- Storey, Richard, R. Gareth Wyn Jones, Daniel P. Schachtman, et Michael T. Treeby. 2003. « Calcium-Accumulating Cells in the Meristematic Region of Grapevine Root Apices ». *Functional Plant Biology* 30 (6): 719-27. doi:10.1071/fp02212.
- Truog, Emil. 1947. « Soil reaction influence on availability of plant nutrients » 11 Issue C.
- Van Leeuwen, C., J.-P. Gaudillère, et O. Tregoat. 2001. « L'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique ¹³C/¹²C. l'intérêt de sa mesure sur les sucres du moût à maturité ». *J. Int. Sci. Vigne Vin* 35 (4): 195-205.
- Van Leeuwen, C., O. Tregoat, X. Choné, M.-E. Jaeck, S. Rabusseau, J.-P. Gaudillère. 2003 « Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. » *Bulletin OIV*: 367-379
- Verrecchia, Eric. 2002. « Géodynamique du carbonate de calcium à la surface des continents ». In *GÉOLOGIE DE LA PRÉHISTOIRE : MÉTHODES, TECHNIQUES, APPLICATIONS*, Edition: 2nd, Association pour l'étude de l'environnement géologique de la préhistoire, Paris, pp.233-258.
- White, Robert E. 2015. *Understanding Vineyard Soils*. Oxford University Press.
- Winkler, A. J. 1974. *General Viticulture: Second Revised Edition*. University of California Press.
- Zhang L., van der Werf W., Bastiaans L., Zhang S., Li B., Spiertz J.H.J. 2008. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton. *Field Crops Research* 107: 29-42.

Sites internet

- Blancard D. et Deluche C., <http://ephytia.inra.fr/fr/C/7070/Vigne-Desordres-nutritionnels>, consulté le 24/09/17
- Jean-Yves Cahurel, Fertilisations phosphatée (P), potassique (K) et magnésienne (Mg) de la vigne, IFV, <https://www.vignevin-sudouest.com/publications/fiches-pratiques/fertilisations-P-K-Mg.php>, consulté le 13/06/17

ANNEXES

Annexe 1 : Protocole de prélèvement de terre pour les analyses de sol

Les prélèvements de sol ont été réalisés à l'aide d'une tarière de 7 cm x 20 cm. Un seul échantillon par parcelle a été réalisé.

- Effectuer 5 sondages à la tarière sur les 30 premiers centimètres du sol.

Les 5 sondages peuvent être effectués en diagonale ou en croix.

Ne pas prélever en bordure de parcelle.

- Les 5 sondages sont bien homogénéisés
- L'échantillon final doit peser entre 500 g et 1 kg
- Conditionner l'échantillon de terre dans un sachet identifié et l'envoyer au laboratoire le plus rapidement possible

Etant donné les analyses demandées, aucune période préférencielle de prélèvement n'a été définie.

Annexe 2 : Résultats des analyses de sol sur les parcelles de l'essai phosphore

• Rapport d'analyses de la parcelle Grand Merlot :

TEXTURE



ETAT PHYSIQUE

pH eau	8,3
pH KCl	
ΔpH	
Calcaire total %	
Calcaire actif %	10,5
Saturation en calcium %	

ETAT CHIMIQUE

ELEMENTS MAJEURS		Optimum
P ₂ O ₅ Joret-Hebert mg/kg	101	151 à 280
P ₂ O ₅ Dyer mg/kg		
P ₂ O ₅ Olsen mg/kg		
K ₂ O g/kg	0,282	0,118 à 0,188
CaO g/kg	11,02	2,25 à 3,35
MgO g/kg	0,327	0,08 à 0,15
SO ₃ mg/kg		50 à 70
RAPPORTS SPECIFIQUES		
K/Mg	0,37	0,26 à 0,39
Ca/Mg	24,2	2,1 à 4,4

HUMIFICATION ET VIE DU SOL

Matières organiques %	1,4	Indice de fertilité
C organique %	0,8	
Azote total g/kg		
Rapport C/N		
Humification - Perte en kg/ha/an		
Potentiel de libération d'azote U/ha		
Indice de fertilité biologique		
Humidité %		
Biomasse microbienne mg C/kg		
Activité enzymatique FDAH U/g		
Rapport biologique % de MO		

OLIGO-ELEMENTS	mg/kg	Optimum
Fer (DTPA)		
Zinc (DTPA)		
Cuivre (DTPA)		
Manganèse (DTPA)		
Bore (eau chaude)		
Fer (oxalate)	65	91 à 249
IPC	25	

EQUILIBRE ET MOBILISATION CHIMIQUE

RESERVES DU SOL	Optimum
CEC mé/100g	
Taux de saturation %	
K/CEC	
Ca/CEC	
Mg/CEC	
Na/CEC	
Mobilisation oligo-éléments %	
POTENTIEL D'ABSORPTION	
du phosphore P ₂ O ₅	
de la potasse K ₂ O	
de la magnésie MgO	

SALINITE	Optimum	
Conductivité mS/cm		
Na ₂ O g/kg	0,041	0,02 à 0,07
Chlorures mg/kg		
	Elevé	
	Normal	
	Faible	

T. de Laborde.
Directeur du Laboratoire.

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale.
Les résultats d'analyses ne concernent que l'échantillon soumis à l'analyse et les déterminations présentées.

8 chemin des 2 Mas - PIST 4 - 30100 ALES
Tél : 04 66 61 02 97 - Fax : 04 66 61 02 98 - laboratoire.ldm@wanadoo.fr - www.laboratoireldm.com

• Rapport d'analyses de la parcelle Merlot Le Jardin :

TEXTURE



ETAT PHYSIQUE

pH eau	7,8
pH KCl	
ΔpH	
Calcaire total %	1,0
Calcaire actif %	
Saturation en calcium %	147 sol saturé

ETAT CHIMIQUE

ELEMENTS MAJEURS		Optimum
P ₂ O ₅ Joret-Hebert mg/kg	293	151 à 280
P ₂ O ₅ Dyer mg/kg		
P ₂ O ₅ Olsen mg/kg		
K ₂ O g/kg	0,142	0,118 à 0,188
CaO g/kg	6,39	5,7 à 11,1
MgO g/kg	0,476	0,08 à 0,15
SO ₃ mg/kg		50 à 70
RAPPORTS SPECIFIQUES		
K/Mg	0,13	0,26 à 0,39
Ca/Mg	9,7	21 à 39

HUMIFICATION ET VIE DU SOL

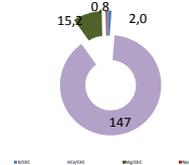
Matières organiques %	3,1	Indice de fertilité
C organique %	1,8	
Azote total g/kg	2,01	
Rapport C/N	8,9	
Humification - Perte en kg/ha/an	998	
Potentiel de libération d'azote U/ha	68	
Indice de fertilité biologique	54	
Humidité %		
Biomasse microbienne mg C/kg		
Activité enzymatique FDAH U/g		
Rapport biologique % de MO		



OLIGO-ELEMENTS	mg/kg	Optimum
Fer (DTPA)	12,4	20 à 120
Zinc (DTPA)	1,03	1,3 à 11
Cuivre (DTPA)	9,02	0,8 à 7,9
Manganèse (DTPA)	2,48	12,1 à 79
Bore (eau chaude)	0,80	0,4 à 0,8
Fer (oxalate)		
IPC		

EQUILIBRE ET MOBILISATION CHIMIQUE

RESERVES DU SOL		Optimum
CEC mé/100g	15,5	11 à 19
Taux de saturation %	165	
K/CEC	2,0	2,5 à 4,0
Ca/CEC	147	70 à 85
Mg/CEC	15,2	4,0 à 6,0
Na/CEC	0,8	
Mobilisation oligo-éléments %	25	
POTENTIEL D'ABSORPTION		
du phosphore P ₂ O ₅	↑	impasse possible
de la potasse K ₂ O	→	apports recommandés
de la magnésie MgO	↑	impasse possible



SALINITE		Optimum
Conductivité mS/cm		
Na ₂ O g/kg	0,040	0,02 à 0,07
Chlorures mg/kg		
	Elevé	
	Normal	
	Faible	

T. de Laborde.
Directeur du Laboratoire.

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale.
Les résultats d'analyses ne concernent que l'échantillon soumis à l'analyse et les déterminations présentées.

8 chemin des 2 Mas - PIST 4 - 30100 ALES
Tél : 04 66 61 02 97 - Fax : 04 66 61 02 98 - laboratoire.ldm@wanadoo.fr - www.laboratoireldm.com

Annexe 3 : Résultats des analyses de sol sur les parcelles de l'essai calcium

- Rapport d'analyses de la parcelle de Pinot :

PILLON :		2014-1309		NOM :		SARL HERBE SAINTE	
ETAT ORGANIQUE							
MO en g/kg	< 10	10 à 15	> 15				
C/N	< 9 (très rapide à rapide)	9 à 12 (moyennement rapide à lent)	> 12 (lent)				
C organique exprimé en g/kg	8,45		N total exprimé en g/kg	0,73			
MATIERES ORGANIQUES : Niveau un peu limité, enrichissement à disponibilité.							
BILAN CHIMIQUE en mg/kg							
CEC en meq/kg							
Eléments majeurs		Seuils		85		très élevé	
Azote nitrique (maralchage)							
Phosphates :							
Dyer		126 à 175		93			
Joret-Hebert		40 à 80		39			
Extrait à l'eau (P)							
Chaux (CaO)		4732 à 7096		5964			
Magnésie (MgO)		124 à 169		252			
Potasse (K2O)		136 à 192		187			
Oxyde de sodium (Na2O)		0 à 70		43			
Oligo-éléments							
Min échangeable		0,80 à 2,50		0,80			
Cu échangeable		2,00 à 5,00		2,40			
Fe échangeable							
Zn échangeable							
Al échangeable							
Bore							
Ratios agronomiques							
Taux de saturation %							
Cw/CEC %	75 à 90						250,49
K/CEC %	4 à 6						4,68
Mg/CEC %	6 à 12						14,72
Na/CEC %	0 à 5						1,63
K20/MgO	0,75 à 1,75						0,74

REFERENCES PARCELLE									
Commune	Cineastas		Lieu-dit	LES PLOTS - 0 / 30 cm			Espèce : Vignes		
Réf cadastrale	ILT IV - 7		Longitude (EO)	Latitude (NS)			En cours de production		
Surface	2,47 ha		Clone ou variété	Pinot / 667			Année plantation		
				2012			IGP		
Sables grossiers	136		Sables fins	184			Limon grossiers		
							150		
							Limon fins		
							260		
							270		
L'analyse granulométrique (exprimée en g/kg) correspond à un sol de type : Limon argilo sableux									
Indice de battance									
Indice de porosité									
RU en mm (sur 30 cm de sol)									
Le sol présente une forte capacité de rétention hydrique et minérale et une bonne stabilité structurale, avec une inertie thermique élevée. Les risques de lessivage sont faibles. Il résistera bien à la sécheresse estivale. Sol lourd souvent lent à se réchauffer. La nature alcaline accentue les risques de concurrence du sol vis à vis des prélèvements racinaires en potassium. La porosité pourra être limitée.									
STATUT ACIDO-BASIQUE									
Echelle de pH	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
	Très acide	légèrement acide	voisin de la neutralité	légèrement alcalin	neutre	légèrement alcalin	très alcalin	très alcalin	
Assimilation	Risque de toxicité			Bonne assimilation des éléments			Risque de blocages		
pH eau	écart < 1 (sable)			écart > 1 (désat)			8,34		
pH KCl	7,57			Alcalin sans possibilité d'acidification					
Conseils Cho :									
ETAT CALCAIQUE									
Calcium total	0 - 10 %		10 - 25 %		25 - 50 %		> 20 %		
	1,5								
Calcium actif	0 - 5 %		5 - 10 %		10 - 20 %		> 20 %		
Fer Oxalique (en mg/kg)	0-10		10-30		30-50		seuil : 35 - 50 mg/kg		
IPC	0-10		10-30		30-50		> 60		
Commentaires : CEC saturée en calcium.									

- Rapport d'analyses de la parcelle de Viognier :

FACILITES DES ECHANGES SOL-PLANTE

- Réaction chimique du sol BASIQUE
- Pouvoir Fixateur sur le P₂O₅ EXTREMEMENT ELEVE
- Pouvoir Fixateur sur le K₂O LEGEREMENT ELEVE

POSSIBILITES DE MISE EN RESERVE

- Capacité d'échange en Cation 145 mg/Kg : MOYENNE
- Profondeur du sol
- Taux de retus (cailloux)

STRATEGIE DE FUMURE :

- Taux de 90% à structure améliorée, la fertilisation sera bien vectorisée, bon état d'aération à conserver, engrais à bonne solubilité.

PRECEDENT : NON INDIQUE

ÉLÉMENTS NUTRITIFS

- Salinité globale : NORMALE
- Conductivité (mS/cm) : 0,0961
- Na₂O oxyde de sodium : 16 mg/Kg

ÉLÉMENTS MAJEURS	Norme	FABILE	MOYEN	ÉLEVÉ	PLAN DE FUMURE kg/ha
N	120	150 - 200			
Ammoniac phosphorique JORET-HERBERT	422	150 - 200			LEGER APPORT
Oxyde de potassium K ₂ O % K/CEC = 6,18 %	165	115 - 200			LEGER APPORT
Oxyde de magnésium MgO % Mg/CEC = 5,63 %					ENTRETIEN

ÉTATS DES RESERVES ET ÉQUILIBRES

ÉLÉMENTS MAJEURS	teneurs mg/kg	Norme	FABILE	MOYEN	ÉLEVÉ	EXCÈS	GUIDE D'APPORT
Azote	120	150 - 200					FACULTATIF
Ammoniac phosphorique JORET-HERBERT	422	150 - 200					FACULTATIF
Oxyde de potassium K ₂ O % K/CEC = 6,18 %	165	115 - 200					SOUHAITABLE
Oxyde de magnésium MgO % Mg/CEC = 5,63 %							SOUHAITABLE
Soufre S	42	50					FACULTATIF
Cuivre Cu	11,96	1,00					SOUHAITABLE
Zinc Zn	0,95	2,50					SOUHAITABLE
Manganèse éch. Mn	1,8	0,8					SOUHAITABLE
Fer Fe	23	328					SOUHAITABLE
Bore B	0,37	0,73					SOUHAITABLE
Cuivre acétique	1,1						SOUHAITABLE

ÉTAT CALCIQUE

pH eau : 8,4
 pH KCl : 7,8
 Ca/Cec : 239,3

ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE

Matières organiques : 9%
 Indice d'activité biologique

ÉTAT D'AÉRATION

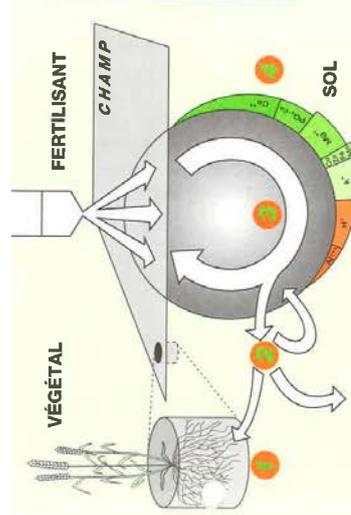
Indice d'aération actuelle
 Résistance aux états asphyxiants
 Indice de protection des argiles

INDICES DES COMPORTEMENTS DU SOL

Stabilité de la structure (balance)
 Récupération en cas de tassement
 Accessibilité après la pluie

ÉTAT ORGANIQUE : Sachez maintenir le taux de matières organiques et l'activité microbienne.
ÉTAT CALCIQUE : Ce pH eau permet une bonne floculation des argiles. Veillez à utiliser des engrais à bonne solubilité.
ÉTAT D'AÉRATION : Bon état d'aération à conserver, engrais à bonne solubilité.

ANALYSE DE CONTRÔLE A FAIRE EN : 2009



MILIEU PHYSIQUE Résultats en g/kg de terre fine séchée

- **Etat calcaique**
 pH eau : 8,4
 pH KCl : 7,8
 CaO sch. : 9,753
- **Etat organique**
 Matières organiques : 18,6
 Limons fins : 138
 Limons grossiers : 145
 Sables fins : 277
 Sables grossiers : 157
 Réserve Viti : 45 an (calcul sur 30 cm)
- **Granulométrie**
 Argiles : 262
- **Etat d'aération (en mg/kg)**
 Manganèse éch. réduit : 1,9
 Manganèse réductible : 4,7
 Fer oxalique : 23

CONDITIONS DE DEVELOPPEMENT DES RACINES

LES PARAMÈTRES DE LA FERTILITE :

- 1- conditions de développement des racines
- 2- facilité des échanges entre sol et plantes
- 3- possibilité des mises en réserve du sol
- 4- états des réserves nutritives et de leurs équilibres

-> disponibilité des éléments et stratégie de fertilisation

ÉTAT CALCIQUE

Teneurs : 8,4 (Favable), 7,8 (Moy), 239,3 (Élevé)

ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE

Teneurs : 9% (Favable), 25,6 (Moy), 45 (Élevé)

ÉTAT D'AÉRATION

Teneurs : 18,6 (Favable), 138 (Moy), 145 (Élevé), 277 (Favable), 157 (Favable), 45 (Favable)

ANALYSE DE CONTRÔLE A FAIRE EN : 2009

- Rapport d'analyses de la parcelle de Viognier :

11440 PEYRIAC DE MER

Topographie : MI-VERSANT
Humidité : SEC À NORMAL
Pierrosité / Géologie : CAILLOUX VISIBLES / CALCAIR
Profondeur : PEU PROFOND À MOYEN
Profondeur du prélèvement en cm : 30

Date d'édition : 11-déc-09
Date de réception de l'échantillon : 17-nov-09

CEPAGE SYRAH / 140RU

VIGNE EN PLACE

Résultats analyse :

Granulométrie en 1/1000 de terre fine (tamisée à 2 mm) :

Sables grossiers (de 0,2 à 2 mm) : 52
Sables fins (de 0,05 à 0,2 mm) : 92
Limons grossiers (de 0,02 à 0,05 mm) : 89
Limons fins (de 0,002 à 0,02 mm) : 378
Argiles (moins de 0,002 mm) : 389

Texture : A.l. - sol argilo-limoneux
Indice de battance (IB) : 1,1
(Il est souhaitable que l'indice de battance soit inférieur à 1,4)

Calcimétrie :

pH à l'eau : 8,4

Commentaires : pH très alcalin

Analyses chimiques :

Carbone (C) en g/Kg : 9,5 Elevé
Matière organique (MO) en g/Kg : 16 Elevé
Azote (N) Kjeldhal en g/Kg : 0,84 Moyen
Rapport Carbone/Azote (C/N) : 11,3 Elevé
Phosphore (P2O5) méthode JH en mg/kg : 79 Moyen à faible
• Calcium (Ca) en cmol+/Kg : Saturé Satisfaisant

• Magnésium (Mg) en cmol+/Kg : 1,705
Magnésie (MgO) en mg/Kg : 343,6 Moyen à élevé
• Potassium (K) en cmol+/Kg : 0,571
Potasse (K2O) en mg/Kg : 268,9 Très élevé
Rapport Magnésium/Potassium (Mg/K) : 3,0 Satisfaisant
• Sodium (Na) en cmol+/Kg : 0,072
Oxyde de Sodium (Na2O) en mg/Kg : 22,32 Normal
• Somme des cations en cmol+/Kg : 11,7 Saturé
• CEC METSON en cmol+/Kg : 11,7 Pouvoir fixateur moyen

* 1 cmol+/Kg = 10 meq/Kg

Valeurs souhaitables

6,5 < pH < 7,5
Calcaire actif < 50

7 < C < 9
12 < MO < 15
0,6 < N < 0,9
7 < C/N < 9
P2O5 = 80 Saturé

Mg = 6 à 10 % de la CEC
141 < MgO < 236
K = 2% de la CEC
K2O = 110
1,5 < Mg/K < 3
Na < 5% de la CEC
Na2O < 181
Somme >= CEC
CEC >= 10

Diagnostic et conseils :

VIGNE EN PLACE

Ce sol est non battant, de texture : A.l. - sol argilo-limoneux et de cohésion structurale stable. Sol lourd, à ressuyage lent, avec des risques d'asphyxie importants en bas de versant et en plaine. Il nécessite souvent un bon drainage.

Sol sensible à la compaction, des sous-solages seront parfois nécessaires. Attention à l'utilisation abusive des outils rotatifs. Cette terre a un pH très alcalin.

Les risques de chlorose sont nuls.

Le stock de matière organique est important pour un sol de vignoble. Le rapport carbone sur azote (C/N) est de : 11,3. La valeur du C/N est un peu élevée pour un sol de vignie, la vitesse de minéralisation semble lente. Il faut peut-être vérifier l'aptitude au ressuyage de vos sols (assainissement, décompactage).

Teneur en phosphates moyenne à faible, apporter un légère correction. Teneur élevée en Potassium.

Teneur élevée en Magnésium, cependant bon équilibre Potassium - Magnésium. **Maintenir un bon niveau de Potassium durant les années à venir.**

Le sol est saturé en calcium. **Aucun problème dû aux sels de sodium.**

La valeur de la capacité totale d'échange cationique (CEC) est faible par rapport au taux d'argile.

MATIERE ORGANIQUE :
Aucun apport de matière organique n'est indispensable.

PHOSPHORE :
Apporter 15-20 unités de phosphore si la vigne manifeste des problèmes de dysfonctionnements non identifiés.

POTASSE :
Aucun apport à réaliser cette année.

Annexe 4 : Les principaux stades phénologiques de la vigne selon Baggioini (lettres) et Eichhorn et Lorentz (chiffres). Source : IFV

Stade E ou 09
ou 13
2 à 3 feuilles
étalées
Les premières
feuilles sont
totalement
dégagées et
présentent les
caractères varié-
taux. Le rameau
est nettement
visible.



Stade D ou 06
ou 11
Sortie des feuilles
Des feuilles rudi-
mentaires rassem-
blées en rosette
apparaissent.
Leur base est
encore protégée
par la bourre
progressivement
rejetée hors
des écaïlles.



Stade C ou 05
ou 09
Pointe verte
L'oeil continue
à gonfler et
à s'allonger.
Il présente une
pointe verte
constituée
par la jeune
pousse.



Stade B ou 03
ou 05
Bourgeon
dans le coton
L'oeil gonfle, ses
écaïlles s'écartent
et la bourre est
très visible.
Ce stade suit
les pleurs.



Stade A ou 01
ou 00
Bourgeon d'hiver
L'oeil de l'année
précédente est
presque
entièrement
recouvert par
deux écaïlles
protectrices
brunâtres.



Stade K ou 31
ou 75
Petit pois
Les grains ont
la taille d'un petit
pois.
Les grappes
pendent.



Stade I ou 23
ou 65
Floraison
Les capuchons
se détachent
à la base
et tombent.
Les étamines et
le pistil sont
visibles.
Après ce stade,
vient la nouaison
des grains.



Stade H ou 17 ou 57
Boutons floraux séparés
Les boutons floraux sont nettement isolés.
La forme typique de l'inflorescence apparaît.



Stade G ou 15
ou 55
Boutons floraux
encore
agglomérés
Les grappes
s'espacent et
s'allongent
sur la pousse.
Les boutons
floraux
sont encore
agglomérés.



Stade F ou 12
ou 53
Grappes
visibles
des grappes
rudimentaire
apparaissent
au sommet de
la pousse.
Quatre à
six feuilles
étalées
sont visibles.



Stade 47 ou 97
Fin de la chute des feuilles à l'automne.



Stade 0 ou 43 ou 93
Début de la chute des feuilles.

Stade N ou 38
ou 89
Maturité
Les baies sont
prêtes pour
la récolte car
elles ont atteint
leur maturité
technologique.



Stade M ou 36
ou 81
Véraison
Les baies
s'éclaircissent
pour le raisin
blanc ou se
colorent
pour le raisin
noir.



Stade L ou 33
ou 77
Fermeture
de la grappe
Les baies
atteignent
une taille
suffisante
pour se toucher.



Annexe 5 : Protocole d'utilisation de l'application smartphone VitiCanopy

Les parcelles sur lesquelles l'application est paramétrée sont celles conduites avec des vignes palissées

Prendre la photo :

- Utiliser la camera frontale du smartphone
- Placer le smartphone sous le rang à une distance de 70 à 80 cm sous le cordon.
- Cadrer le cordon au centre et dans la largeur de la photo
- Vérifier que rien ne viendra perturber la lecture de la photo : éclat de lumière, adventices, ...

Charger les photos dans l'application

- Créer un dossier pour chaque photo
- Charger la photo
- Vérifier lors du passage de la photo en noir et blanc toutes les zones «feuillage» ont bien été prises en compte et transformées en noir et le ciel est bien pris en compte par les zones en blanc
- Valider pour obtenir le LAI et la porosité
- Plus de données sont disponibles en les exportant de l'application

Annexe 6 : Protocole de prélèvement pétiolaire

■ Sur une parcelle homogène, sur des ceps sains et représentatifs, prélever au minimum 50 pétioles ou 45 g de pétioles frais (en début de saison 80 pétioles peuvent être nécessaires pour obtenir ce poids frais) sur 4 à 8 rangs selon la taille de la parcelle

■ Séparer le pétiole du limbe, ne conserver que le pétiole. Ne prélever qu'un pétiole par cep, un minimum de 50 ceps est nécessaire.

■ Ne pas prélever les rangs de bordure

■ Les pétioles choisis seront ceux situés en face de la première grappe en partant de la base (les feuilles associées doivent être saines, non nécrosées, non déchiquetées). Eventuellement, prélever le pétiole suivant sur le rameau.

■ Pour des vignes taillées en arcure, effectuer le prélèvement sur les rameaux situés avant l'arcure.

■ Pour des vignes en non taille, prélever 120 pétioles répartis sur toute la hauteur du feuillage (40 pétioles par étage : haut, milieu et bas de la végétation).

■ En cas de trouble nutritionnel localisé, réaliser 2 analyses sur la même parcelle : l'une dans la zone saine, l'autre dans la zone atteinte.

■ Peser les pétioles afin de déterminer le poids frais à la parcelle.

■ Ranger les pétioles dans une enveloppe SRDV (enveloppes disponibles sur simple demande) ou dans une enveloppe en papier Kraft (éviter les poches en plastique), et identifier le prélèvement en notant le nom du demandeur, du domaine et de la parcelle.

Annexe 7 : Principe du spectromètre d'émission atomique ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) et MP-AES (New Microwave Plasma-Atomic Emission Spectrometer)

- Préparation des échantillons : les échantillons broyés finement sont minéralisés par voie humide et en milieu fermé dans un four à micro-onde Milestrone Start D pour obtenir les éléments chimiques en solution
 - Les échantillons en solution sont prélevés par une pompe péristaltique et envoyés vers le plasma via une torche formée de 3 tubes de quartz en créant un aérosol. Le plasma décompose, atomise et ionise l'échantillon dont les atomes passent à l'état excité et libèrent de l'énergie sous forme de photons
 - Ce sont ces photons qui sont ensuite analysés (identifiés et quantifiés) en sortie du spectromètre par le détecteur, chaque photon correspondant à une longueur d'onde caractéristique d'un élément
- Dans le cas de l'ICP-AES (méthode de référence) le plasma est de l'argon alors que pour le MP-AES (méthode de routine) le plasma est de l'azote.

Annexe 8 : Principe du spectromètre proche infra-rouge : NIRSystem 6500

- Préparation des échantillons : les échantillons broyés sont disposés dans un cellule de quartz puis passé au spectromètre
- L'appareil mesure la reflectance de la lumière d'une lampe émise par l'échantillon en rotation
- La gamme de longueurs d'ondes analysées est de 400 à 2500 nm. Tous les 2 nm, 32 mesures d'absorbance sont effectuées
- La valeur donnée correspond à cette reflectance divisée par la reflectance d'une référence interne (céramique)

Annexe 9 : Protocole de prélèvement de baies

Recueillir 200 baies par parcelle.

- Prélever sur la partie médiane du bois de taille ou du cordon, sur une grappe saisie au hasard
- Prélever 5 baies par grappe : deux en haut de la grappe et de façon opposée, deux vers le milieu de la grappe et de façon opposée, une en bas de la grappe
- Prélever aussi bien sur la partie exposée de la grappe que derrière
- Conserver les baies dans un sachet ou une boîte hermétique identifiés
- Peser les 200 baies

Pour le transport : placer les prélèvements dans une glacière et les apporter au labo pour analyse dans un délai inférieur à 12h.

Les baies sont ensuite broyées puis filtrées sur du papier absorbant.

Annexe 10 : Principe de l'IRTF : WineScan FT 120 de la société FOSS electric

- Préparation des échantillons : les moûts à maturité sont utilisés filtrés sur papier absorbant
- Le spectre infra-rouge de l'échantillon est réalisé par un interféromètre de michelson qui divise la lumière rouge polychromatique en deux signaux infra-rouges. C'est la mesure du déphasage entre les deux signaux qui donne l'intensité du signal d'interférence
- Le spectre est alors analysé et comparé à une base de donnée de spectres de vins
- L'appareil est calibré grâce à des valeurs de référence qui correspondent à un type de spectre

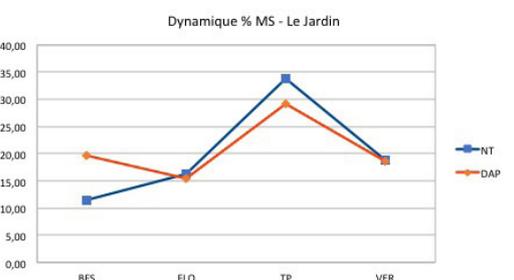
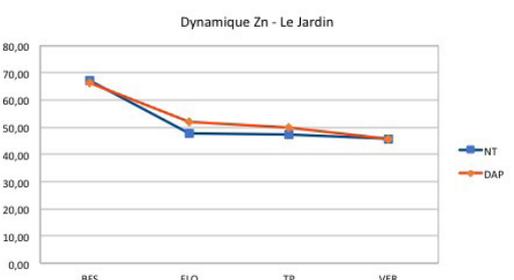
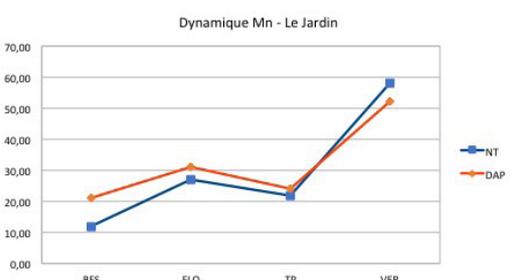
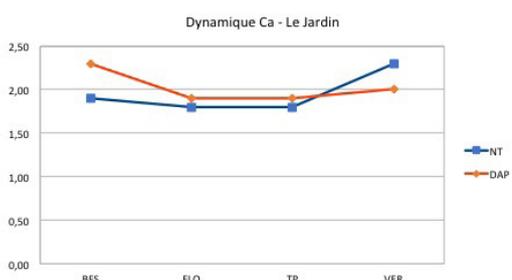
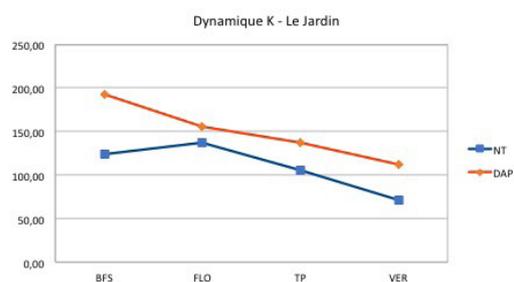
Annexe 11 : Protocole de tri densimétrique des baies

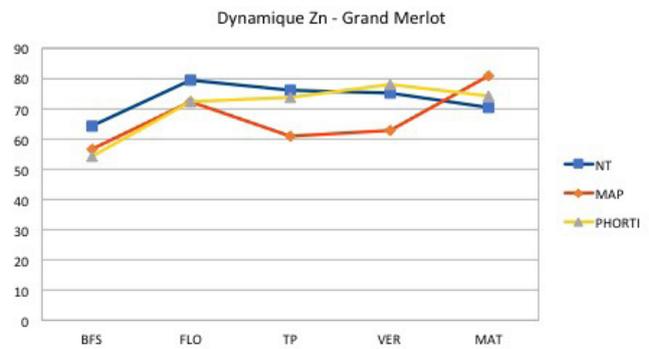
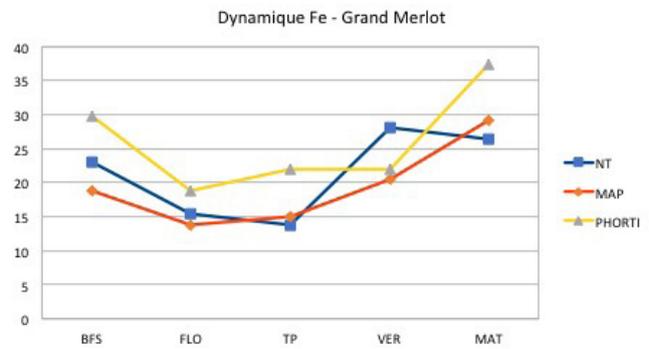
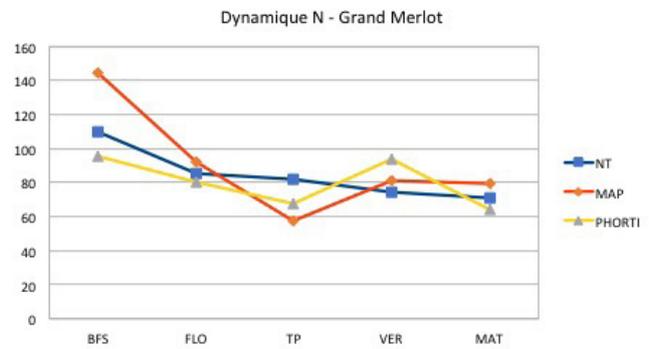
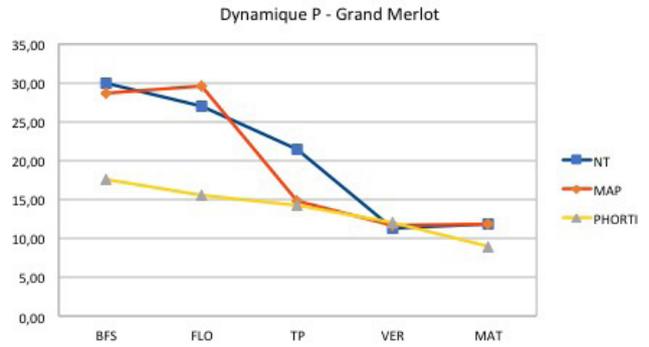
Les baies étudiées seront celles du lot le plus important après le tri sur 4 bains différents.

- Pour cela, chaque baie de raisin est préalablement séparée de la grappe en ciselant au ras du pédicelle pour conserver son intégrité.
- Les baies prélevées sont ensuite plongées dans le bain le moins dosé. Celles qui coulent dans le bain seront reprises, rincées et séchées puis plongées dans le baign de densité supérieure et ainsi de suite.
- Pour déterminer le dosage en NaCl des deux baigns, quelques baies sont pressées puis le TAV est mesuré à l'aide d'un réfractomètre. Les baigns sont établis autour de cette valeur avec des concentrations en sel croissantes de 15 g/L en 15 g/L. Ce qui correspondait généralement à deux baigns de 145 g/L et de 160 g/L de sel fin puis deux autres baigns au-dessus ou en-dessous. Sachant qu'un bain de 145 g/L correspond au niveau densité à un TAVP de 11,5 %vol. et un bain de 160 g/L à 13 %vol.

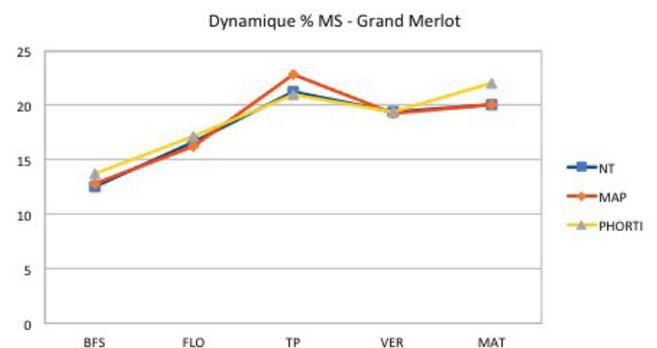
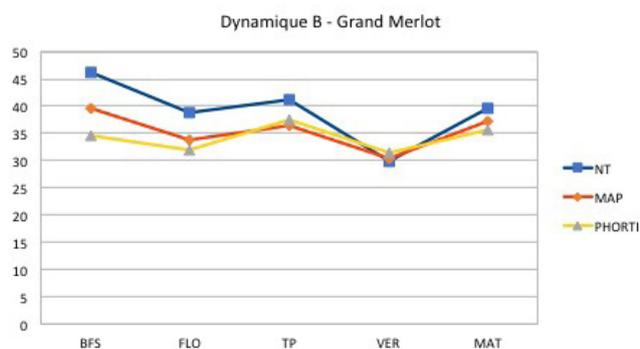
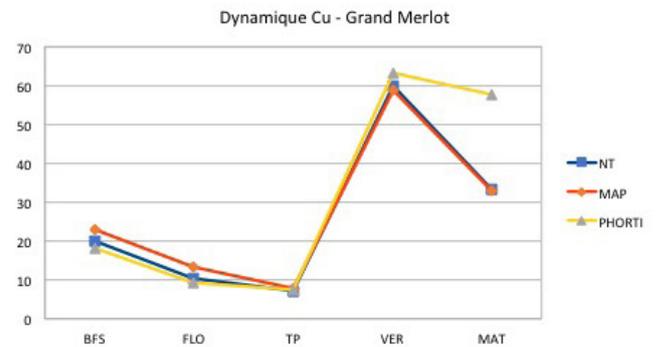
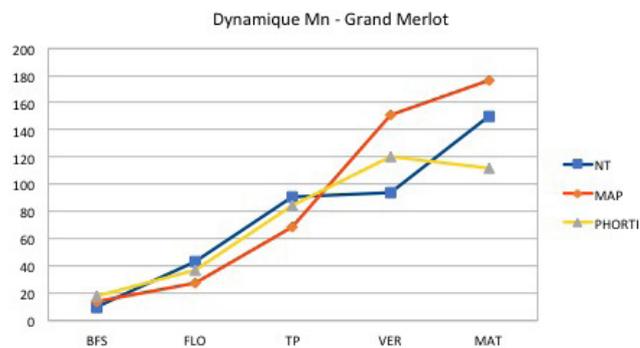
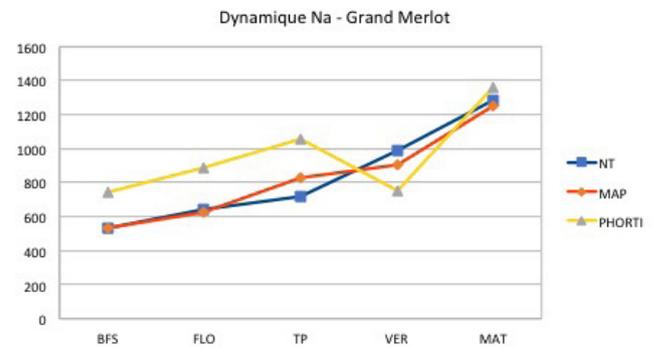
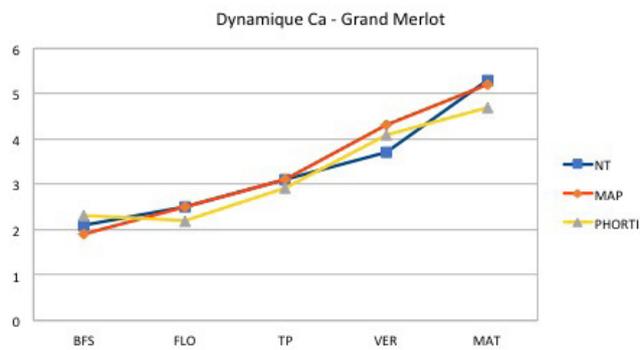
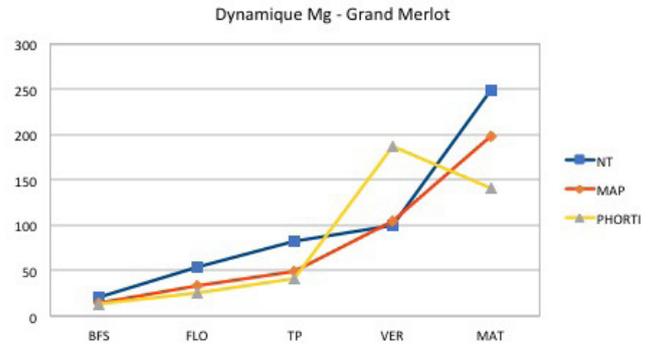
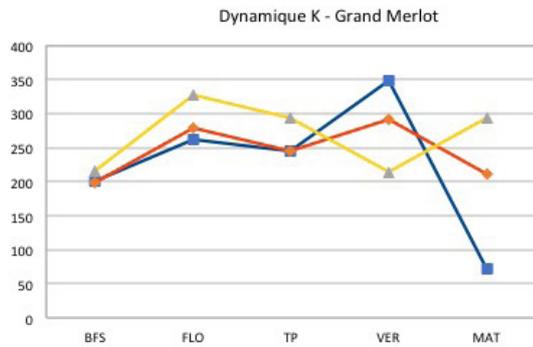
Annexe 12 : Eléments minéraux dans les pétioles - Essai phosphore

• Parcelle Le Jardin



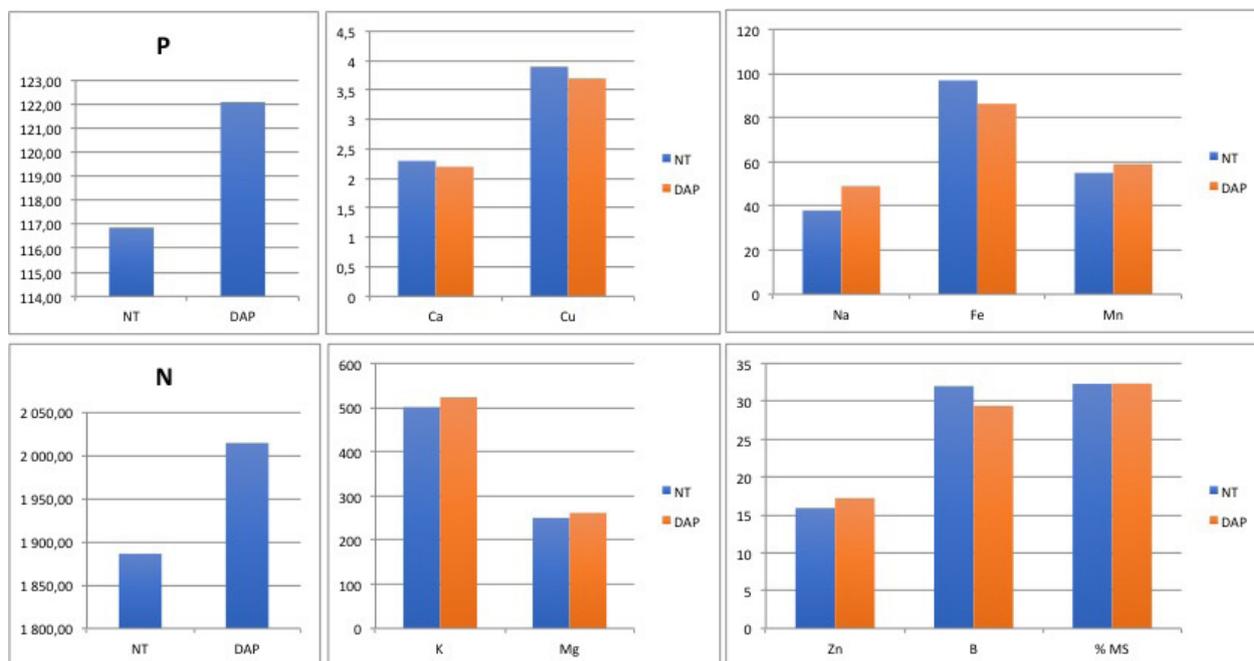


• Parcelle Grand Merlot

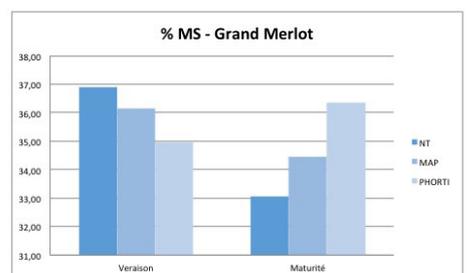
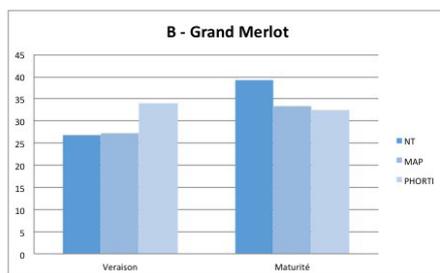
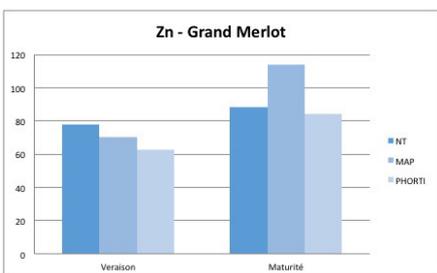
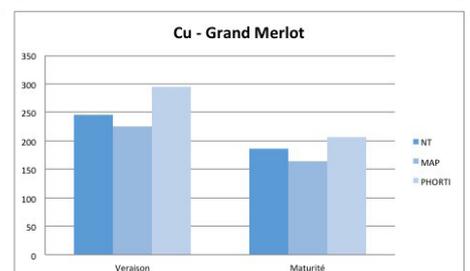
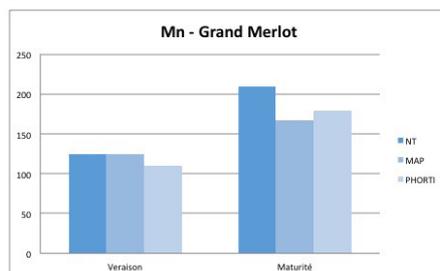
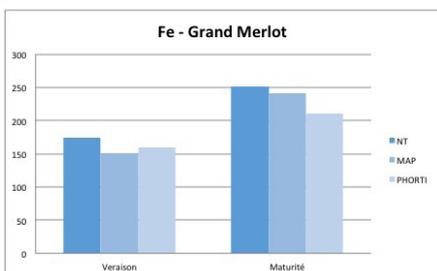
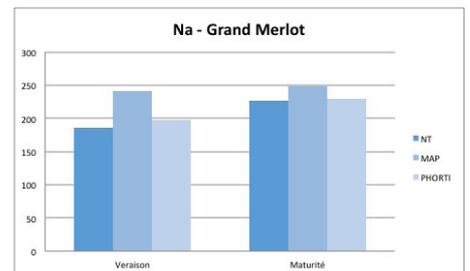
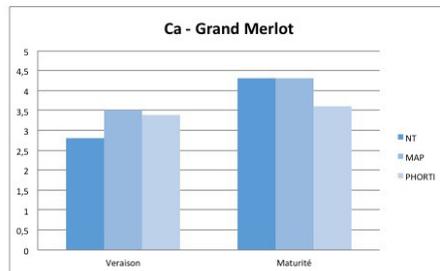
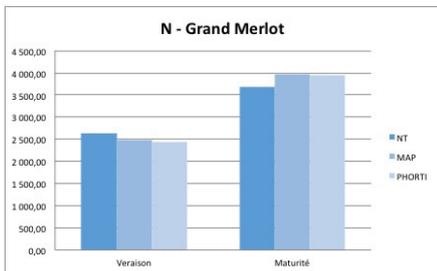
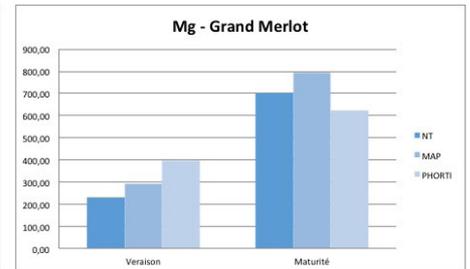
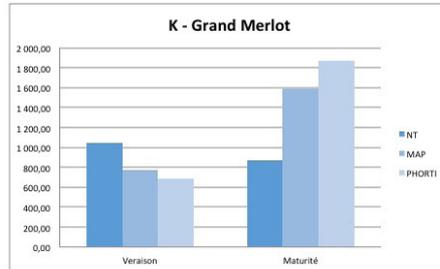
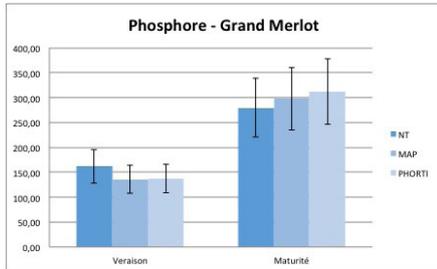


Annexe 13 : Eléments minéraux dans les limbes - Essai phosphore

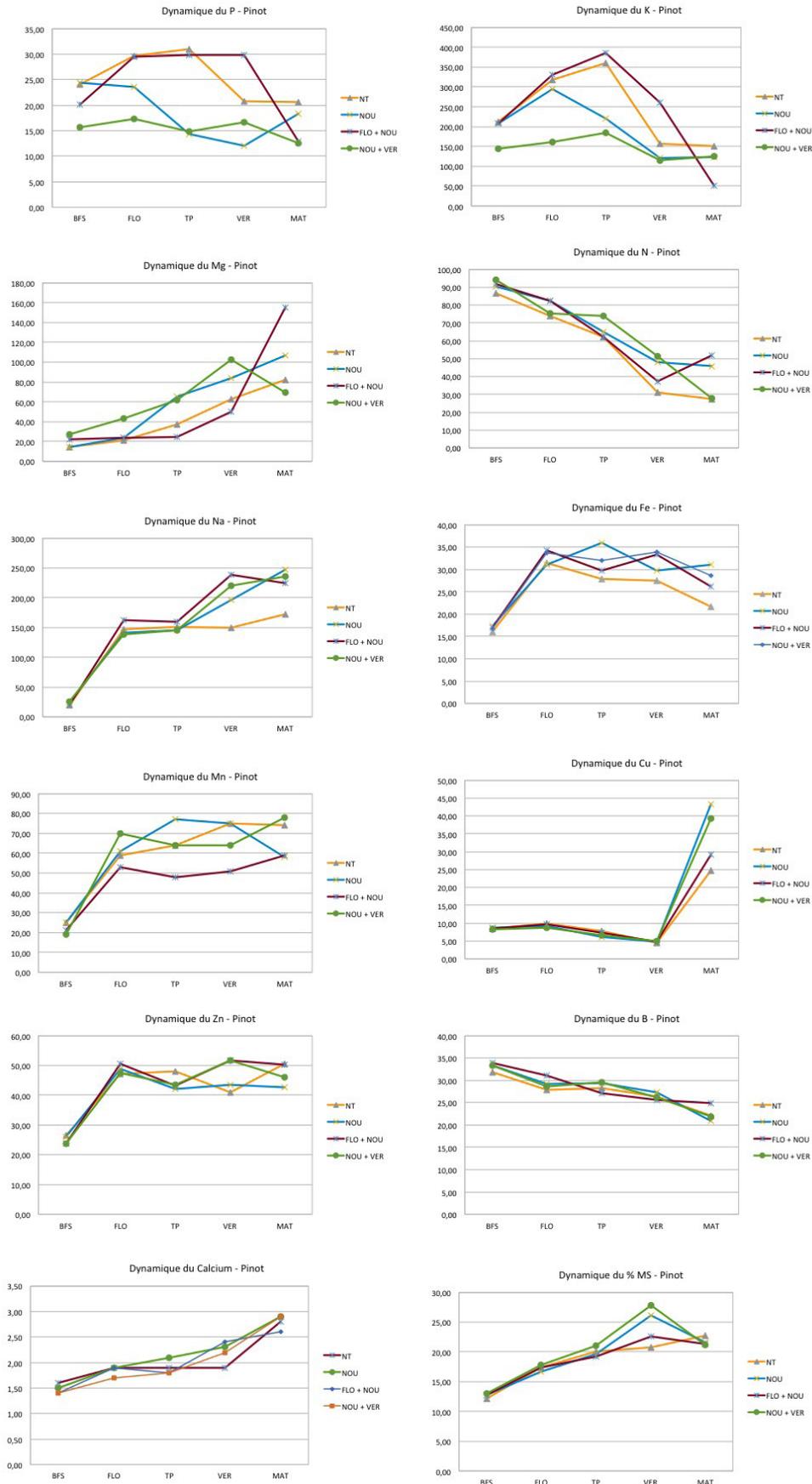
• Parcelle Le Jardin

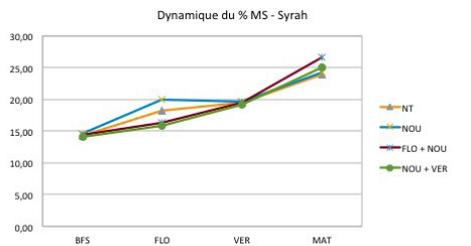
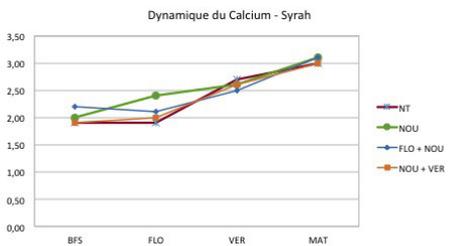
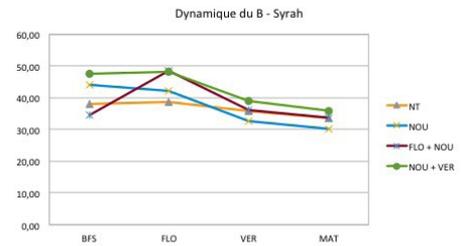
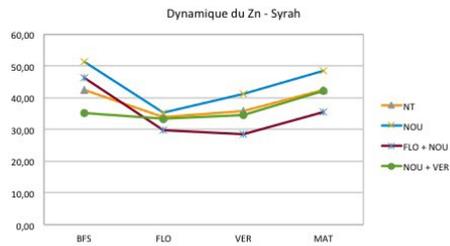
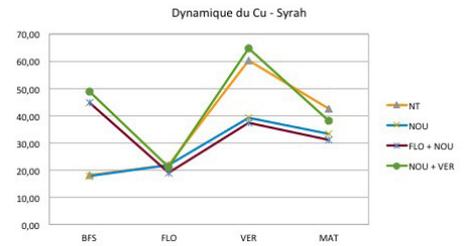
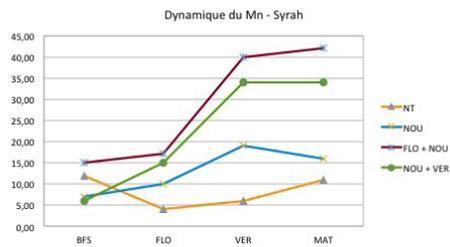
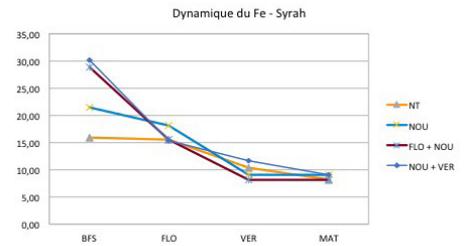
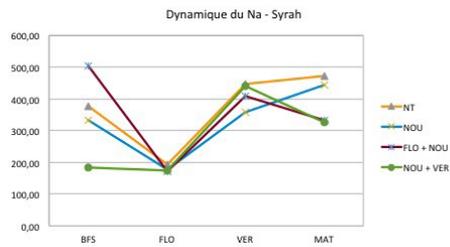
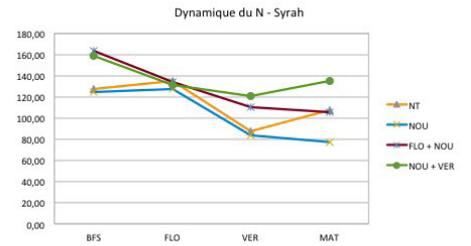
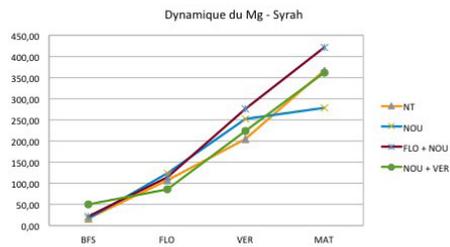
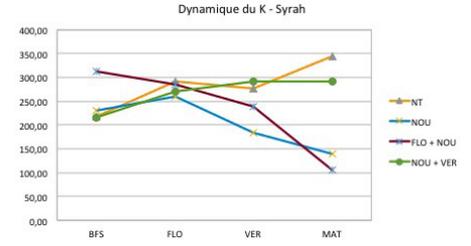
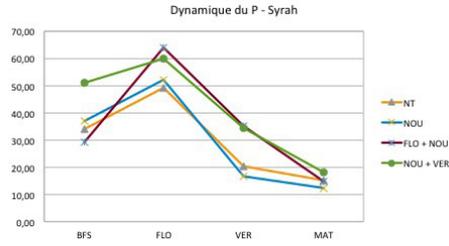


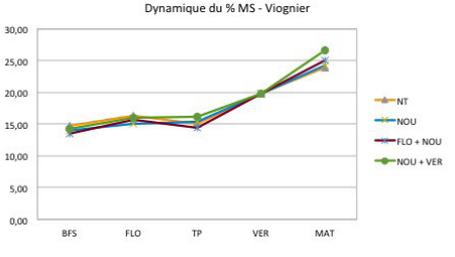
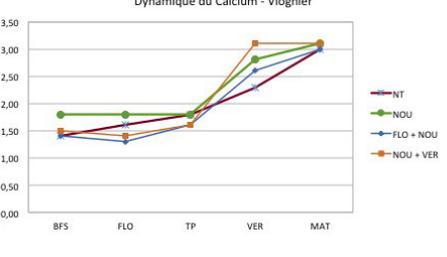
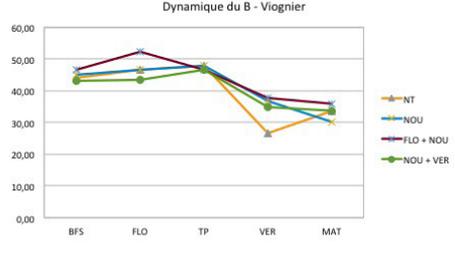
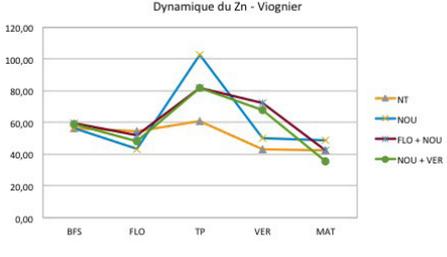
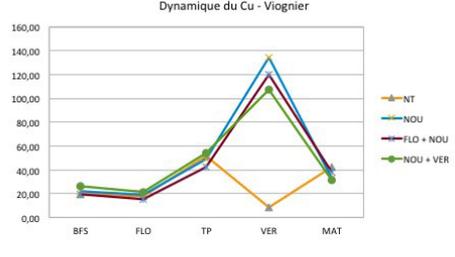
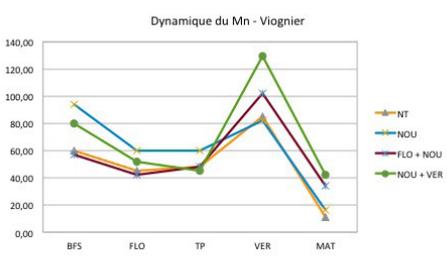
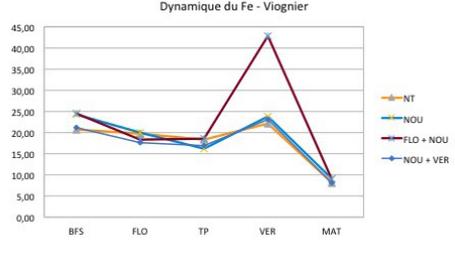
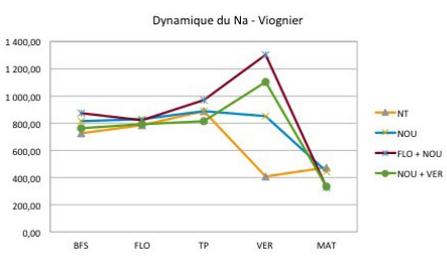
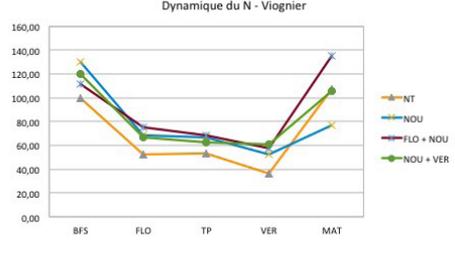
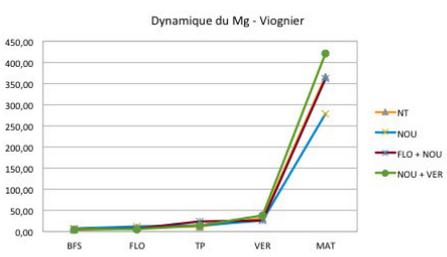
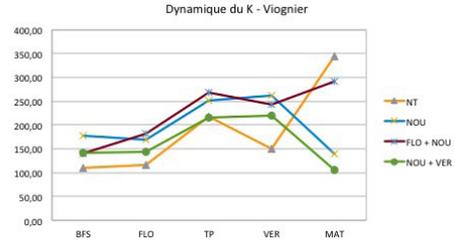
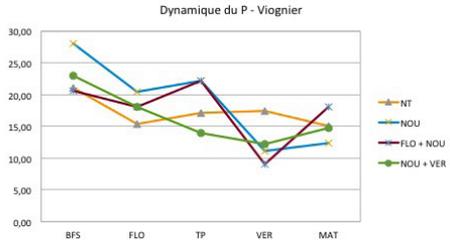
• Parcelle Grand Merlot



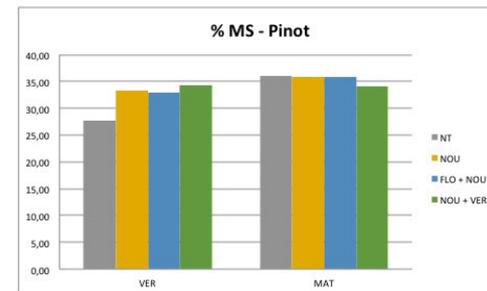
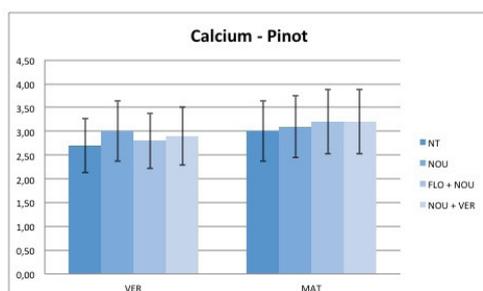
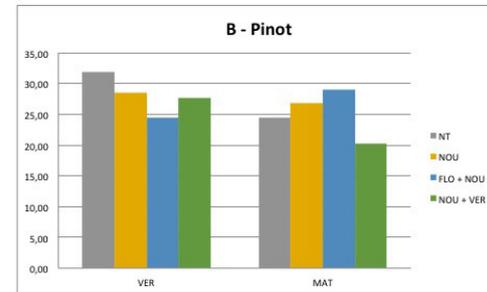
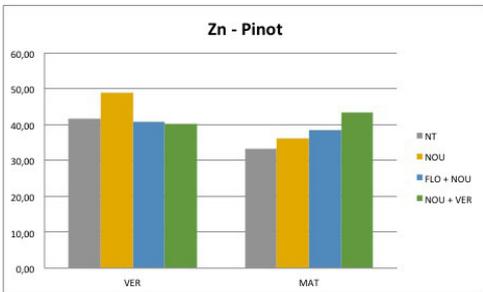
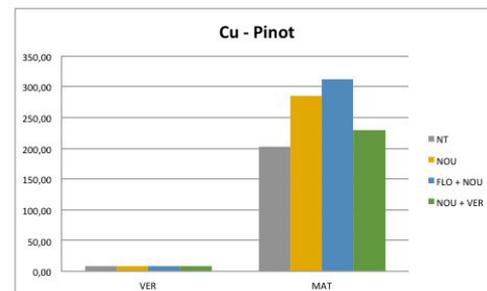
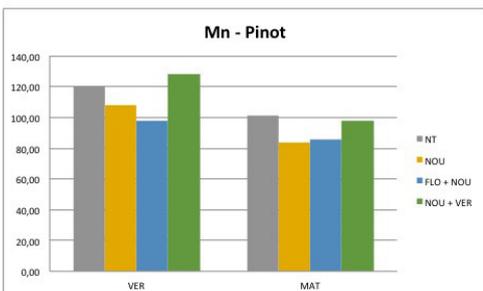
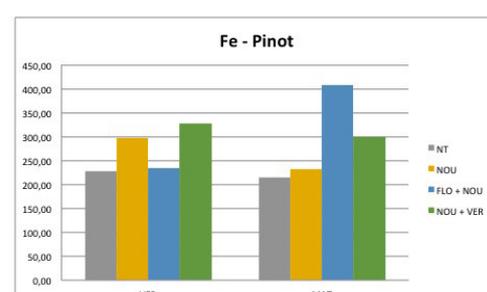
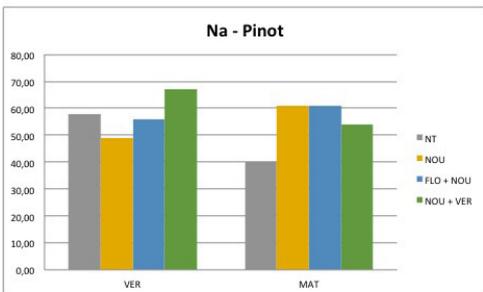
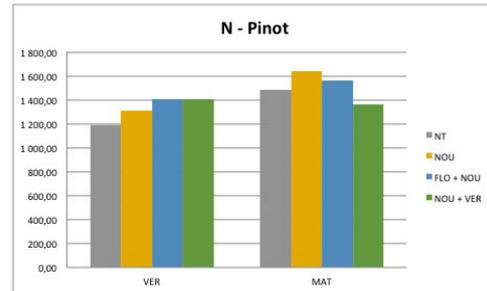
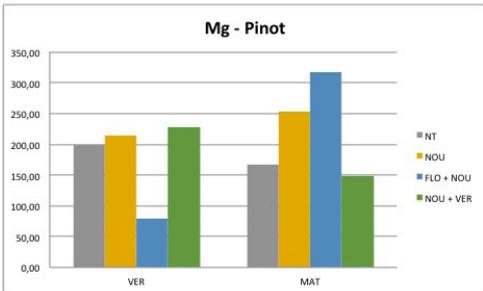
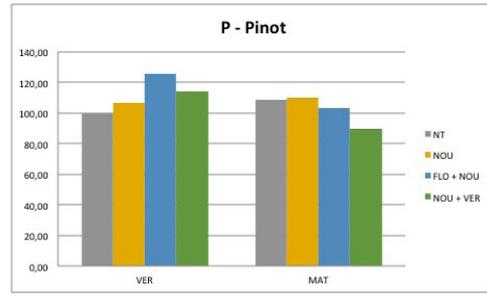
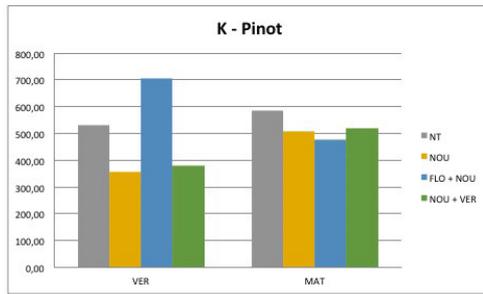
Annexe 14 : Eléments minéraux dans les pétioles - Essai calcium

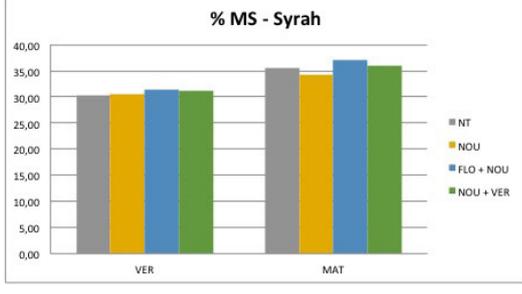
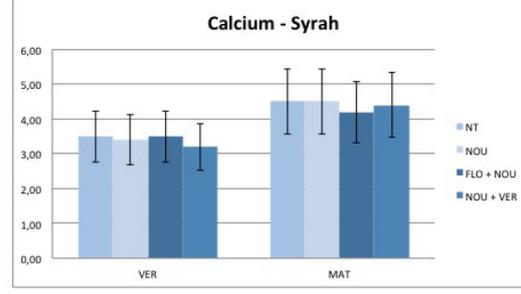
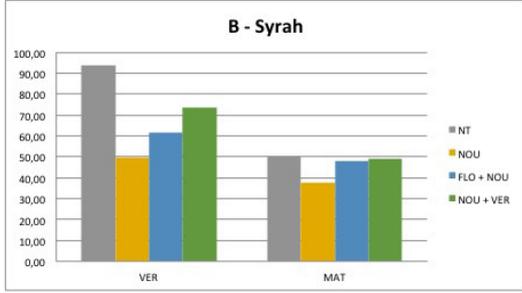
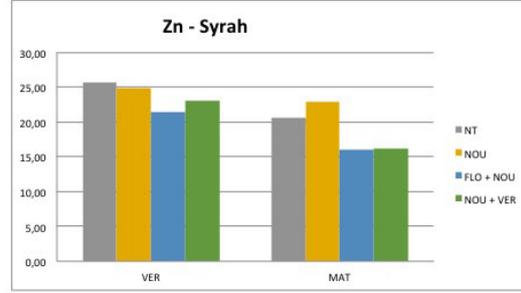
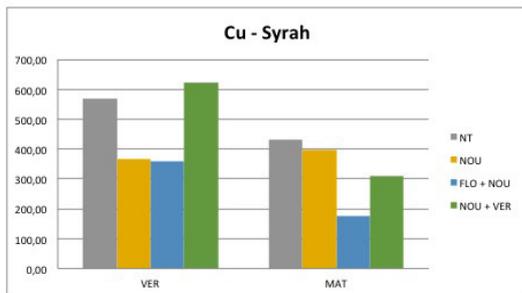
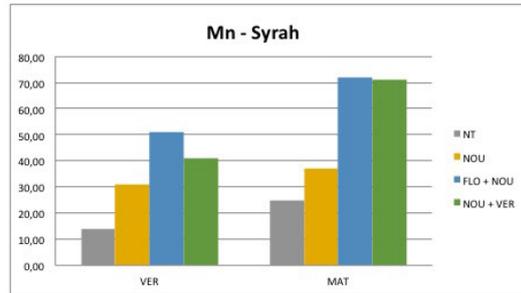
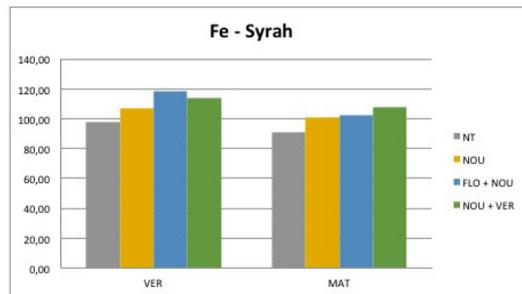
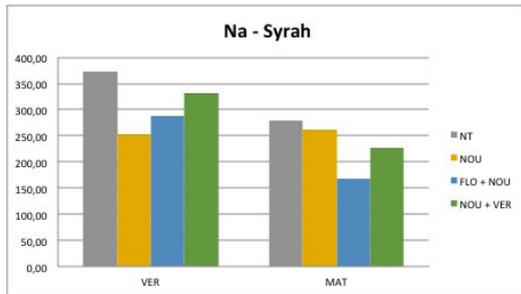
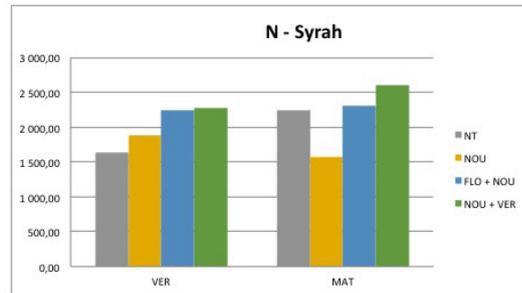
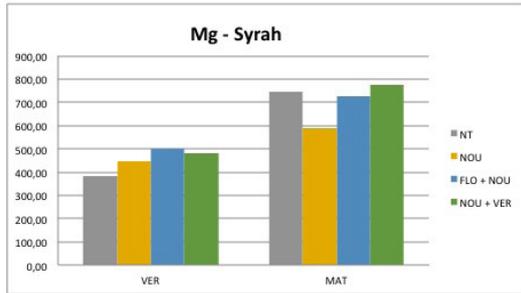
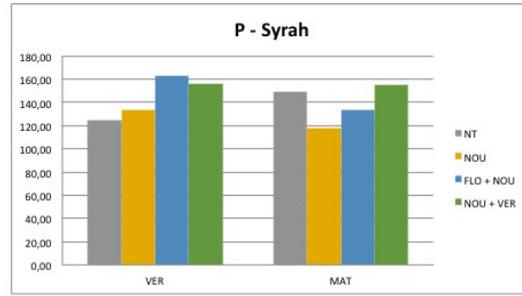
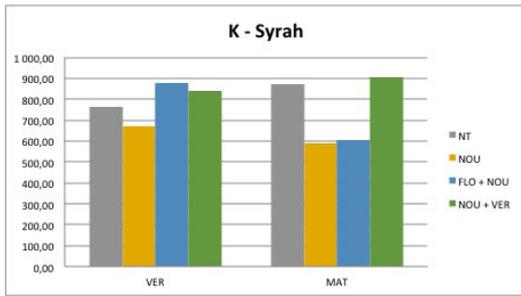


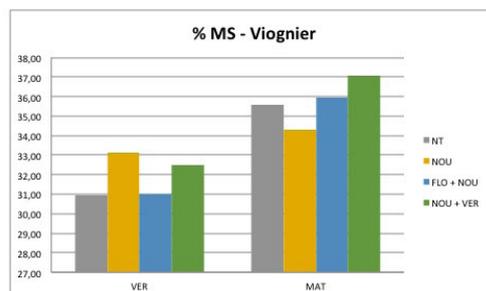
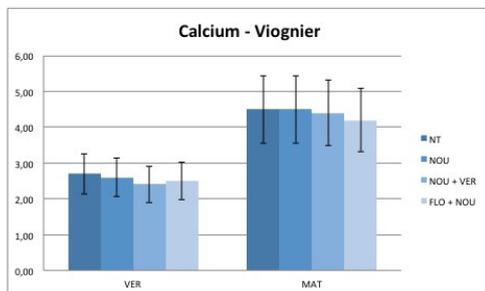
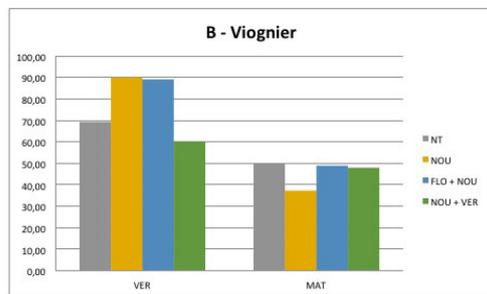
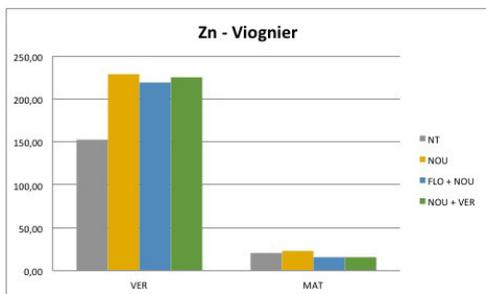
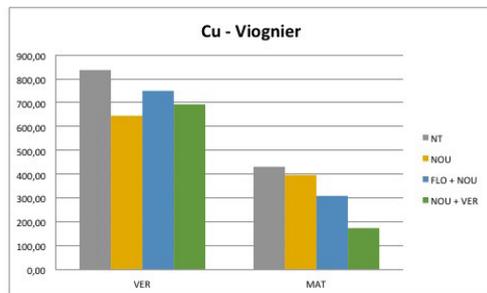
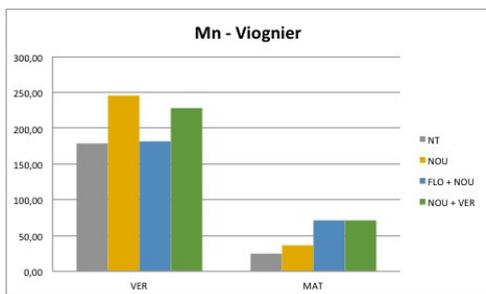
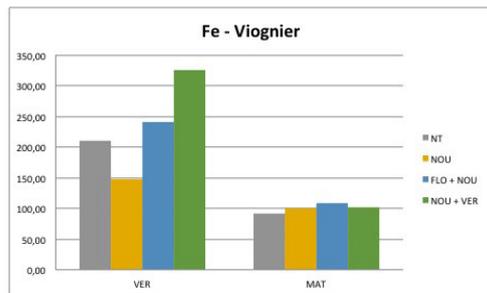
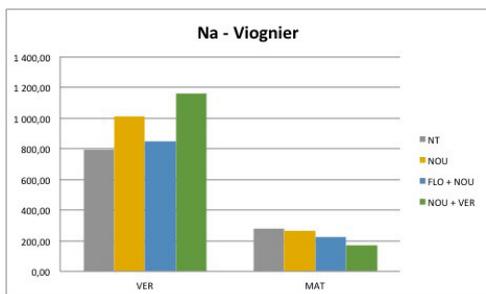
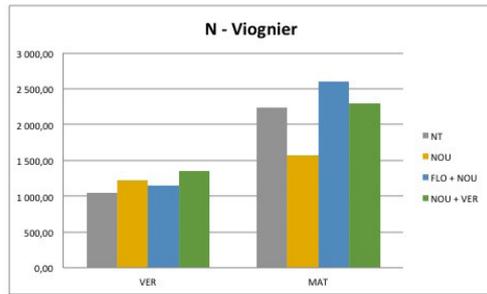
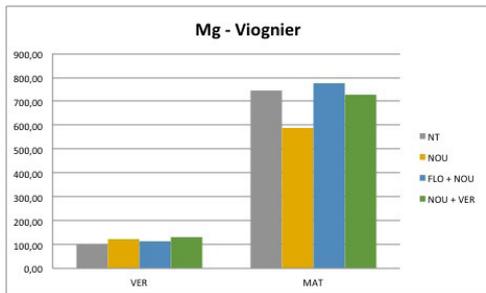
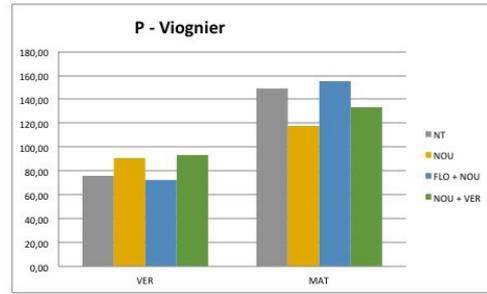
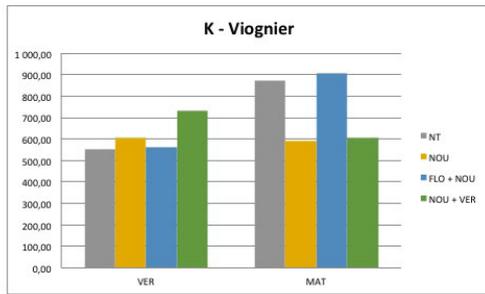




Annexe 15 : Eléments minéraux dans les limbes - Essai calcium







Annexe 16 : Analyses statistiques sur le développement végétatif - Essai phosphore

- Comparaison de la croissance des rameaux secondaires - Parcelle Grand Merlot

	Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
NT	p-value (bilatérale) 0,002 Conclusion H0 rejetée	p-value (bilatérale) - Conclusion : aucune différence significative	p-value 0,923 Conclusion H0 non rejetée
MAP	p-value (bilatérale) 0,001 Conclusion H0 rejetée		
PHORTI	p-value (bilatérale) 0,004 Conclusion H0 rejetée		

Annexe 17 : Analyses statistiques sur la LAI et la porosité - Essai phosphore

- Comparaison du LAI et de la porosité entre les modalités - Parcelle Grand Merlot

		Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
BFS LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale) 0,629 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,351 Conclusion H0 non rejetée	p-value 0,011 Conclusion H0 rejetée
	MAP	p-value (bilatérale) 0,490 Conclusion H0 non rejetée		
	PHORTI	p-value (bilatérale) 0,575 Conclusion H0 non rejetée	Test Dunn : différence significative entre NT et PHORTI	
POROSITE	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale) 0,605 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,774 Conclusion H0 non rejetée	p-value 0,426 Conclusion H0 non rejetée
	MAP	p-value (bilatérale) 0,149 Conclusion H0 non rejetée		
	PHORTI	p-value (bilatérale) 0,813 Conclusion H0 non rejetée	Résultat : pas de différence significative	
FLO LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale) 0,623 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) - Conclusion H0 non rejetée	p-value 0,000 Conclusion H0 rejetée
	MAP	p-value (bilatérale) 0,025 Conclusion H0 rejetée		
	PHORTI	p-value (bilatérale) 0,636 Conclusion H0 non rejetée	Test Dunn : différence significative entre NT et PHORTI	
POROSITE	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale) 0,431 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,174 Conclusion H0 non rejetée	p-value 0,001 Conclusion H0 rejetée
	MAP	p-value (bilatérale) 0,393 Conclusion H0 non rejetée		
	PHORTI	p-value (bilatérale) 0,302 Conclusion H0 non rejetée	Test Dunn : différence significative entre NT et PHORTI	
TP LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale) 0,524 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,021 Conclusion H0 rejetée	Pr > F 0,002 Conclusion H0 rejetée
	MAP	p-value (bilatérale) 0,584 Conclusion H0 non rejetée		
	PHORTI	p-value (bilatérale) 0,192 Conclusion H0 non rejetée	Test REGWQ : PHORTI significativement différent de NT et MAP	
POROSITE	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale) 0,163 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,088 Conclusion H0 non rejetée	p-value 0,001 Conclusion H0 rejetée
	MAP	p-value (bilatérale) 0,372 Conclusion H0 non rejetée		
	PHORTI	p-value (bilatérale) 0,243 Conclusion H0 non rejetée	Test Dunn : différence significative entre NT et PHORTI	
VER LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale) 0,128 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,339 Conclusion H0 non rejetée	p-value 0,001 Conclusion H0 rejetée
	MAP	p-value (bilatérale) 0,898 Conclusion H0 non rejetée		
	PHORTI	p-value (bilatérale) 0,058 Conclusion H0 non rejetée	Test Dunn : PHORTI est significativement différent de NT et MAP	
POROSITE	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale) 0,128 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,000 Conclusion H0 rejetée	Pr > F < 0,0001 Conclusion H0 rejetée
	MAP	p-value (bilatérale) 0,098 Conclusion H0 non rejetée		
	PHORTI	p-value (bilatérale) 0,058 Conclusion H0 non rejetée	Test REGWQ : les modalités sont significativement différentes entre elles	

- Comparaison du LAI et de la porosité sur la différence VER-BFS entre les modalités - Parcelle Grand Merlot

VER		Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)		
LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques		
	NT	p-value (bilatérale)	0,167	p-value (bilatérale) -	p-value 0,025	
		Conclusion	H0 non rejetée	Conclusion	H0 non rejetée	
	MAP	p-value (bilatérale)	0,537	Test Dunn : PHORTI est significativement différent de NT		
		Conclusion	H0 non rejetée			
	PHORTI	p-value (bilatérale)	0,009			
Conclusion		H0 rejetée				
POROSITE	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques			H0 : Les modalités sont identiques
	NT	p-value (bilatérale)	0,159			p-value (bilatérale)
		Conclusion	H0 non rejetée	Conclusion	H0 rejetée	
	MAP	p-value (bilatérale)	0,846	Pr > F	< 0,0001	
		Conclusion	H0 non rejetée	Conclusion	H0 rejetée	
	PHORTI	p-value (bilatérale)	0,046	Test REGWQ : les modalités sont significativement différentes entre elles		
Conclusion		H0 non rejetée				

• Comparaison du LAI et de la porosité entre les modalités - Parcelle Le Jardin

		Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett (sensible à la	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
BFS LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont
	NT	p-value (bilatérale) 0,974 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale)	Pr > F 0,144 Conclusion H0 rejetée Conclusion H0 non rejetée
	DAP	p-value (bilatérale) 0,083 Conclusion H0 non rejetée	Résultat : pas de différence significative	
BFS Porosite	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont
	NT	p-value (bilatérale) 0,124 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale)	Pr > F 0,545 Conclusion H0 rejetée Conclusion H0 rejetée
	DAP	p-value (bilatérale) 0,620 Conclusion H0 non rejetée	Résultat : pas de différence significative	

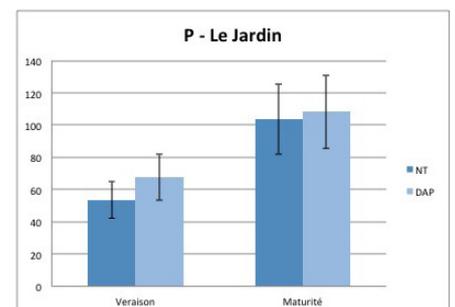
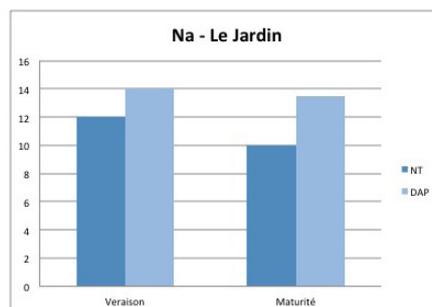
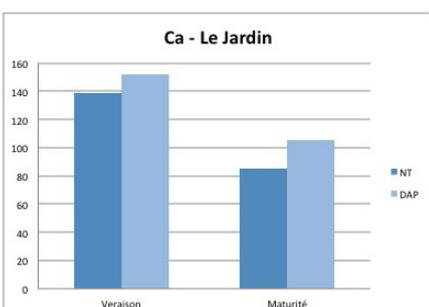
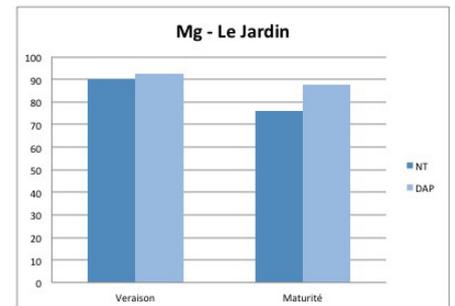
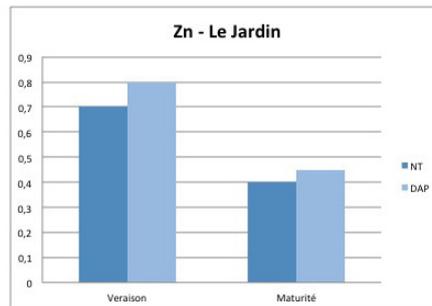
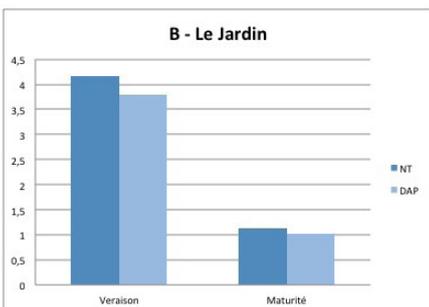
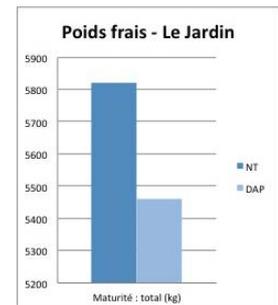
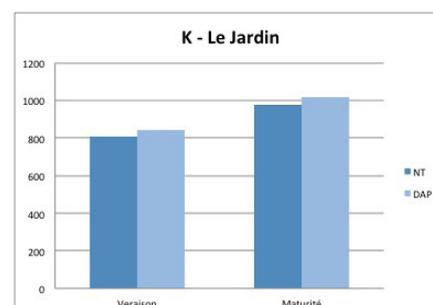
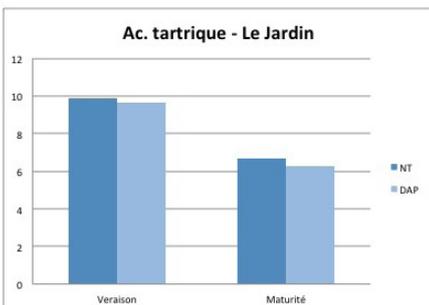
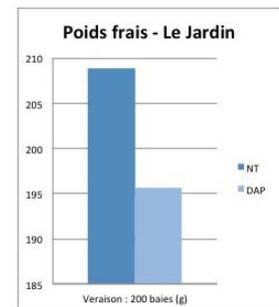
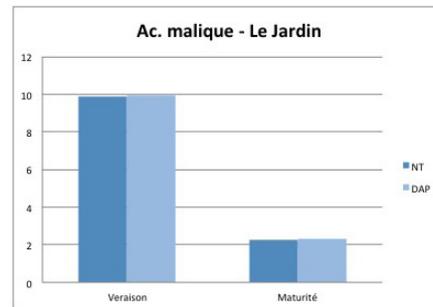
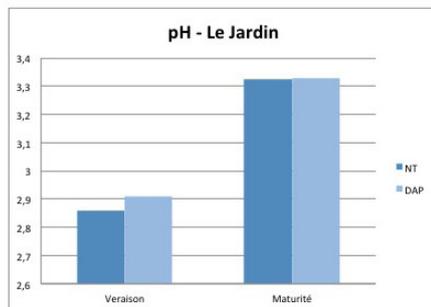
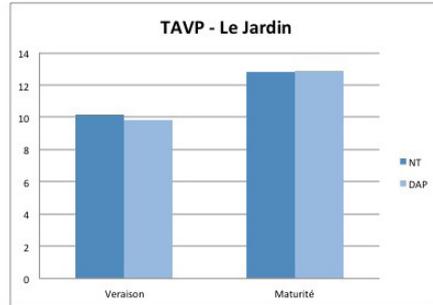
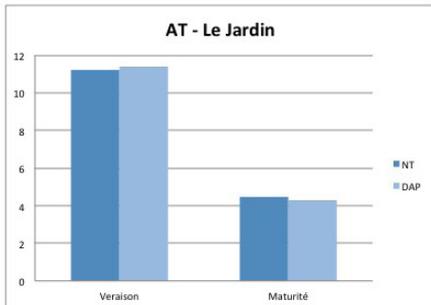
		Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett (sensible à la	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
FLO LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont
	NT	p-value (bilatérale) 0,823 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale)	Pr > F Conclusion H0 rejetée Conclusion H0 rejetée
	DAP	p-value (bilatérale) 0,016 Conclusion H0 non rejetée	Comparaison par paires : test de REQWQ Résultat : différence significative pour un échantillon : NOU	
FLO Porosite	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont
	NT	p-value (bilatérale) 0,240 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale)	Pr > F Conclusion H0 rejetée Conclusion H0 rejetée
	DAP	p-value (bilatérale) 0,975 Conclusion H0 non rejetée	Comparaison par paires : test de REQWQ Résultat : différence significative pour un échantillon : NOU	

		Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett (sensible à la	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
TP LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont
	NT	p-value (bilatérale) 0,030 Conclusion H0 rejetée	p-value (bilatérale)	Pr > F Conclusion H0 rejetée Conclusion H0 rejetée
	DAP	p-value (bilatérale) 0,467 Conclusion H0 non rejetée	Comparaison par paires : test de REQWQ Résultat : différence significative pour un échantillon : NOU	
TP Porosite	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont
	NT	p-value (bilatérale) < 0,0001 Conclusion H0 rejetée	p-value (bilatérale)	Pr > F Conclusion H0 rejetée Conclusion H0 rejetée
	DAP	p-value (bilatérale) 0,228 Conclusion H0 non rejetée	Comparaison par paires : test de REQWQ Résultat : différence significative pour un échantillon : NOU	

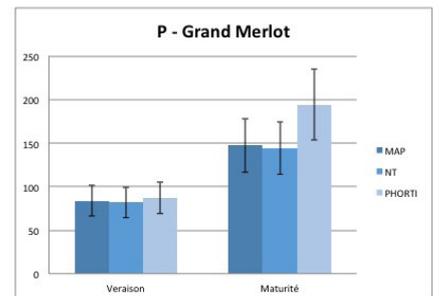
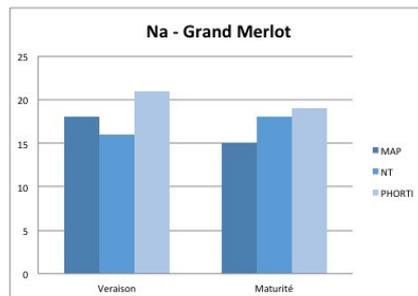
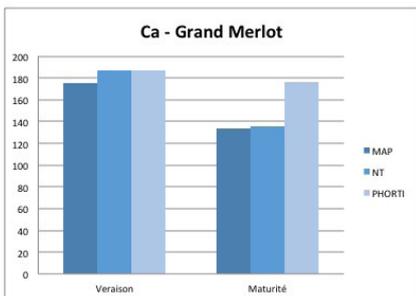
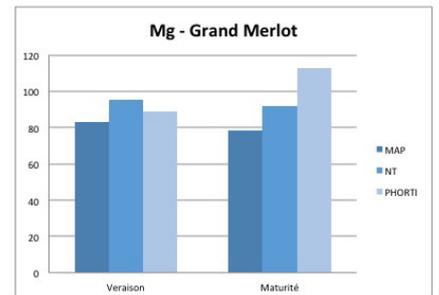
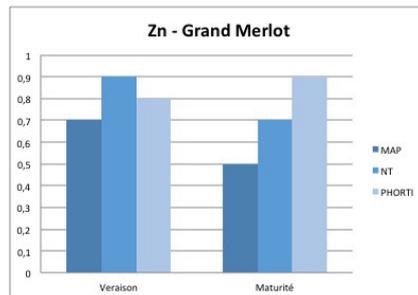
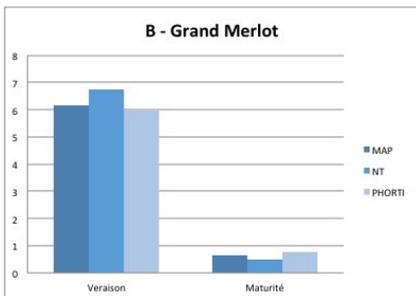
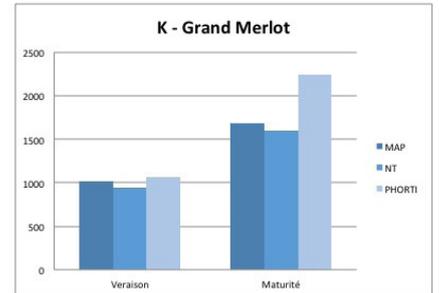
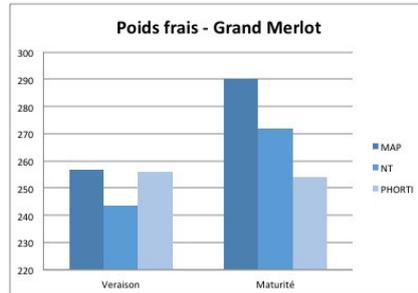
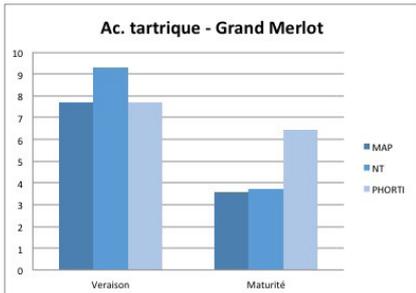
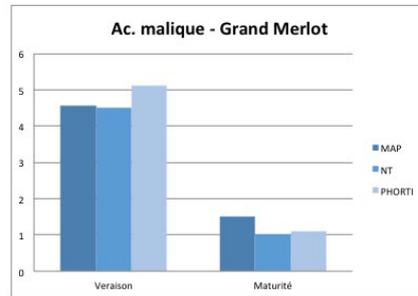
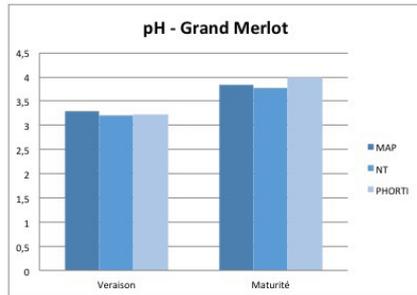
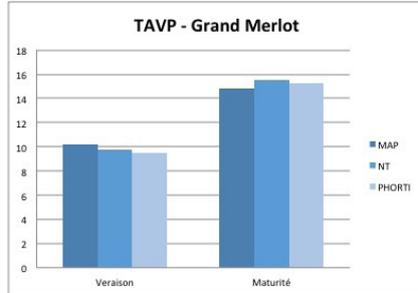
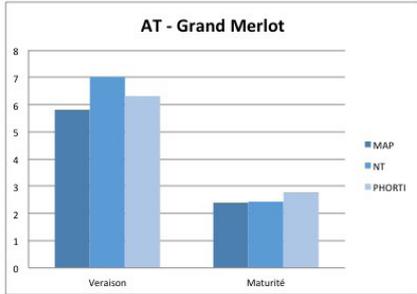
		Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett (sensible à la	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
VER LAI	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont
	NT	p-value (bilatérale) 0,867 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale)	Pr > F Conclusion H0 rejetée Conclusion H0 rejetée
	DAP	p-value (bilatérale) 0,078 Conclusion H0 non rejetée	Comparaison par paires : test de REQWQ Résultat : différence significative pour un échantillon : NOU	
VER Porosite	Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont
	NT	p-value (bilatérale) 0,453 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale)	Pr > F Conclusion H0 rejetée Conclusion H0 rejetée
	DAP	p-value (bilatérale) 0,000 Conclusion H0 rejetée	Comparaison par paires : test de REQWQ Résultat : différence significative pour un échantillon : NOU	

Annexe 18 : Analyse de la composition des moûts - Essai phosphore

• Parcelle Le Jardin



• Parcelle Grand Merlot



Annexe 19 : Analyses statistiques sur la fermeté des baies - Essai calcium

PINOT :

	Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett (sensible à la normalité)	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
NT (27 baies)	p-value (bilatérale) 0,739 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,014 Conclusion H0 rejetée	Pr > F 0,004 Conclusion H0 rejetée
FLO (21 baies)	p-value (bilatérale) 0,083 Conclusion H0 non rejetée	Comparaison par paires : test de REQWQ Résultat : différence significative pour un échantillon : NOU	
VER (36 baies)	p-value (bilatérale) 0,587 Conclusion H0 non rejetée		
NOU (29 baies)	p-value (bilatérale) 0,120 Conclusion H0 non rejetée		

SYRAH :

	Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett (sensible à la normalité)	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
NT (44 baies)	p-value (bilatérale) 0,346 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,120 Conclusion H0 non rejetée	Anova Pr > F 0,038 Conclusion H0 rejetée
FLO (21 baies)	p-value (bilatérale) 0,680 Conclusion H0 non rejetée	Comparaison par paires : test de Dunn Résultat : aucune différence significative	
VER (31 baies)	p-value (bilatérale) 0,222 Conclusion H0 non rejetée		
NOU (37 baies)	p-value (bilatérale) 0,005 Conclusion H0 rejetée		

VIOGNIER :

	Test de normalité des résidus Shapiro-Wilk	Test d'homogénéité des variances Bartlett (sensible à la normalité)	Analyse de la variance ANOVA (ou Kruskal-Wallis)
Modalité	H0 : La variable suit une loi normale	H0 : Les variances sont identiques	H0 : Les modalités sont identiques
NT (27 baies)	p-value (bilatérale) 0,197 Conclusion H0 non rejetée	p-value (bilatérale) 0,007 Conclusion H0 rejetée	Anova Pr > F 0,001 Conclusion H0 rejetée
FLO (21 baies)	p-value (bilatérale) 0,280 Conclusion H0 non rejetée	Comparaison par paires : test de REQWQ Résultat : différence significative pour un échantillon : NT (idem avec Kruskal-Wallis)	
VER (36 baies)	p-value (bilatérale) 0,336 Conclusion H0 non rejetée		
NOU (29 baies)	p-value (bilatérale) 0,151 Conclusion H0 non rejetée		

Annexe 20 : Analyse de la composition des môûts - Essai calcium



Assimilation et effets d'apports foliaires de phosphore et de calcium sur l'équilibre minéral de parcelles de vignes du Languedoc-Roussillon

Résumé :

La nutrition minérale de la vigne a longtemps été réduite aux seuls éléments : azote, potassium et magnésium que l'on apporte au sol. Pourtant, même si leurs bénéfices sont encore peu connus, le calcium et le phosphore participent à l'équilibre de la plante. Le phosphore, outre son rôle dans le métabolisme énergétique, intervient dans le développement racinaire annuel. Parmi les diverses fonctions du calcium, celle qui semble importante est la fermeté et l'élasticité qu'il confère aux pellicules. Les baies résistent mieux aux maladies cryptogamiques, au flétrissement et aux éclatements.

Cette étude a pour but de mieux comprendre l'impact de ces éléments au niveau agronomique et œnologique grâce à une expérimentation sur des parcelles de viticulteurs. Dans ce cadre, la fertilisation foliaire permet de s'affranchir des difficultés d'assimilation au niveau du sol tout en répondant rapidement à des besoins.

Les analyses des éléments minéraux contenus dans les pétioles et les limbes n'ont pas permis de faire une distinction entre les modalités traitées et non traitées. Il semble que l'apport de calcium à nouaison aurait un effet sur la fermeté des baies cela reste à confirmer.

Les recherches doivent encore se poursuivre pour obtenir des résultats solides, ce qui permettrait de mieux ajuster les préconisations en matière de nutrition minérale auprès des viticulteurs.

Mots-clés : calcium, phosphore, vigne, fertilisation foliaire, minéraux, pétiole, fermeté

Assimilation and effects of phosphorus and calcium foliar applications on mineral balance of grapevines in Languedoc-Roussillon

Abstract :

Grapevine's mineral nutrition has been focused for a longtime only on nitrogen, potassium and magnesium, applied on soil. However, even if the benefits from calcium and phosphorus are not completely known, they also contributes in plant's balance. Phosphorus is an important element in the energetic metabolism but it also take part in annual roots development. Calcium has many metabolic functions, but among them what seems substantial is the impact on berry's skin firmness and elasticity. It provides an increased resistance against fungal diseases, wilting and cracking.

This study aims a better understanding about this element's impact from both an agronomical and an enological point of view, with essays carried on commercial plots. Foliar sprays allow vines a faster absorption of this element avoiding the soil path.

Petiole and blade analysis did not show significant differences between control and essays. Calcium sprays may have an effect on firmness at fruit set but more studies should be conducted.

Essays must be continued to obtain solid results, which may lead to an improvement on vine nutrition advisory.

Keywords : calcium, phosphorus, grapevine, foliar fertilisation, minerals, petiole, firmness