



HAL
open science

Caractérisation de l'adaptation aux sols chlorosants des porte-greffes de vigne

Paul Rouanet

► **To cite this version:**

Paul Rouanet. Caractérisation de l'adaptation aux sols chlorosants des porte-greffes de vigne. Agronomie. 2019. dumas-02978407

HAL Id: dumas-02978407

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02978407v1>

Submitted on 26 Oct 2020

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

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

MINISTERE DE L'AGRICULTURE



université
de BORDEAUX

BORDEAUX
SCIENCES
AGRO



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
présenté pour l'obtention du
DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME
option : Viticulture-Œnologie

Caractérisation de l'adaptation aux sols chlorosants des porte- greffes de vigne.



par Paul ROUANET

Année de soutenance : 2019

Organisme d'accueil : UMR « Ecologie et Génomique Fonctionnelle de la Vigne » (ISVV et INRA Bordeaux)

MINISTERE DE L'AGRICULTURE



université
de BORDEAUX

BORDEAUX
SCIENCES
AGRO



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
présenté pour l'obtention du
DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME
option : Viticulture-Œnologie

Caractérisation de l'adaptation aux sols chlorosants des porte- greffes de vigne.

Par

Paul ROUANET

**Mémoire présenté sous la
direction de :**
Mr Jean-Michel Boursiquot

Organisme d'accueil :
UMR « Ecologie et Génomique
Fonctionnelle de la Vigne » (ISVV
et INRA Bordeaux)

Présenté le :
05/11/2019

Maitre de stage :
Mme Elisa Marguerit

Avant-propos et remerciements

Je remercie ma maitre de stage, Madame Elisa Marguerit, pour ses nombreux conseils quotidiens, notamment pour la qualité de son aide en statistiques, et son aide pratique directement au dispositif. Merci du fond du cœur de m'avoir appris les méthodes de travail et pour toutes les corrections que tu as pris le temps de faire tout au long du stage

Je remercie également mon maitre de stage, Monsieur Jean-Michel Boursiquot pour son aide précieuse bibliographique.

Je remercie tout particulièrement Loïc Lagalle, May Phichaya Muykaew, Floriane Binet, Morgane, Marie-Aimée, Lucie Paquereau et Christel Renaud pour m'avoir aidé et conseillé dans de nombreuses manipulations (greffage, désherbage, repotage destruction), ainsi que tout le personnel INRA sans qui l'entretien des plants aurait été très fastidieux comme Jonathan, Nicolas, Jean-Pierre, Guillaume, Maria et Jean-Pascal.

Je remercie également Jeanne, Charlotte et Romain pour leur accueil dans l'UMR et l'esprit d'intégration au sein de l'équipe dont j'ai pu bénéficier.

Merci aussi à Aurélia pour avoir supporté mes heures passées à l'ISVV !

Table des illustrations

Figure 1: Carte de la répartition du calcaire dans les sols agricoles, extraite de la base de donnée d'analyses de sols du Groupement d'Intérêt Scientifique du Sol (GisSol) (Rapport sur l'état des sols en France, 2011).....	5
Figure 2: Pourcentage des différents porte-greffes par rapport aux greffe-boutures totales en France en 2017, tracé par rapport aux données et bilans de la pépinière viticole en 2017 par France AgriMer (voir annexe1).....	5
Figure 3: Echelle de résistance des porte-greffes de vigne basée sur l'IPC, proposée par POUGET et JUSTE (1972).	6
Figure 4 : Photos de vignes atteintes du virus du court-noué (sources : Photos de Coralie Dewasme et Guillaume Darrieurtort)	7
Figure 5: Photos de vignes atteintes de chlorose ferrique (Sources : IFV Sud-Ouest et Paul Rouanet le 15/07/19)	7
Figure 6: Schéma de synthèse du 2.1.2. et du 2.1.3. Adapté à partir de POUGET, DELMAS et BOVARD (1971), HIDALGO et CANDELA (1958), MANARESI (1947) et BAVARESCO (1999).....	8
Figure 7: Schéma de l'absorption classique du fer par les racines de la vigne. Adapté à partir de VARANINI et MAGGIONI (1982), RÖMHELD et MARSCHNER (1986), POUGET (1974), LAFON et COUILLAUD(1961), JUSTE et POUGET (1967), JIMENEZ et al. (2007), BERT (2013), BRUZAU(1969), VERT (2003), SCHMIDT (2006).	9
Figure 8 : Echelle de résistance des porte-greffes au calcaire total dans l'article de LACOUTURE et CANTAGREL pour le BNIC (1986).....	11
Figure 9: Echelle de résistance des porte-greffes au calcaire actif selon GALET (1947).....	12
Figure 10: Echelle de résistance à la chlorose des porte-greffes de vigne basée sur l'I.P.C. dans l'article de POUGET et OTTENWAEELTER (1978).....	12
Figure 11: Résultats des tests sanitaires et génétiques sur le matériel végétal utilisé sur le lot 2019.....	16
Figure 12: Schéma de synthèse du dispositif expérimental (Source : Paul Rouanet)	17
Figure 13 : Photos des plants du lot 2018 du bassin 1, le 17/06/2019, avant et après inondation du bassin	17
Figure 14: Photos des différents symptômes de chlorose associés à un indice de Pouget	18
Figure 15: Définitions des indices de Pouget dans sa publication originale (POUGET et OTTENWAEELTER 1978)	18
Figure 16: Photo de l'appareil de mesure Dualex 4 Scientifics (Force A).....	18
Figure 17: Analyses statistique de l'effet significatif du sol sur les variables mesurées. Les p-value en rouge sont significatives et celles en vert ne le sont pas.....	21
Figure 18: Répartition statistique de l'indice de chlorophylle du 06/06/19 et de la longueur du 03/07/19 pour le lot de plants 2018, par modalité de sol. Les longueurs sont exprimées en cm.	21
Figure 19: Analyse statistique de l'effet porte-greffe sur les variables mesurées des plants 2018 et 2019 en fonction de la modalité de sol.	22
Figure 20: Cercle de l'ensemble des variables (a) du lot de plants 2018, et cercle des variables sélectionnées (b) pour l'Analyse en Composantes Principales finale sur le lot 2018.....	24
Figure 21 : Nuage des individus en fonction des dimensions sélectionnées, et sélection des groupes d'individus par la classification hiérarchique pour le lot 2018.....	25
Figure 22: Cercle de l'ensemble des variables (a) du lot de plants 2019, et cercle des variables sélectionnées (b) pour l'Analyse en Composantes Principales finale sur le lot 2019.....	26
Figure 23 : Nuage des individus en fonction des dimensions et sélection des groupes d'individus par la classification hiérarchique pour le lot 2019.....	27
Figure 24: Photographies des systèmes aériens et des systèmes racinaires correspondant, des individus de 8 porte-greffes apparaissant comme «les plus tolérants » sur l'ACP du lot 2018, en sols calcaire et témoin.28	28
Figure 25: Photographies des systèmes aériens et des systèmes racinaires correspondant, des individus de 8 porte-greffes, apparaissant comme « les moins tolérants » sur l'ACP du lot 2018, en sols calcaire et témoin.	28
Figure 26: Calibration de deux capteurs en fonction de l'extrait en chlorophylle (CEROVIC et al.2013).	30
Figure 27: Photographie d'un exemple de plant hétérogène en terme de symptôme	31
Figure 28: Test de puissance statistique pour déterminer l'effectif nécessaire à l'étude de la longueur et de l'indice de chlorophylle	31
Figure 29: Caractérisation des critères de fertilité, de vigueur et de rendement pour 52 porte-greffes en fonction de 4 cépages (LAGALLE 2019).....	32
Figure 30: Schéma du protocole de dénombrement des nématodes.....	42
Tableau 1: Effets de doses de fer sur la croissance de la vigne cultivée sur sable d'après DELMAS 1971.....	9
Tableau 2: Récapitulatif des variables et calculs utilisés	20
Tableau 3: « Tolérance » de porte-greffes établie selon les groupes de la Classification Hiérarchique, modulés par la position des individus par rapport aux variables principales dans l'Analyses en Composantes Principales.....	29

Table des matières

Table des matières	3
Liste des abréviations	5
1. Introduction	6
2. Contexte bibliographique.....	7
2.1. Les symptômes de la chlorose	8
2.1.1. A l'échelle de l'organisme, des symptômes visuels.....	8
2.1.2. A l'échelle des tissus, un changement d'équilibres chimiques.....	8
2.1.3. A l'échelle du métabolisme, un changement d'activité enzymatique.	9
2.1.4. A l'échelle de la rhizosphère : un changement de population microbienne.	9
2.2. Causes et mécanismes de la chlorose.....	9
2.2.1. L'assimilation du fer par les racines.....	9
2.2.2. Présentation des différentes origines de la carence en fer	10
2.2.3. Zoom sur la chlorose induite par le sol.....	10
2.3. Facteurs de contrôle de la chlorose.....	11
2.3.1. Les exigences en fer du système foliaire pour la synthèse de chlorophylle : l'influence du greffon.....	11
2.3.2. La capacité du système racinaire à satisfaire ces exigences : le porte-greffe.....	12
2.3.3. L'influence des sols et de leur composition	12
2.3.4. Des chloroses plus sévères au printemps : l'influence du régime hydrique.....	13
2.3.5. Les réserves glucidiques et le greffage.....	14
2.3.6. La vigueur et la croissance de la vigne	14
2.4. Moyens de lutte contre la chlorose	14
2.4.1. La lutte préventive	14
2.4.2. La lutte curative	15
2.5. Conclusion et hypothèses de travail.....	16
3. Matériels et méthodes	17
3.1. Matériel végétal.....	17
3.2. Milieux de culture	17
3.3. Entretien du matériel végétal.....	18
3.4. Phénotypage de la tolérance aux sols chlorosants.....	19
3.4.1. Mesure visuelle des symptômes de chlorose : l'indice de Pouget.....	19
3.4.2. Mesure quantitative de l'impact de la chlorose sur la chlorophylle des feuilles grâce au Dualex.	19
3.4.3. Mesure de la croissance par longueur des rameaux	20
3.4.4. Mesure du taux de feuilles vivantes	20
3.4.5. Mesure du diamètre du bois de l'année n-1.....	20
3.4.6. Tableau récapitulatif des variables étudiées.....	20
3.5. Analyses statistiques	20
4. Résultats.....	22
4.1. Effet du sol sur l'indice de chlorophylle et la longueur de rameau :	22
4.2. Effet du bassin d'irrigation et de la distance dans chaque bassin sur les variables mesurées.....	22
4.3. Effet significatif du porte-greffe sur les variables mesurées	23
4.3.1. Lot de plants 2018 en conditions « témoin ».....	23
4.3.2. Lot de plants 2018 en conditions « calcaire »	23

4.3.3. Lot de plants 2019.....	23
4.4. Corrélation des variables de longueur, de chlorophylle et d'indice de Pouget.	24
4.4.1. Lot de plants 2018.....	24
4.4.2. Lot de plants 2019.....	24
4.5. Analyse en composante principale (ACP) : détermination des variables les plus discriminantes et identification des porte-greffes les plus tolérants sur la saison.	25
4.5.1. Analyse des plants d'un an (lot 2018).....	25
4.5.2. Analyse des plants de l'année (lot 2019)	27
4.5.3. Bilan des ACP et établissement d'une liste par lot.....	29
5. Discussion	30
5.1. Matériel végétal : des plants sains sans fruits, greffés dans l'année, pour un même greffon étudié.....	30
5.2. Milieu de culture : sol maîtrisé en pots de taille finie comportant deux modalités non graduées et climat bordelais non maîtrisé.....	31
5.3. Variables mesurées : Représentativité des mesures de chlorophylle du dualix comme indicateur de chlorose et lien avec les autres travaux.	31
5.4. Analyses statistiques : effet de l'irrigation significatif, effectif de population suffisant et limites quantitatives de l'ACP.....	32
5.5. Mise en relation avec les autres caractéristiques évaluées et classements des porte-greffes étudiés.	33
6. Conclusion	34
7. Liste des références bibliographiques	35
<u>Annexes.....</u>	39
Annexe 1 : Statistiques France Agrimer 2017 de la pépinière viticole – Pourcentage des porte-greffes dans les greffes-boutures de 2000 à 2017.	39
Annexe 2 : Liste des porte-greffes utilisés dans le cadre du projet RootBourgogne	40
Annexe 3 : Résultat des analyses de terre – composition des 3 terres utilisées pour l'expérimentation.	42
Annexe 4 : Protocole de dénombrement de nématodes dans une terre analysée (source : Vitinnov).	43
Annexe 5 : Protocole officiel de caractérisation de la tolérance à la chlorose	44
Annexe 6 : Test de la représentativité d'une mesure de dualix par alternance des feuilles pour les plants chlorosés.	46
Annexe 7 : Test de la variabilité de la mesure au Dualix en fonction de la zone de mesure au sein d'une feuille sur plusieurs feuilles d'intensité chlorosante différentes	47
Annexe 8 : Test de l'effet des deux blocs haut et bas sur l'échantillon des plants 2018, et test de l'effet des 4 blocs (haut/bas, bassin 2/bassin 3) sur l'échantillons des plants 2019.*	48
Annexe 9 : Corrélations des différentes variables entre elles pour le lot 2018, en fonction du temps	49
Annexe 10 : Corrélations des différentes variables entre elles pour le lot 2019, en fonction du temps	50
Annexe 11 : Tableau de synthèse des connaissances actuelles sur caractéristiques des porte-greffes utilisés (source : Elisa MARGUERIT, INRA Bordeaux)	51

Liste des abréviations

GIEC = Groupement Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

INRA = Institut National de la Recherche Agronomique

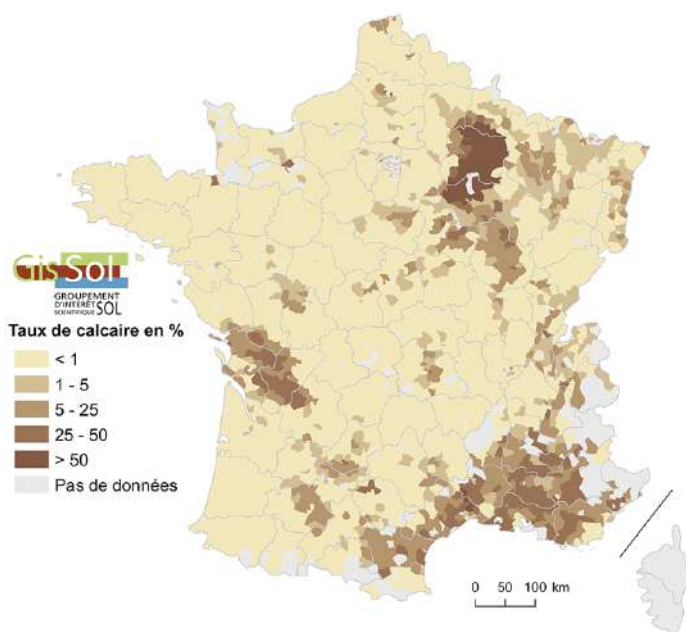
IPC = Indice de Pouvoir Chlorosant

ISVV=Institut des Sciences de la Vigne et du Vin

KW test= Test de Kruskal-Wallis

PG=Porte-greffe

NBI = Nitrogen Balance Index



Source : Gis Sol, Base de Données d'Analyse de Terre, 2011.

Figure 1: Carte de la répartition du calcaire dans les sols agricoles, extraite de la base de donnée d'analyses de sols du Groupement d'Intérêt Scientifique du Sol (GisSol) (Rapport sur l'état des sols en France, 2011).

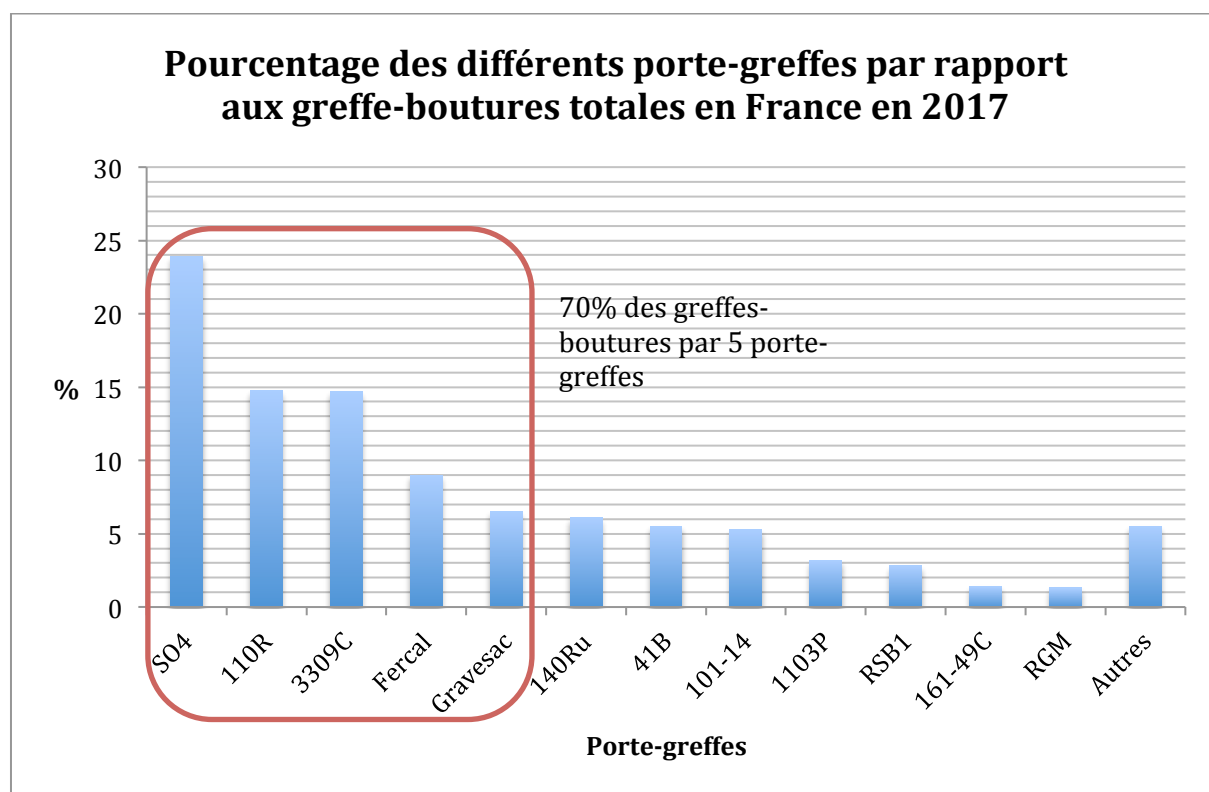


Figure 2: Pourcentage des différents porte-greffes par rapport aux greffe-boutures totales en France en 2017, tracé par rapport aux données et bilans de la pépinière viticole en 2017 par France AgriMer (voir annexe1).

1. Introduction

Tous les jardiniers amateurs le savent : les sols calcaires sont redoutés de tous car de nombreuses espèces de plantes n'y poussent pas forcément. Il en va de même pour les différentes espèces de vigne qui se comportent de façon très hétérogène face au calcaire. Depuis la crise phylloxérique qui a dévasté le vignoble à la fin du XIX^e siècle, la grande majorité des vignes cultivées dans le monde sont issues d'une espèce européenne (*Vitis vinifera*) greffée sur des croisements de plusieurs espèces européennes, américaines ou asiatiques. En toute rigueur, ce sont donc ces différents « porte-greffes » issus de croisements qui sont à l'origine de différences d'adaptation de la vigne en sol calcaire. En effet, le choix d'un mauvais porte-greffe de vigne sur ce type de sol peut conduire à une carence, commune à toutes les autres espèces de plantes, appelée « chlorose » et caractérisée par un jaunissement des feuilles et une perte de rendement.

Compte-tenu de leur histoire géologique d'ancien bassin sédimentaire, une grande majorité des bassins viticoles à forte valeur ajoutée présente des sols à fort taux de calcaire (figure 1). C'est le cas, par exemple, de la Champagne, la Bourgogne ou encore les Charentes. Le choix des porte-greffes utilisés dans ces régions s'est donc naturellement fait en faveur de ceux qui toléraient le mieux ces environnements, et qui ne présentaient pas de symptômes de chlorose.

L'avantage des porte-greffes en viticulture est qu'ils sont très rarement mis en relation avec les caractéristiques organoleptiques du vin produit, et donc qu'ils ne font pas face à des considérations marketing et commerciales ou encore qu'ils ne sont pas soumis à des contraintes réglementaires d'appellation d'origine qui restreindrait leur culture à certaines zones du territoire français. Ainsi, seule l'inscription au catalogue et son classement est nécessaire pour cultiver un porte-greffe dans une région donnée.

Or, en comparaison avec les variétés de *Vitis vinifera* ou « cépages » autorisés (environ 300 au catalogue français 2018), les porte-greffes autorisés ne représentent qu'un petit nombre (31 au catalogue français 2018), et ceux qui sont tolérants à la chlorose sont nécessairement encore moins nombreux (6 selon POUGET et OTTENWALTER 1978¹). En plus de cette diversité limitée, on assiste de manière générale à une sous-utilisation de la diversité des porte-greffes en France, puisque 5 porte-greffes couvrent 69% du vignoble (France Agrimer 2017, Annexe 1 et figure 1). Ainsi, cette sous-utilisation est là encore exacerbée dans ces régions viticoles clés où le calcaire est une contrainte qui réduit le choix des porte-greffes. Par exemple, en Champagne, on assiste à un quasi-monopole du porte-greffe « 41B », et en Bourgogne, 5 porte-greffes recouvrent 95% de la surface plantée (France Agrimer 2013). Parmi eux, le 161-49C est concerné par des problèmes majeurs de dépérissement à l'échelle nationale et le 3309C peut présenter également des difficultés (TORREGROSA et SPILMONT 2014²). Il apparaît donc nécessaire et évident de diversifier la gamme des porte-greffes tolérants à la chlorose plantés dans ces régions, afin d'éviter des « monocultures », pouvant se révéler risquées face aux maladies et aléas climatiques.

Par ailleurs, le changement climatique est désormais un fait avéré, comme le prouvent tous les récents rapports du GIEC. De plus, l'obtention, l'implantation d'un porte-greffe et le remplacement des anciens impliquent un facteur temps indéniable, particulièrement dans des régions où l'âge des vignes est un paramètre économique. C'est pourquoi il convient d'avoir une vision à long-terme lorsque l'on cherche à obtenir de nouveaux candidats. Dans ce contexte, il est donc également nécessaire que les futurs porte-greffes présentent une certaine tolérance à la sécheresse.

Afin de trouver de nouveaux porte-greffes répondants à ces critères, l'exploration de la diversité génétique de la vigne, notamment des porte-greffes étrangers, pourrait être une solution complémentaire à l'innovation variétale. Le dispositif GreffAdapt, constitué de 55 porte-greffes dont 25 étrangers, a été planté de 2014 à 2016. En parallèle de cette implantation au champ, une caractérisation des réponses au déficit hydrique et de la tolérance aux sols chlorosants a été conduite en pot. L'objectif de cette étude est de fournir une liste de 10 porte-greffes relativement résistants parmi ce panel de porte-greffes.

**Echelle de résistance des porte-greffes de Vigne
basée sur l'indice de pouvoir chlorosant (I.P.C.)**

Porte-greffes	Seuil maximal de l'indice de pouvoir chlorosant
Violla	2
Riparia Gloire	5
3309, 101-14	10
Rupestris du Lot	20
99 R, 110 R, SO ₄ , 1103 P	30
5 BB, 420 A	40
161-49, 140 Ru	60
41 B, 333 EM	au-dessus de 60

Figure 3: Echelle de résistance des porte-greffes de vigne basée sur l'IPC, proposée par POUGET et JUSTE (1972).

2. Contexte bibliographique

La chlorose de la vigne est apparue depuis la crise phylloxérique et le début du greffage. En effet, pour lutter contre le phylloxera, les *Vitis* américains et leurs descendants furent utilisés comme porte-greffes à la fin du XIX^e siècle et diffusés sur tout le continent. Or, une fois ces espèces introduites, le vignoble ainsi transformé se mit à exprimer des symptômes nouveaux de jaunissement, dus à une carence qui était inconnue lorsque *Vitis vinifera* n'était pas greffé. Ce jaunissement exprimant une perte de chlorophylle fut donc appelée « chlorose » et les plus forts cas de cette chlorose furent identifiés dans des zones connues pour leurs sols très calcaires. (AUDIN 1900³, POUGET et JUSTE 1972⁴).

Les premiers candidats au greffage pour lutter contre le phylloxera furent les espèces américaines *Vitis rupestris* et *Vitis riparia*, identifiées par le professeur Louis Ravaz. Cependant, ces deux espèces étaient très sensibles à la chlorose dans des terrains très calcaires. Ce n'est qu'après l'obtention de porte-greffes issus de croisements avec *Vitis berlandieri* (41 B, 333 EM, etc...) que la plantation dans les zones les plus chlorosantes (Charente, Champagne) put être réalisée avec succès. La station viticole de Cognac a pu jouer un rôle essentiel dans l'expérimentation de ces porte-greffes d'hybrideurs. Le 41B (1882 par Millardet et de Grasset) a ainsi permis la renaissance du vignoble en sols calcaire. Le 333EM (1883 par Gustave Foëx), plus résistant encore, n'a pas connu le même développement, peut-être à cause de son faible rendement en bois.

A ces premiers porte-greffes résistants à la chlorose vinrent successivement s'ajouter de nouvelles variétés provenant essentiellement des croisements : *Vitis riparia* × *Vitis berlandieri* et *Vitis rupestris* × *Vitis berlandieri*. Ce sont ces porte-greffes qui sont utilisés pour la plupart des plantations actuelles. Au cours des années, grâce à des observations et à des expérimentations conduites dans des milieux et avec des cépages variés (RAVAZ 1902⁵), une échelle de résistance relative des différents porte-greffes à la chlorose en milieu calcaire a pu être établie avec une certaine précision (POUGET et JUSTE 1972⁴, figure 3). Jusqu'au milieu du XX^e siècle, ces porte-greffes obtenus à la fin du XIX^e siècle étaient toujours les seuls à être relativement résistants à la chlorose. En 1959, le Fercal de l'INRA Bordeaux est venu compléter progressivement cette gamme avec sa résistance beaucoup plus accrue, qui plus est en zone humide, découverte en 1978 par Pouget (POUGET et OTTENWALTER 1978¹). Depuis le Fercal, aucun porte-greffe n'a été caractérisé comme étant aussi ou plus résistant.



Figure 4 : Photos de vignes atteintes du virus du court-noué (sources : Photos de Coralie Dewasme et Guillaume Darrieutort)



Figure 5: Photos de vignes atteintes de chlorose ferrique (Sources : IFV Sud-Ouest et Paul Rouanet le 15/07/19)

2.1. Les symptômes de la chlorose

2.1.1. A l'échelle de l'organisme, des symptômes visuels

Les premières choses à connaître sur la chlorose sont les caractères perceptibles sur la vigne qui permettent de la diagnostiquer.

La chlorose est reconnaissable par de nombreux signes extérieurs, notamment un jaunissement caractéristique des feuilles. Pour les chloroses les moins fortes, cela ne concerne que les jeunes feuilles des rameaux principaux ou les entrecoeurs. En revanche, pour des chloroses plus graves, le jaunissement peut s'étendre à tout un rameau ou même parfois la totalité d'un feuillage (figure 5). Dans des cas extrêmes, les feuilles deviennent même presque blanches (absence de chlorophylle) et grillent sous les brûlures du soleil en laissant apparaître de fortes nécroses. La croissance des rameaux est également très faible (rachitisme) et ceux-ci s'aoûtent très mal. Sur les feuilles, la décoloration commence par les zones internervaires, et s'étendent à tout le limbe, sans empiéter sur les nervures principales pour les premières phases.

Au champ, les pieds apparaissent très buissonnants en conséquences. Le pic d'expression se situe souvent au printemps, autour de la floraison.

Ces symptômes peuvent parfois être confondus avec ceux du court-noué, mais dans le cas de la chlorose, les nervures restent bien vertes avant les derniers stades de la carence, alors que dans le cas du court-noué, les feuilles virent au jaune or (figure 4 et 5). A la parcelle, les chloroses calcaires se remarquent souvent par tâches plus ou moins grandes.

A la suite de ce jaunissement du feuillage, des conséquences plus ou moins graves peuvent avoir lieu : pour les chloroses légères précédemment citées, les conséquences sont très peu perceptibles. Pour des chloroses avec jaunissement plus marqué, les souches sont affaiblies et cela peut même entraîner la mort des ceps. En effet, sans chlorophylle et donc avec une désorganisation des chloroplastes, la souche s'affaiblit avec une mauvaise synthèse des sucres jusqu'à mourir. Les trois conséquences majeures de ce jaunissement sont la perte de puissance du pied, la mauvaise fécondation due au manque de chlorophylle et le manque de maturité des raisins. Cela entraîne donc inévitablement une perte de rendement et de qualité des baies avec toutes les conséquences économiques pour les viticulteurs (CORDEAU 1998⁶).

Parallèlement, on observe une disparition totale ou partielle de l'amidon accompagné de l'épuisement des réserves qui se traduit les années suivantes par : une apparition plus précoce de la chlorose, et une croissance encore plus faible (CHAMPAGNOL 1984⁷).

2.1.2. A l'échelle des tissus, un changement d'équilibres chimiques

La composition des tissus est également impactée par la chlorose. POUGET, DELMAS et BOVARD (1971)⁸ montrent sur vigne chlorosée que le phosphore et le potassium ont tendance à s'accumuler (particulièrement les rapports K/Ca et P/Fe) dans les tissus. De fait, les jeunes feuilles chlorosées sembleraient, contre toute attente, présenter une très forte demande de Ca pour équilibrer la forte présence de potassium (HIDALGO et CANDELA 1958⁹).

La présence de Ca entraîne la forte absorption de phosphate (PO_4^{3-}) qui s'accumule et augmenterait la précipitation du fer dans les feuilles (MANARESI 1947¹⁰). Ainsi, le fer semble aussi s'accumuler dans les feuilles chlorosées en présence de sols calcaires pourtant non carencés en fer (POUGET, DELMAS et BOVARD 1971⁸). Cela est encore plus corrélé au statut chlorosé de la vigne lorsqu'on mesure la concentration en fer par rapport au poids frais des feuilles (BAVARESCO et al. 1999¹¹). La synthèse de protéines se ralentirait

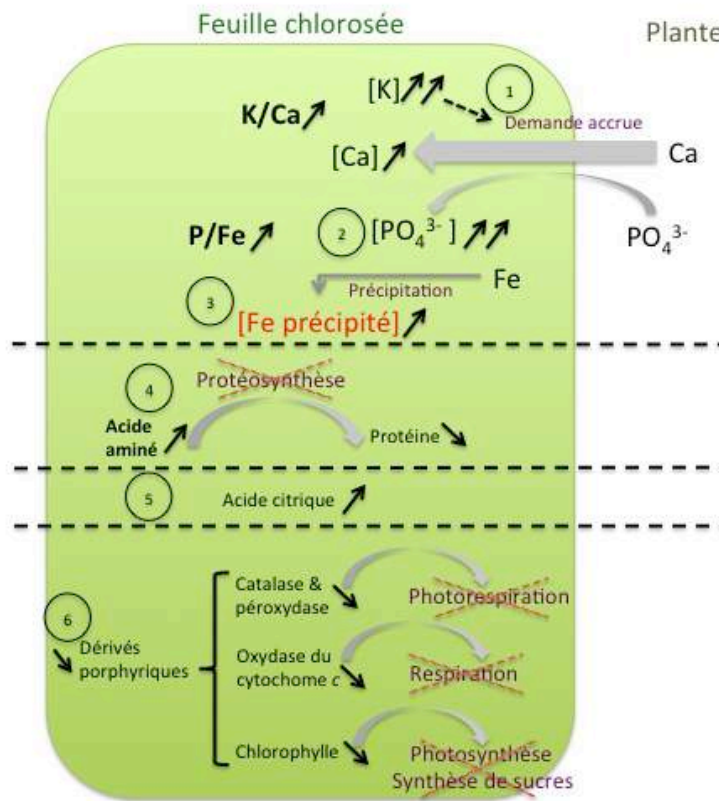


Figure 6: Schéma de synthèse du 2.1.2. et du 2.1.3. Adapté à partir de POUGET, DELMAS et BOVARD (1971), HIDALGO et CANDELA (1958), MANARESI (1947) et BAVARESCO (1999).

1=Accumulation de calcium, 2=Accumulation de phosphates, 3=Accumulation de fer précipité, 4=Accumulation d'acides aminés, 5= Accumulation d'acide citrique, 6=Baisse de synthèse de certains dérivés porphyriques (comme la chlorophylle).

également, même si les composés azotés ne varient pas quantitativement puisqu'ils constatent une accumulation d'acides aminés libres. Enfin, ils constatent également une accumulation d'acide citrique dans les feuilles chlorosées (POUGET, DELMAS et BOVARD 1971⁸).

2.1.3. A l'échelle du métabolisme, un changement d'activité enzymatique.

L'activité enzymatique est très perturbée par la chlorose. POUGET, DELMAS et BOVARD (1971)⁸ décrivent une baisse d'activité de la catalase et de la peroxydase des feuilles, et une baisse de l'intensité respiratoire suite à une baisse d'activité de l'oxydase du cytochrome C. Les cations sont également beaucoup plus absorbés par les racines, relativement aux anions. L'activité photosynthétique diminuant à cause de la baisse de chlorophylle, la synthèse des sucres dans les raisins diminue ainsi que la synthèse de bois. La constatation d'une baisse de catalase a été réalisée par DROUINEAU et GOUNY (1946¹²) sur pêchers, poiriers et cerisiers chlorosés. Cette baisse serait due à l'origine de la catalase : un dérivé porphyrinique tout comme la chlorophylle. (figure 6)

2.1.4. A l'échelle de la rhizosphère : un changement de population microbienne.

Il a déjà été montré que les micro-organismes du sol joueraient un rôle dans la santé des vignes et seraient également liés au terroir (GILBERT et al. 2014¹³). En revanche, il semblerait également que certaines populations de bactéries soit étroitement liées au degré de chlorose des vignes, voir même que certaines populations de champignons (ascomycètes) soient corrélées à la teneur en fer dans le sol et à la teneur en calcium des feuilles, qui augmente dans les cas de chlorose (LEWIS et al. 2018¹⁴).

2.2. Causes et mécanismes de la chlorose

Tout d'abord, la chlorose a été réellement connue et étudiée à partir de 1844, année durant laquelle GRIS¹⁵ découvre le traitement au fer pour lutter contre cette maladie. Puis, MAZE, RUOT, et LEMOIGNE (1912)¹⁶ démontrent que cette maladie est effectivement due à une carence en fer qui entraîne l'arrêt de synthèse de la chlorophylle.

2.2.1. L'assimilation du fer par les racines

Le fer est un élément essentiel en physiologie végétale puisqu'il agit dans les chaînes d'oxydoréduction de la respiration et de la biosynthèse de chlorophylle en tant que catalyseur de réactions. Les dicotylédones, dont fait partie la vigne, ont une stratégie d'absorption du fer basée sur la réduction préalable de celui-ci en Fe^{2+} (VARANINI et MAGGIONI 1982¹⁷), contrairement aux monocotylédones qui le chélatent (RÖMHELD et MARSCHNER 1986¹⁸). La plante doit alors avoir la capacité de réduire le Fe^{3+} du sol en Fe^{2+} pour pouvoir le transporter (POUGET 1974¹⁹). LAFON et COUILLAUD ont justement montré en 1961²⁰ que les sels de fer sont assimilés dans les racines de la vigne à l'état de sels ferreux (II) modifiés par des acides organiques, ou chélates.

Pour cela, il a d'abord été montré qu'elle exsudait des substances très réductrices dans son milieu au niveau des racines (JUSTE et POUGET 1967²¹). En effet, les racines sécrèteraient des protons grâce à des ATPases, ce qui acidifierait la rhizosphère et extrairait le fer des chélates du sol. Puis, des réductases membranaires réduiraient le Fe^{3+} en Fe^{2+} et l'absorbent (JIMENEZ et al. 2007²², BERT 2013²³).

Ainsi, dans la sève de vigne, F. BRUZAU (1969, résultats non publiés, cités chez POUGET 1974¹⁹) aurait prouvé que le fer migre sous forme de citrate de fer. La formation du

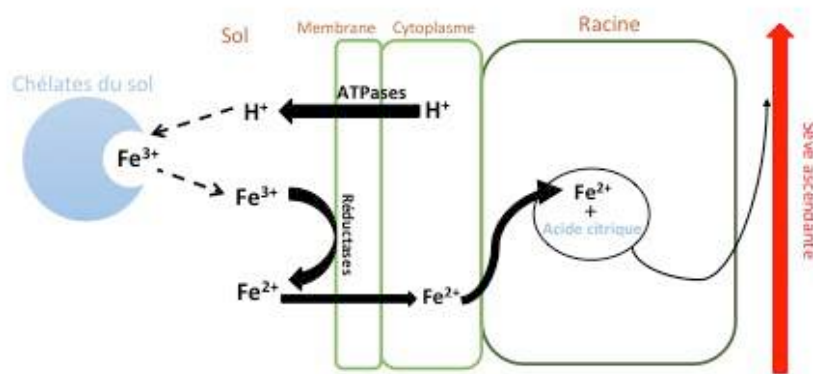


Figure 7: Schéma de l'absorption classique du fer par les racines de la vigne. Adapté à partir de VARANINI et MAGGIONI (1982), RÖMHELD et MARSCHNER (1986), POUGET (1974), LAFON et COUILLAUD(1961), JUSTE et POUGET (1967), JIMENEZ et al. (2007), BERT (2013), BRUZAU(1969), VERT (2003), SCHMIDT (2006).

Fer µg/L	Racines g/plante	Rameaux cm/plante	Entrecoeurs cm/plante	Entrecoeurs Rameaux %
12	20	355	270	76
60	90	711	637	90
120	145	1121	110	10
600	195	1226	107	9

Tableau 1: Effets de doses de fer sur la croissance de la vigne (var.Merlot) cultivée sur sable d'après DELMAS 1971

complexe fer - acide citrique aurait lieu dans la racine entre le site d'absorption et le point de départ du courant ascendant de sève.

En tout état de cause, l'étape de réduction du fer dans le sol semble être l'étape limitante qui conduirait aux carences en fer (VERT et al. 2003²⁴, SCHMIDT 2006²⁵). (figure 7)

2.2.2. Présentation des différentes origines de la carence en fer

La littérature concernant les causes de cette maladie est certainement l'une des plus conséquentes de la viticulture, étant donné les enjeux qu'elle a pu avoir durant la période post-phylloxéra. Certains auteurs (GAY-BELLILE 1972²⁶) différencient toujours la « chlorose calcaire » de la « chlorose par carence de fer ». Nous pouvons ainsi distinguer 3 types de carences en fer (CHAMPAGNOL 1984⁷):

- Les **carences directes ou vraies**, causées par un manque de fer assimilable dans le sol, bien illustrées par les résultats de la thèse de DELMAS en 1971²⁷ (tableau 1).
- Les **carences induites**, qui résultent de la mauvaise disponibilité du fer pour la plante, avant absorption, à cause des ions bicarbonates en sol calcaire.
- Les **carences physiologiques** dues à un mauvais transport du fer au sein de la plante ou par un mauvais transport des glucides dans les racines, notamment au niveau d'un mauvais point de greffe (POUGET 1974¹⁹).

La chlorose est donc la conséquence de deux points : la disponibilité en fer dans le sol et la réponse de la plante face à cette disponibilité (exigence du système foliaire et capacité du système racinaire à le satisfaire). Nous nous concentrerons sur la chlorose induite dans la suite de cet exposé, plus importante en viticulture.

2.2.3. Zoom sur la chlorose induite par le sol

Le sol calcaire semble induire une chlorose selon 2 mécanismes :

- une mauvaise absorption du fer dans la plante.
- une insolubilisation du fer dans la plante après absorption.

Un sol calcaire est composé de CaCO_3 qui se dissout sous l'action de l'acide carbonique des racines (H_2CO_3 provenant du CO_2) en 2 produits : Ca^{2+} et HCO_3^- .

Au commencement, l'absorption trop grande de Ca^{2+} était mise en cause. Celle-ci permet le transport d'acide oxalique en le salifiant, lui-même accélérant ensuite la synthèse des acides organiques, nécessaires à l'équilibre osmotique de la plante. Une autre hypothèse était que les plants d'espèces américaines ayant souvent des besoins plus élevés en Ca, ceux-ci absorberaient plus de phosphates en milieu calcaire et restreindraient ainsi l'apport en fer pour le greffon de *Vitis vinifera*, très demandeur de cet élément, car les phosphates précipitent le fer (MANARESI 1947)¹⁰.

Suite aux travaux de HARDLEY et LINDNER (1945²⁸), on découvrit que la chlorose pouvait être induite en l'absence de Ca^{2+} (par du Na_2CO_3), donc l'hypothèse la plus acceptée est celle selon laquelle la forte présence d'ions bicarbonates (HCO_3^-) dans ces sols modifie le métabolisme des racines et entraîne une diminution du transfert du fer des racines vers les parties aériennes.

La présence des ions bicarbonates semble perturber la biosynthèse de l'acide citrique dans les racines, qui chélate normalement le cation fer (complexe) pour pouvoir circuler dans la sève et passer dans les organes aériens (MARSCHNER 1986¹⁸, CORDEAU 1998⁶). Ce mécanisme empêche donc la plante d'assimiler le fer disponible dans le sol, et induit une chlorose par mauvaise assimilation de fer dans la plante.

Les travaux de PORTER et THORMA (1955)²⁹, MILLER, EVANS et THORNE (1956)³⁰, STELWIJK et THIMANN (1957)³¹ et BOXMA (1972)³² ont permis de préciser également les mécanismes de l'insolubilisation du fer après absorption.

Le CO₂ absorbé sous la forme bicarbonate par les racines et non pas par les feuilles serait transporté « enzymatiquement » dans la plante et ne rentrerait donc plus dans la synthèse de glucides (cycle de Calvin), mais dans celle d'acide organique (malique surtout), qui sont métabolisés ensuite (cycle de Krebs). Cette synthèse accrue d'acides organiques entraîne également une forte demande de cations (CHAMPAGNOL 1984⁷).

La conséquence première serait une abondance du métabolisme et de la protéosynthèse, entraînant une couleur très verte du feuillage (caractéristique). Puis, les glucides se raréfient, la pression osmotique diminue, à tel point que pendant la nuit, l'amidon de réserve est mobilisé pour la respiration et l'acide malique est dégradé. Ce substrat s'épuise donc petit à petit, réduit la respiration et entraînerait une augmentation de pH dans le milieu. En conséquence, le Fe³⁺ précipite, puis le Fe²⁺, indispensable aux oxydations. Enfin, une protéolyse se déclenche pour extraire les derniers matériels respirables et les chloroplastes se désorganisent par arrêt de synthèse chlorophyllienne. Parfois, la pression osmotique peut se rétablir progressivement, arrêtant la protéolyse et de fait la chlorose, si la désorganisation des chloroplastes n'a pas atteint la base des rameaux. Cependant, si elle se généralise, la chlorose peut devenir irréversible.

Certains QTL (Quantitative Traits Loci) ont même été identifiés comme majeurs dans la réponse de la vigne à la chlorose. Deux QTL sont particulièrement concernés et semblent être aussi impliqués dans le contrôle de la chlorophylle foliaire en condition chlorosante pour le premier, et pour le second à la fois dans le contrôle de la croissance sous n'importe quelle condition et dans les symptômes foliaires de chlorose (BERT et al. 2012²³). Bien que cette expérimentation soit faite sur des descendances non greffées, et que le mécanisme semble très complexe, cela permet d'envisager un jour une sélection assistée par marqueurs.

2.3. Facteurs de contrôle de la chlorose.

La connaissance des facteurs qui entraînent une chlorose est capitale pour pouvoir tenter de les maîtriser ou d'adapter le matériel végétal à ces conditions.

2.3.1. Les exigences en fer du système foliaire pour la synthèse de chlorophylle : l'influence du greffon

Le greffon peut tout d'abord être à l'origine de symptômes accrus de chlorose. Par exemple, dans le bordelais, le Merlot résiste souvent mieux que le Cabernet Sauvignon et le Sémillon plus que le Sauvignon blanc ; dans le midi le Grenache et le Carignan résistent mieux que le Cinsault (CHAMPAGNOL 1984⁷) ; et enfin la très grande sensibilité de Syrah/110R a été constatée (DELAS 2010³³).

En effet, des symptômes de chlorose apparaissent sur certains greffons dans un sol calcaire avec un porte-greffe, alors que sur le même sol, le système foliaire du même porte-greffe non greffé ne chlorose pas (BRANAS 1974³⁴). Ainsi, les cépages semblent avoir des exigences en fer différentes entre eux, ce qui a permis à certains auteurs de classer directement ces variétés (BRANAS 1974³⁴, POUGET et OTTENWALTER 1978¹, AGULHON 1980³⁵). Une des explications avancée est l'intensité du métabolisme de chaque greffon. Les classements des greffons sont d'ailleurs différents en fonction du porte-greffe utilisé. Tout se passe comme si le porte-greffe avait des niveaux d'assimilation des minéraux différents du greffon et lui imposait ce spectre d'éléments. Ainsi, lorsque les deux spectres ne coïncident pas, un manque d'un élément peut se produire, par carence directe, parfois même en parallèle d'une carence induite pour le fer (RAVAZ, LAGATU et MAUME 1926³⁶).

**Echelle de résistance
des porte-greffes au calcaire total.**

Porte-Greffes	% de calcaire total
101-14, 44-53, 3309	15 à 25
Rupestris du Lot	25
R 110, R 99, Paulsen 1103	30
Téléki 5 BB, 420 A, SO4	35
161-49, R.S.B.	40 à 45
41 B, 333, Ruggiéri 140	50 à 60
Fercal	supérieur à 60

Figure 8 : Echelle de résistance des porte-greffes au calcaire total dans l'article de LACOUTURE et CANTAGREL pour le BNIC (1986)

2.3.2. La capacité du système racinaire à satisfaire ces exigences : le porte-greffe

La carence de glucides dans le système racinaire impacte l'absorption d'éléments minéraux en général (POUGET 1974¹⁹). Ainsi, les porte-greffes résistants semblent présenter des mécanismes d'absorption et de transport des ions plus efficaces en apport réduit de glucides pour leur métabolisme. Les greffons, tributaires du porte-greffe, vont ensuite extérioriser plus ou moins cette sensibilité selon leurs besoins et leur capacité de transport et d'utilisation de fer en présence de bicarbonate (POUGET, DELMAS et BOVARD 1971⁸).

Afin de pouvoir quantifier cette capacité des porte-greffes à transmettre du fer au greffon, les critères physiologiques ci-après ont été étudiés pour les classer. L'objectif était alors de mettre ces classements en relation avec ceux établis par rapport au calcaire actif du sol. On peut citer la production d'anhydride carbonique par les racines (KESSLER 1960³⁷), l'absorption, le transfert et la répartition du P^{32} , Ca^{45} , Fe^{50} et Cs^{137} dans la vigne (EYNARD 1961³⁸), le maintien en solution du fer des sols calcaires grâce aux exsudats racinaires (JUSTE et POUGET 1967), l'aptitude à croître en milieu artificiel contenant des ions bicarbonates (POUGET et OTTENWAELETER 1973³⁹), l'influence de concentrations de CO_2 et d' O_2 et de présence d'hydrocarbures dans le sol sur le système racinaire (PERRET et KOBLET 1979⁴⁰), et enfin les constantes cinétiques d'absorption du fer par des racines coupées en rapport avec le pH et la température (MAGGIONI 1980⁴¹).

Comme vu précédemment, la limite de tous ces classements et études est que le système racinaire d'un porte-greffe peut très bien absorber le fer en sol calcaire, mais très mal le transporter jusqu'à son greffon (POUGET 1974¹⁹, CORDEAU 1998⁶). Ainsi, pour analyser indépendamment les deux systèmes racinaires et foliaires, POUGET et OTTENWAELETER (1978)¹ ont proposé la méthode des greffes réciproques pour comparer les deux systèmes entre eux, en sol très chlorosant, sans rentrer dans les détails peu concluants des critères physiologiques. Certaines méthodes ont par la suite été proposées pour évaluer la résistance à la chlorose induite d'un porte-greffe ou même d'un greffon, comme la méthode *in vitro* pour réduire le temps d'évaluation (PIAGNANI 1997⁴², TANGOLAR et al. 2008⁴³). Ces travaux ont notamment fait suite aux résultats de STEPHENS (1990)⁴⁴, qui a pu montrer sur du soja que, en comparaison avec la méthode en pot, les individus évalués « résistants » par cette méthode *in vitro* étaient encore plus corrélés aux individus « réellement résistants » au champ.

2.3.3. L'influence des sols et de leur composition

Le sol est logiquement un facteur prédominant dans la lutte préventive contre la chlorose : plus un sol est calcaire, plus il a de chances d'être alcalin et de contenir des ions bicarbonates.

Cela permet par la suite de faire le bon choix de porte-greffe, le deuxième facteur le plus important après le sol.

Le **calcaire total** d'un sol peut être aisément mesuré en laboratoire. Il suffit de mettre la terre en présence d'un acide fort qui dissout le calcaire en milieu fermé, et de mesurer le volume de CO_2 dégagé. Cet indice donne une première indication utile sur le potentiel de chlorose induite d'un sol. La première échelle de résistance en fonction du calcaire total est ainsi déterminée par cette méthode (BRANAS, BERNON et LEVADOUX 1939⁴⁵). Cette échelle a été reprise dans un article de LACOUTURE et CANTAGREL pour le BNIC en 1986⁴⁶, et est détaillée dans la figure 8.

Il existe une multitude de textures de calcaire : il peut être sous forme cristalline, en grain très durs, ou sous forme molle et amorphe pour les précipitations de limons calcaires. Sa solubilisation et sa décomposition par les racines peuvent être très lentes sous sa forme dure. C'est pourquoi même avec une grande proportion de calcaire dur dans une terre, cette même terre peut avoir une faible solubilisation de HCO_3^- . Ce rapport entre solubilisation et

Porte-greffes	Résistance au calcaire actif (%)
196-17Cl	6
Riparia Gloire	6
101-14 MGt	9
3309 C	11
Gravesac	12
Rupestris du Lot	14
R 99	14
R 110	17
1103 P	17
SO4	20
5BB	20
420 A	20
161-49 C	25
Ru 140	20
41 B	40
Fercal	40

Figure 9: Echelle de résistance des porte-greffes au calcaire actif selon GALET (1947)

TABLEAU II

Echelle de résistance à la chlorose des porte-greffes de Vigne basée sur l'Indice de Pouvoir Chlorosant (I.P.C.) (Porte-greffes les plus résistants)

Porte-greffes	Valeur de l'I.P.C. au-delà de laquelle la chlorose peut apparaître
<i>RSB 1</i>	50
<i>41 B</i>	60
<i>333 EM</i>	70
<i>140 Ru</i>	90
<i>Fercal</i>	120

Figure 10: Echelle de résistance à la chlorose des porte-greffes de vigne basée sur l'I.P.C. dans l'article de POUGET et OTTENWALTER (1978)

dimension des grains (finesse) a été mis en évidence par DROUINEAU et GOUNY en 1951¹². Par exemple, DROUINEAU (1942) avait pu établir que la solubilité doublait lorsqu'on passe d'un sable fin (>50µm) à un limon (<20µm). Ainsi, la mesure du calcaire total donne une idée imparfaite du « pouvoir chlorosant » d'un sol en prenant en compte ces parties grossières.

En conséquence, la viticulture a adopté comme amélioration la **méthode du calcaire actif**, dite DROUINEAU-GALET (deux méthodes A et B de dosage du calcaire actif GALET 1951⁴⁷), proposée par DROUINEAU (1942)¹² et modifiée par GALET (1947)⁴⁸ pour établir une échelle de résistance des porte-greffes (figure 9). Cette méthode consiste à mettre au contact la terre calcaire et une solution d'oxalate ammonique pendant seulement deux heures, pour n'attaquer que les particules les plus fines. Puis, un dosage manganométrique de cette solution par excès est réalisé. C'est la méthode la plus largement utilisée depuis soixante ans. Certains ont tenté, sans résultats satisfaisants, de relier le calcaire actif au calcaire total par l'origine géologique et le pourcentage d'éléments fins, par praticité (ROD 1974⁴⁹). Dans tous les cas, les laboratoires peuvent ainsi déterminer aujourd'hui la fraction active du calcaire total qui correspond au calcaire des parties fines (argile et limon). Cela représente une partie très variable du calcaire total qui n'est utile à déterminer en pratique que lorsque le calcaire total dépasse 10%. Cet indice montre alors une bonne cohérence avec les résultats agronomiques, néanmoins il serait erroné dans les sols gypseux (HIDALGO 1975⁵⁰) et dans les sols manquant de fer, car la carence directe se superpose à la carence induite.

Le manque direct de fer est très rare mais sa présence sous forme insoluble est assez fréquente (WINKLER 1974⁵¹). Ces formes insolubles sont celles des sels de fer qui deviennent particulièrement insolubles dans des sols à fort pH et plus difficilement extractibles par les substances réductrices des racines (LAFON et COUILLAUD 1961²⁰, JUSTE et POUGET 1974¹⁹). Dans certaines régions septentrionales où le calcaire actif est situé en-deçà du seuil prévu pour le porte-greffe concerné, on a pu ainsi observer des chloroses en sol peu calcaire, mais relativement pauvres en fer « libre », par chlorose directe. Cela nécessitait donc l'utilisation d'un critère combinant richesse en fer facilement extractible par la plante, et teneur en calcaire actif (POUGET et JUSTE 1972⁴, BRANAS 1974³⁴). C'est ainsi qu'est né à l'INRA de Bordeaux l'**Indice de Pouvoir Chlorosant (IPC)**, qui tient compte à la fois du calcaire actif, mais aussi de cette teneur en fer extractible. La méthode a ainsi été proposée par POUGET et JUSTE (1972)⁴. Ils ont ainsi pu établir un nouveau classement présenté dans la figure 10.

Cependant cet indice est moins stable que le calcaire actif à cause de la variabilité du dosage du fer extractible, et son estimation est donc très variable en fonction des laboratoires (CORDEAU 1998⁶). Il existe donc des problèmes de méthodologie de ce dosage qu'il conviendrait de résoudre pour obtenir une réelle fiabilité du dosage. De nombreux autres facteurs biaisent également cet indice : prélèvement et conservation de l'échantillon, volume exploré par les racines, hydromorphie, texture, géologie ...

2.3.4. Des chloroses plus sévères au printemps : l'influence du régime hydrique

Une hydromorphie trop prononcée peut entraîner une asphyxie radiculaire qui perturbe l'absorption du fer (SCHOLL 1979⁵²). Ainsi, certaines fortes pluies printanières ou automnales peuvent même aggraver une chlorose l'année suivante. De même, une pluviométrie importante augmente la dissolution du bicarbonate et son effet toxique sur l'absorption du fer (LAFON et COUILLAUD 1961²⁰, POUGET, DELMAS et BOVARD 1971⁸, GAY-BELLILE 1972²⁶).

Enfin, même sur certains sols fertiles sans calcaire, mais très argilo-limoneux et contenant beaucoup de matière organique, il a été observé des symptômes de chlorose dans le Bordelais après de fortes pluies. Ainsi, même certains porte-greffes modérément résistants

comme le SO₄ auraient exprimés des symptômes de chlorose (CORDEAU 1998⁶). Dans certains sols calcaires pentus, certains entraînements latéraux d'ions bicarbonates par lixiviation provoquent même l'apparition de chloroses dans des parcelles en contrebas non chlorosantes.

MORLAT (1980)⁵³ a décrit des chloroses graves lors d'années très sèches. Cela pourraient être dû à une exploration plus profonde du sous-sol en recherche d'eau, et donc à un contact avec des horizons plus chlorosant. A l'inverse, certaines sécheresses peuvent modifier la vigueur des plantes et augmenter ensuite leur résistance à la chlorose (POUGET et OTTENWAEELTER 1978¹).

2.3.5. Les réserves glucidiques et le greffage

Pour la synthèse de l'acide citrique nécessaire au transport du fer, la vigne a besoin de réserves glucidiques. Ainsi la surproduction ou la destruction prématurée du feuillage (gel, grêle, maladies...) peut l'empêcher de constituer des réserves et accroître les chloroses l'année suivante : la chlorose apparaît alors comme un phénomène qui s'auto-entretient d'une année à l'autre (CORDEAU 1998⁶). De même, un mauvais point de greffe peut empêcher la vigne de transporter ses glucides synthétisés du feuillage vers la partie racinaire, et ainsi bloquer la synthèse d'acide citrique (POUGET 1978¹⁹).

Il a également été montré plus tard que dans certains cas, le point de greffe n'est pas le point crucial de la chlorose, mais plutôt la structure morphologique des vaisseaux du greffon. En effet, le taux de chlorophylle mesuré et la croissance des plants seraient reliés à la conductivité hydraulique de la plante (BAVARESCO 2000⁵⁴). Ainsi, la greffe entraîne parfois une baisse de résistance à la chlorose, avec en conséquence une augmentation d'éléments minéraux dans les feuilles, sans être utilisés, quel que soit le porte-greffe ou le greffon, avec des différences mal expliquées en fonction du matériel végétal.

2.3.6. La vigueur et la croissance de la vigne

Tous les facteurs qui diminuent la vigueur peuvent aussi accentuer la chlorose par diminution de la synthèse de matières carbonées et donc d'acides organiques. Par exemple, un temps froid au printemps, un mauvais dessèchement du bois de l'année précédente ou une grêle (GAY-BELLILE 1972²⁶). De même, les jeunes vignes sont en général plus sensibles à la chlorose que les plus âgées (HIDALGO 1982⁵⁵).

Une croissance trop rapide provoquée par de fortes températures peut aussi aggraver les symptômes de chlorose, par augmentation des besoins en Fer. De même, la lumière intense peut augmenter le jaunissement des feuilles chlorosées (POUGET, DELMAS et BOVARD 1971⁸).

2.4. Moyens de lutte contre la chlorose

2.4.1. La lutte préventive

Le moyen de lutte le plus durable est évidemment préventif en choisissant un sol peu chlorosant et/ou avec un matériel végétal adapté à ce milieu pédologique.

A l'échelle d'une parcelle, la chlorose n'est jamais homogène : certaines zones sont plus chlorosantes soit parce que la couche calcaire remonte en surface, soit parce qu'il y a une plus grande hydromorphie. Il faut donc localiser ces zones afin d'adapter le matériel planté. En effet, cela permet d'utiliser des porte-greffes moins restrictifs sur le reste de la parcelle et parfois plus adaptés aux rendements souhaités. Dans le cas des replantations, l'observation de

la parcelle les années précédentes constitue un outil de décision très puissant (CORDEAU 1998⁶).

Une fois ces zones repérées, il faut analyser le sol dans plusieurs horizons, parfois même jusqu'à la roche mère si l'enracinement est observé dans l'horizon. Bien souvent, le calcaire actif ou l'IPC est plus élevé en profondeur. Il faut alors choisir un porte-greffe adapté en prenant une marge de sécurité.

On peut également chercher à améliorer l'aouûtement de la vigne pour une meilleure mise en réserve et éviter des symptômes l'année suivante (POUGET 1978¹⁹). L'élimination d'un excès d'humidité est toujours conseillable lorsqu'elle est économiquement possible.

2.4.2. La lutte curative

Certains traitements curatifs peuvent également être préconisés, qui permettent de réduire l'intensité de la chlorose :

- un apport de fer au sol pendant la période végétative de la vigne par enfouissement de 3-4T/ha de sulfate ferreux pour une durée de 2-3 ans avant oxydation et arrêt de la disponibilité pour la plante (DELAS 2010³³) ;
- un apport foliaire de fer par du nitrate ou du sulfate de fer pour des petites chloroses, avec une application régulière au début de la croissance, à 7kg/ha. Attention tout de même aux risques de brûlure foliaire si la concentration dépasse 1,5kg/hL (DELAS 2010³³) ;
- une addition de EDDHA (iron-ethylenediaminedi (o-hydroxyphenylacetate) acid) en sol acide (SMITH et CHENG 2006⁵⁶) permet de réduire cette chlorose ;
- certaines techniques d'enherbement de l'inter-rang, comme avec *Festuca rubra*, seraient aussi efficaces que l'emploi de chélates, et moins coûteuses à long-terme, de même que l'addition de NH_4^+ avec un inhibiteur de nitrification (DMPP), qui évite que l'efficacité ne diminue au cours des années (COVARRUBIAS et al. 2014⁵⁷) ;
- des amendements d'argiles pour baisser le pouvoir chlorosant des sols sont également pratiqués depuis longtemps, comme en Bourgogne ou en Champagne où certaines argiles peuvent aussi contenir du fer (HIDALGO 1982⁵⁵).

2.5. Conclusion et hypothèses de travail

La chlorose est donc un phénomène physiologique complexe qui concerne beaucoup d'espèces lorsqu'elles sont cultivées en sol calcaire et qui a fait l'objet de nombreuses études et expérimentations depuis sa découverte sur la vigne. Le choix du porte-greffe utilisé semble être un facteur déterminant juste après le choix du sol de culture. Ainsi, des classifications des porte-greffes en fonction de leur tolérance à la chlorose ont été établies, mais celles-ci diffèrent en fonction des méthodes et des variables de sols étudiées, et les dernières ont été publiées par POUGET et OTTENWAEELTER en 1978¹, sur des parcelles expérimentales mais uniquement sur les porte-greffes inscrits actuellement au catalogue français, et sur des critères d'observation qualitatifs des individus (indice de Pouget). La caractérisation de la tolérance à la chlorose par d'autres variables quantitatives mesurées en conditions contrôlées permettrait de réduire les coûts et la durée de ces caractérisations, mais également d'affiner la compréhension phénotypique de cette carence.

A travers cette étude, nous cherchons à répondre à la question suivante :

Comment phénotyper la tolérance à la chlorose et quels sont les porte-greffes qui confèrent la plus grande tolérance ?

Afin d'y répondre, nous étudierons successivement les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : La large gamme de porte-greffes utilisés exprime une large gamme de tolérance à la chlorose.

Hypothèse 2 : Les caractères étudiés permettent bien de phénotyper la chlorose

Hypothèse 3 : Certains porte-greffes utilisés à l'étranger sont aussi tolérants à la chlorose que certains porte-greffes déjà inscrits au catalogue français et considérés comme « tolérants » dans la plupart des classifications.

Analyses sanitaires

Lot de plants	Virus testé	Porte-greffes testé
Plants 2019	Marbrure	Teleki8B 34EM
	Court-noué	BC2
	Enroulement type I et II	BC2

Analyses génétiques

Lot de plants	Porte-greffe probable	Porte-greffes testé
Plants 2018	Non connu	150-15M 1045P
Plants 2019	Borner	34EM

Figure 11: Résultats des tests sanitaires et génétiques sur le matériel végétal utilisé sur le lot 2019

3. Matériels et méthodes

3.1. Matériel végétal

Lors de cette étude, un premier lot de plantes avait déjà été mis en pot en 2018 et le second l'a été cette année 2019.

Afin de pouvoir comparer les différents porte-greffes étudiés entre eux, le greffon est le même pour tous les plants. Il s'agit du Pinot noir clone 115, très apprécié pour la qualité des vins produits et bien diffusé dans le vignoble bourguignon. Quant aux 52 porte-greffes utilisés, la liste est fournie en Annexe 2. Ce panel de porte-greffes a été choisi parmi les 55 utilisés dans le dispositif GreffAdapt. Cela comprend les 30 porte-greffes du catalogue français et 22 porte-greffes étrangers.

Les rameaux des 52 porte-greffes sont envoyés par les différentes collections de France et d'Europe (Geisenheim, Milan et Hongrie). Des échantillons de ces rameaux et de ceux du Pinot noir 115 sont prélevés pour vérifier ensuite l'identité génétique et l'état sanitaire par l'UMT GénoVigne. Pour l'analyse sanitaire, l'objectif était de dépister la présence éventuelle de virus tels que le GFLV (Grapevine Fan Leaf Virus) et l'ArMV (Arabic Mosaic Virus) pour le court-noué, les 9 GLRaV de 1 à 9 (Grapevine LeafRoll-associated Virus) pour les 9 sérotypes de l'enroulement, et le GFkV (Grapevine Fleck Virus) pour la marbrure. Ces tests sont d'ailleurs obligatoires pour l'inscription au catalogue français et leurs résultats sont présentés dans la figure 11. Après conservation en chambre froide (3°C), ils sont greffés, identifiés, pesés et cirés. Ils sont ensuite « stratifiés » sous sciure en chambre chaude pendant 3 semaines (84% d'humidité et 26°C) pour stimuler la callogenèse. Après ces 3 semaines, les plants sont sortis et cultivés dans des barquettes sous serre pendant un mois, pour stimuler la rhizogenèse et la caulogenèse. Les plants sont ensuite rempotés et cultivés dans le dispositif en pots blancs contenant 7L de terre.

On greffe ainsi 15 plants par variété de porte-greffe, pour s'assurer d'en obtenir 9 viables à la fin du processus (au repotage), soit 60% de taux de reprise. Le taux réel varie finalement de 50% à 100% avec une moyenne de 80%, ce qui impose une réduction des individus témoins pour les porte-greffes ayant moins de 60% de taux de reprise (99R, M4, NemaDex, DogRidge).

Chaque variété de porte-greffe est séparée en trois lots de minimum 3 individus pour 3 modalités : terre témoin non chlorosante, terre calcaire et terre calcaire+terreau (matière organique). Cette dernière modalité a été choisie cette année en accord avec la bibliographie qui semblait montrer une tendance des matières organiques à diminuer les symptômes de chlorose (CORDEAU 1998⁶).

Seulement deux modalités avaient été retenues la saison précédente : terre calcaire (>20% de calcaire actif) et terre témoin non chlorosante. Pour chaque modalité, 3 plants d'un même porte-greffe ont été plantés, soit environ 156 plants pour chaque terre.

3.2. Milieux de culture

La terre témoin non chlorosante provient des 30cm d'un fossé argilo-limoneux de château Couhins, la terre calcaire provient du plateau de Saint-Emilion, sur 30cm également, et le terreau provient de sacs de terreau classique. Les compositions de ces trois terres sont mises en annexe (Annexe 3) et les 30cm de prélèvement correspondent bien à la hauteur des pots, ce qui permet de reproduire le pouvoir chlorosant des premiers horizons, souvent moins fort qu'en profondeur. Elles ont été analysées chimiquement tout au long du repotage pour vérifier le taux de calcaire actif et l'homogénéité des pots (5 échantillons successifs pour 456

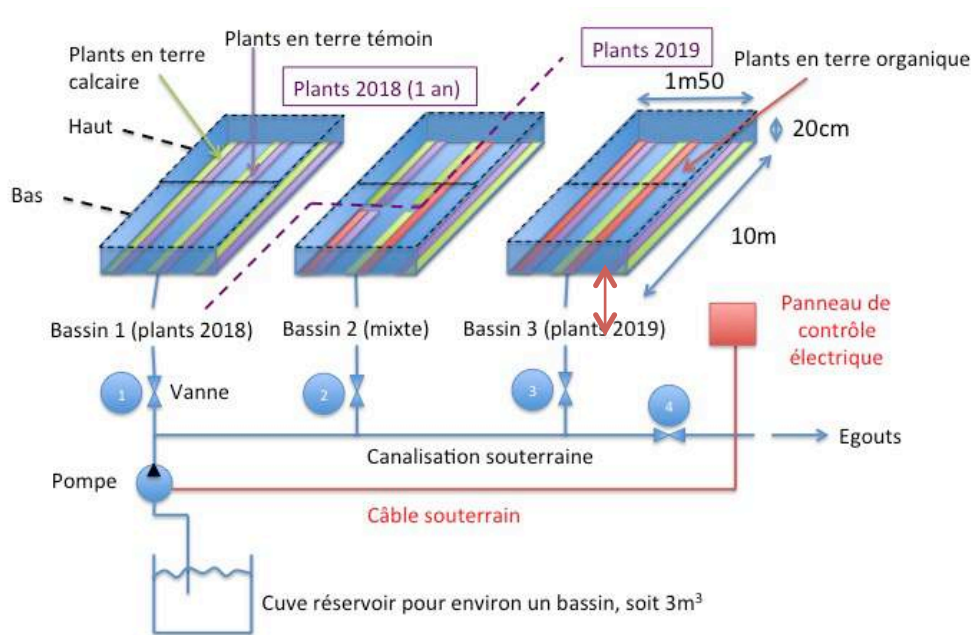


Figure 12: Schéma de synthèse du dispositif expérimental (Source : Paul Rouanet)

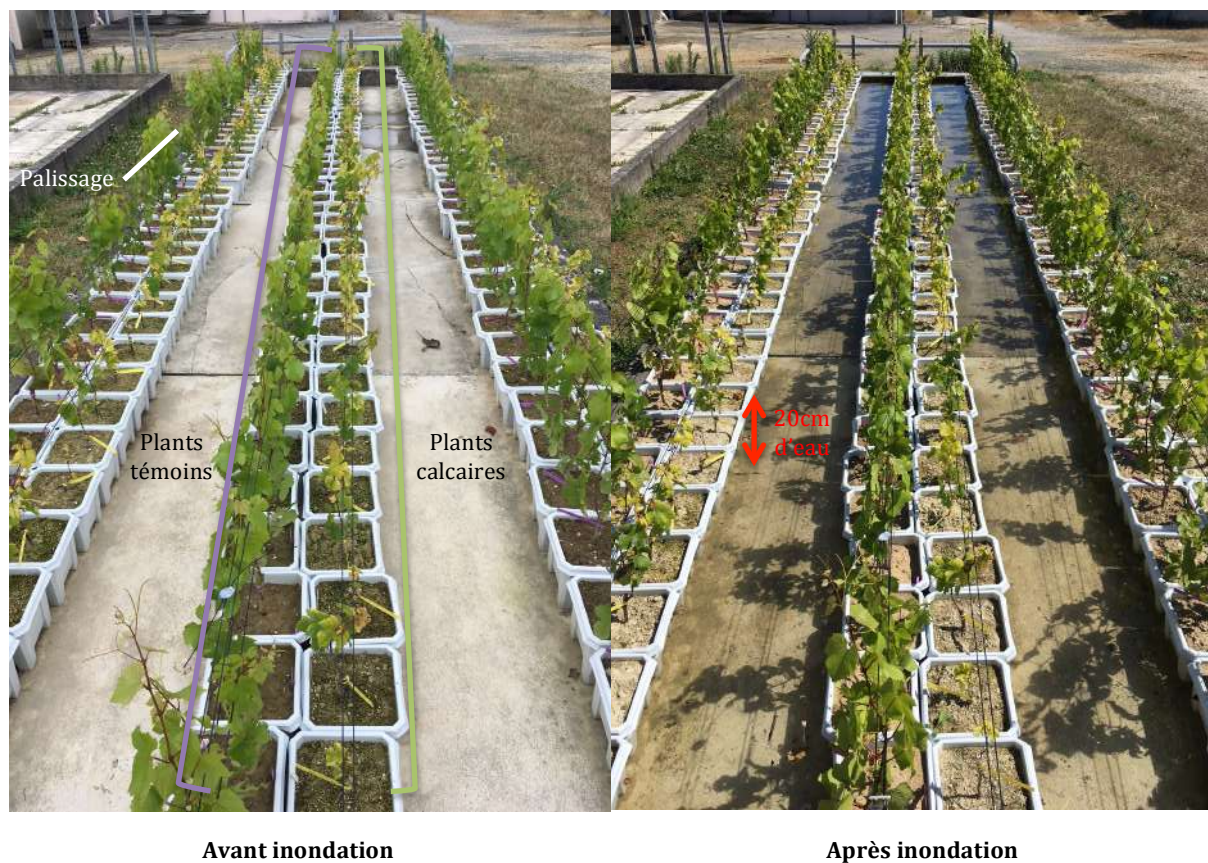


Figure 13 : Photos des plants du lot 2018 du bassin 1, le 17/06/2019, avant et après inondation du bassin

plants). Elles ont aussi été conservées à l'abri des précipitations pour éviter un lessivage des sols. Les terres « calcaire » et « organique » présentent de forts pouvoirs chlorosant après analyse, sans grande variation entre les pots (environ 18% de calcaire actif, Annexe 3).

Les terres sont également analysées biologiquement pour les vecteurs du court noué, c'est à dire pour déceler la présence de nématodes *X. index* et *X. diversicaudatum*, 2 principaux vecteurs du court-noué (Annexe 4). En effet, comme vu précédemment, ce virus jaunit les feuilles de la vigne et peut fausser les mesures de chlorose foliaire. On fait alors face à deux hypothèses : soit on retrouve ces nématodes dans la terre des pots, ce qui indique un risque de retrouver des nématodes dans les autres pots, soit on n'en retrouve pas, ce qui indique seulement qu'à l'heure actuelle, il n'y a plus de nématodes, mais qu'il y en a peut-être eu à une époque qui ont pu alors transmettre le virus au plant. La terre stockée n'est pas analysée car avec le mouvement de la terre lors du transport des stocks vers les pots et le manque de racines pour se nourrir, la population, si elle était présente, aurait drastiquement diminuée.

Ces analyses n'ont finalement donné aucun résultat significatif sur la présence de ces deux nématodes vecteurs. Elles ont seulement révélé la forte de présence de populations de *X.pachtaicum* dans la terre calcaire, un parent proche de *X.index*, mais qui présente un risque beaucoup moins important de transmission du virus même si certains cas de court-noué avec présence de *X.pachtaicum* ont été observés en Espagne (LAMBERTI 1977⁵⁸). Ainsi, le jaunissement observé sur les plants est bien lié au calcaire et non à une fasciation du court-noué.

3.3. Entretien du matériel végétal

Les plants de l'année précédente sont taillés à deux bourgeons après débourrement, pour avoir les mêmes conditions de croissance pour tous les plants. Une fois les premières gelées écartées, un seul rameau est conservé. De même, pour les deux lots de plantes, les entrecoeurs et inflorescences éventuels sont supprimés au fur et à mesure de la croissance des plants afin de ne conserver toujours qu'un seul rameau. Les plants sont également palissés afin d'éviter toute casse de ce seul rameau étudié.

Les pots sont placés dans 3 bassins de submersion de 2×10m de surface, que l'on inonde 2 fois par semaine le matin pour irriguer les pots et éviter un déficit hydrique (figure 12). L'inondation se fait en 15 minutes sur 20 cm de hauteur, soit 2/3 de la hauteur des pots, et le bassin se vide en 1h30 (figure 13). Les pots sont désherbés régulièrement pour éviter toute compétition hydrique ou azotée. On ajoute à l'eau d'irrigation de la solution nutritive dépourvue de fer (composition en Annexe 6) afin de ne pas introduire un biais sur les carences en fer. Après rempotage, les pots des deux lots ont été distribués de façon aléatoire dans chaque bloc de chaque bassin afin d'avoir une répétition de porte-greffe par bloc.

Après un an d'expérimentation, le lot est détruit et les systèmes aériens et racinaires sont séparés, photographiés et pesés afin de comparer les biomasses racinaires et aériennes.

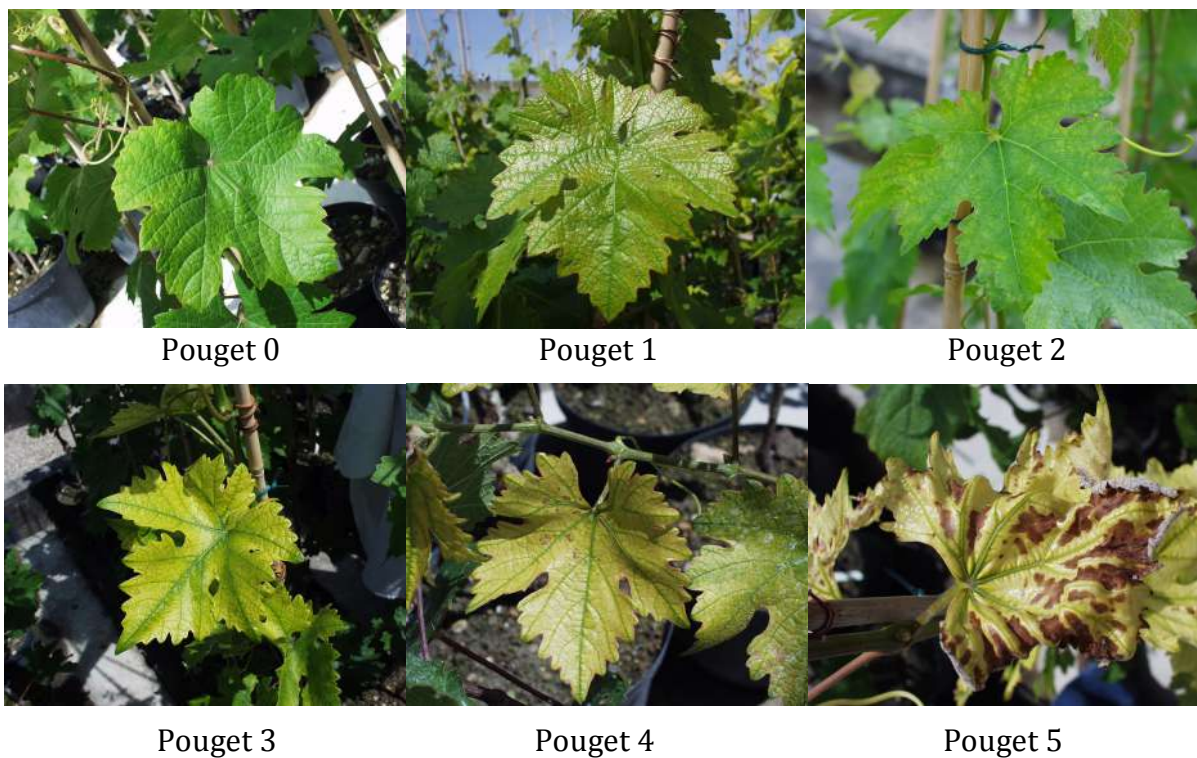


Figure 14: Photos des différents symptômes de chlorose associés à un indice de Pouget

0	: Absence de symptômes. Limbe de couleur vert foncé
1	: Limbe de couleur vert clair
2	: Limbe de couleur jaune pâle. Présence d'un réseau de petites nervures vertes
3	: Limbe de couleur jaune franc. Nervures principales vertes
4	: Apparition de petites nécroses sur le limbe jaune franc à blanchâtre
5	: Limbe nécrosé sur plus de 10 p. 100 de la surface. Stade « cottis »

Figure 15: Définitions des indices de Pouget dans sa publication originale (POUGET et OTTENWALTER 1978)



Figure 16: Photo de l'appareil de mesure Dualex 4 Scientifics (Force A)

3.4. Phénotypage de la tolérance aux sols chlorosants.

La réponse des plantes au stress chlorotique a été quantifiée en enregistrant leurs symptômes « chlorophylliens » de façon qualitative et quantitative, la longueur des rameaux et le taux de feuilles vivantes qui sont des paramètres de la croissance, ainsi que le diamètre du bois de l'année n-1, sur lequel les rameaux ont poussé cette année. La période de mesure s'est étalée sur environ 4 mois, du 15/05/19 au 09/09/19.

3.4.1. Mesure visuelle des symptômes de chlorose : l'indice de Pouget

Un passage bimensuel est réalisé pour caractériser la chlorose de façon qualitative à l'aide de l'échelle de notation de Pouget décrite ci-après (POUGET et OTTENWAEELTER 1978¹). Cet indice est une estimation visuelle du niveau de sévérité de la chlorose pour un plant entier, sur une échelle de 0 (pas de symptômes) à 5 (défoliation complète du plant ou ensemble des feuilles en cours de nécrose), détaillée par les figures 14 et 15. Les observations ont été réalisées sur les plants en sols calcaire ou organique par un seul et même observateur car l'estimation varie beaucoup avec l'observateur. Cela constitue une bonne synthèse des paramètres affectés par la chlorose (croissance et pigmentation) mais il nécessite néanmoins d'être accompagné par des indices quantitatifs.

Lors de la saison, certains plants alternent des périodes d'aggravation des symptômes de chlorose, puis de récupération. Sur le rameau, cette alternance se caractérise par des zones très chlorosées avec défoliation, puis des zones de feuilles bien vertes. Ainsi, la notation de Pouget s'effectue par appréciation globale du plant en faisant une moyenne visuelle des symptômes présents sur toutes les feuilles du rameau.

3.4.2. Mesure quantitative de l'impact de la chlorose sur la chlorophylle des feuilles grâce au Dualex.

Les mesures sont faites grâce au Dualex 4 Scientifics, qui mesure l'absorption aux longueurs d'ondes de la chlorophylle et des flavonols dans les feuilles de manière non destructive (figure 16). Puis, celui-ci établit un rapport entre les deux nommé NBI (Nitrogen Balance Index) et qui donne une indication du statut azoté de la feuille (DIAGO et al. 2016³⁹). Cependant, nous ne nous intéresserons qu'aux valeurs mesurées de chlorophylle pour caractériser l'intensité du stress chlorotique car la chlorose ne semble pas concerner la synthèse de flavonols, ce que les résultats sur le terrain confirmeront.

Dans cette expérimentation, une seule mesure de Dualex est réalisée par feuille, dans le sinus latéral et à mi-chemin avec le point pétiolaire pour éviter les nervures et les bords de feuilles qui sont souvent sujets à des aléas indépendants de la chlorose (nécrose, dépigmentation). La représentativité de cette zone de mesure sera testée par la suite.

Ces mesures ne sont réalisées que sur un échantillon de trois feuilles adultes au centre du rameau pour les plants témoins, de manière à ne pas prendre en compte le caractère juvénile qui pourrait interférer sur le taux de chlorophylle. Les individus en terre calcaire présentent une forte hétérogénéité de symptômes entre les feuilles du rameau. Pour prendre en compte cette hétérogénéité, une méthode de mesure d'une feuille sur trois a été testée statistiquement pour ce lot de plantes (Annexe 7).

Les mesures ont été réalisées de manière bimensuelle au cours de la saison.

3.4.3. Mesure de la croissance par longueur des rameaux

De même, des mesures de longueur de rameaux sont réalisées de manière bimensuelle à l'aide d'un ruban souple sur chaque plant, de la base du rameau à l'apex. Les mesures sont saisies directement sur un Android contenant l'application « fieldbook » (RIFE et POLAND 2014⁶⁰).

3.4.4. Mesure du taux de feuilles vivantes

La mesure du taux de feuilles vivantes a été réalisée une seule fois le 03/07/19. Il a été réalisé par un comptage à chaque nœud du rameau, d'une feuille vivante (encore accrochée par le pétiole) ou d'une feuille sénescence (nœud sans feuille). Cette mesure permet de prendre en compte les feuilles tombées dont la chlorophylle ne peut plus être mesurée.

3.4.5. Mesure du diamètre du bois de l'année n-1

La mesure du diamètre du bois de l'année n-1 a été réalisée à la fin de l'expérimentation, grâce à un pied à coulisse sur le bois n-1 bien identifié. Les mesures sont saisies directement sur un Android contenant l'application « fieldbook » (RIFE et POLAND 2014⁶⁰). Cette mesure est un indicateur de la réserve glucidique du plant sur l'année précédente (POUGET 1974¹⁹).

3.4.6. Tableau récapitulatif des variables étudiées

Variable Mesurée	Variable Calculée	Détail du calcul
Indice de Chlorophylle Dualex	Ecart témoin-calcaire des moyennes des indices de chlorophylle par porte-greffe	$\Delta Chl_i = \overline{Ichl}_t(PG_i) - \overline{Ichl}_c(PG_i)$ Avec PG_i =Porte-greffe i, $Ichl_x$ =Indice de Chlorophylle des plants en sol x, t=témoin, c=calcaire
Longueur de Rameau	Ecart témoin-calcaire des moyennes des longueurs de rameaux par porte-greffe	$\Delta Long_i = \overline{Long}_t(PG_i) - \overline{Long}_c(PG_i)$ Avec PG_i =Porte-greffe i, $Long_x$ =Longueur de rameau des plants en sol x, t=témoin, c=calcaire
Indice de Pouget	Moyenne de l'indice par Porte-greffe	$IPouget_i = \overline{IPouget}(PG_i)$ Avec PG_i =Porte-greffe i, $IPouget$ =Indice de Pouget
Nombre de feuilles vivantes et de feuilles sénescences sur le rameau	Moyenne du taux de feuilles vivantes sur les feuilles sénescences par porte-greffe	$Taux\ feuilles\ vivantes_i = \left(\frac{Nb\ f_{viv}}{Nb\ f_{sen}} \right) (PG_i)$ Avec PG_i =Porte-greffe i, $Nb\ f_{viv}$ =Nombre de feuilles vivantes, $Nb\ f_{sen}$ =Nombre de feuilles sénescences
Diamètre du bois de l'année n-1	Ecart témoin-calcaire des moyennes du diamètre de l'année n-1 par Porte-greffe	$\Delta Diam_i = \overline{Diam}_t(PG_i) - \overline{Diam}_c(PG_i)$ Avec PG_i =Porte-greffe i, $Diam_x$ =Diamètre du bois de l'année n-1 des plants en sol x, t=témoin, c=calcaire

Tableau 2 : Récapitulatif des variables et calculs utilisés

3.5. Analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé grâce au logiciel Rstudio (version 3.3.3.). Comme vu précédemment, la représentativité de la méthode de mesure d'une feuille sur trois doit être testée statistiquement (voir Annexe 6). De même, à chaque date et pour une même variable, la corrélation d'une mesure avec celle de la date précédente a été vérifiée par régression linéaire, avec un R^2 toujours supérieur à 0,6.

L'absence d'effet significatif de la zone de mesure choisie sur la feuille pour les mesures de dualex a d'abord été vérifiée (voir Annexe 7). Il convient ensuite de vérifier l'absence

d'effet significatif d'un bloc « haut » ou « bas » du bassin d'irrigation sur les mesures de croissance et de dualité du lot de plants de 2018 par test ANOVA sur les données acquises.

Ces mêmes données sont ensuite analysées pour vérifier que le sol a bien un effet significatif sur les mesures de longueur et de chlorophylle par test ANOVA sur les données de chaque mesure, et en quantifiant cet effet par calcul d'écart de moyenne entre les deux groupes d'individus par sol.

Enfin, on vérifie en parallèle que le porte-greffe a bien un effet significatif sur les mesures de croissance et de dualité par test ANOVA.

On peut alors s'intéresser à la corrélation des différentes variables mesurées entre elles, à savoir l'indice de Pouget, l'indice de chlorophylle du dualité et les longueurs de rameaux, et leurs évolutions au cours du temps.

Enfin, on réalise une ACP sur les moyennes par porte-greffe des indices de Pouget, ainsi que les écarts de chlorophylle et de longueur témoin-calcaire par porte-greffe sur chaque lot 2018 et 2019. Premièrement, cette analyse permet de dégager quelles sont les dates de mesures qui dispersent le mieux les porte-greffes. Après avoir sélectionné ces dates, cela permet d'une part, en comparant avec les classements déjà établis auparavant sur les porte-greffes inscrits, de valider ou non l'utilisation de ces variables pour caractériser la tolérance à la chlorose, et d'autre part, en analysant la position des porte-greffes par rapport aux dimensions de l'ACP et grâce à une classification hiérarchique, d'établir un premier classement des porte-greffes en fonction de leur tolérance à la chlorose.

Lot	Variable	Date	Type de test	P-Value	% du sum square facteur "sol" par rapport au sum square total	Différence moyenne Témoin-Calcaire
Plant d'1 an	Longueur	2018	ANOVA	0,056	1	9,7
		15-mai	KW test	***		8,5
		04/06/19	KW test	***		23,3
		18-juin	ANOVA	***	59	29,3
		03-juil	KW test	***		35,4
		15-juil	KW test	***		33,5
		01-août	KW test	***		30,3
		14-août	KW test	***		27,6
	Chlorophylle	15-mai	KW test	***		5,4
		23/05/19	KW test	***		8,8
		06-juin	KW test	***		14,2
		17-juin	KW test	***		12,8
		03-juil	KW test	***		11,9
		12-juil	KW test	***		10,6
24-juil		KW test	***		11,8	
07-août	KW test	***		10,7		
Plants 2019	Longueur	03-juil	ANOVA	0,46	0	-0,5
		23-juil	ANOVA	0,31	0	-1
		06/08/19	KW test	***		7,5
		23-août	KW test	***		27,3
		06-sept	KW test	***		42
	Chlorophylle	09-juil	ANOVA	***	21	2,8
		22/07/19	ANOVA	***	55	8,4
		05-août	ANOVA	***	69	13,2
		15-août	ANOVA	***	77	17,5
		05-sept	KW test	***		11,7

Figure 17: Analyses statistique de l'effet significatif du sol sur les variables mesurées. Les p-value en rouge sont significatives et celles en vert ne le sont pas.

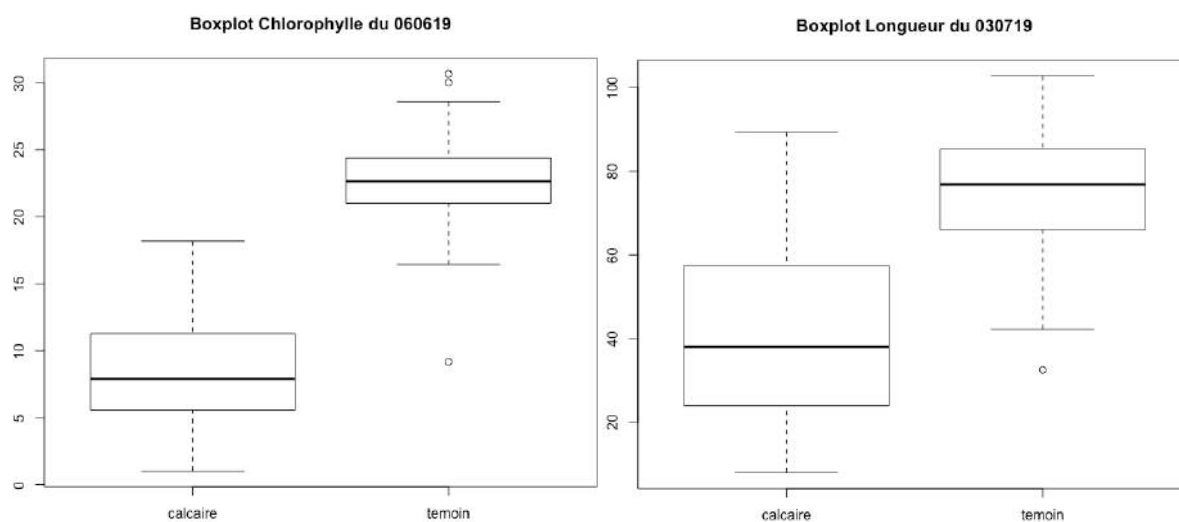


Figure 18: Répartition statistique de l'indice de chlorophylle du 06/06/19 et de la longueur du 03/07/19 pour le lot de plants 2018, par modalité de sol. Les longueurs sont exprimées en cm.

4. Résultats

4.1. Effet du sol sur l'indice de chlorophylle et la longueur de rameau :

Les variables mesurées sur tous les plants du dispositif ont été testées en fonction du sol utilisé pour vérifier la significativité du milieu de culture. Ce test permet d'appréhender le fait que l'expérimentation est efficace et que les différents sols testés agissent bien sur la physiologie des plantes de manière significative (figures 17 et 18).

Nous n'avons présenté ici pour les jeunes plants 2019 que les valeurs des modalités « sol calcaire » et « sol témoin » pour les deux années consécutives, car la modalité « sol organique » des jeunes plants 2019 présentait des valeurs toujours très significativement différentes pour les variables de mesure d'indice de chlorophylle et de longueur de rameau ($p\text{-value} < 2,2 \cdot 10^{-16} ***$).

Concernant la chlorophylle, la différence entre les deux modalités est très significative à toutes les dates de mesure pour les plants 2018 (1 an) avec une $p\text{-value}$ sur les tests de Kruskal-Wallis (KW test) toujours $< 2,2 \cdot 10^{-16} ***$. Il en va de même pour les jeunes plants 2019 avec une $p\text{-value}$ d'ANOVA toujours $< 2,2 \cdot 10^{-16} ***$. L'écart moyen entre les deux modalités de sol atteint un maximum pour les deux lots (14,2 le 06/06/19 pour les plants 2018 et 17,5 le 15/08/19 pour les plants 2019), puis semble se stabiliser autour d'une valeur pour les plants 2018.

Concernant la longueur de rameaux, pour les plants 2018 (1 an), l'effet de la modalité du sol est très significatif avec une $p\text{-value}$ sur les KW tests toujours $< 2,2 \cdot 10^{-16} ***$.

En revanche, concernant les jeunes plants 2019, la modalité « sol calcaire » ne devient significativement différent du sol témoin qu'à partir du 06/08/19 avec une $p\text{-value}$ du KW test inférieure à $2,2 \cdot 10^{-16} ***$). Là encore, pour les plants 2018, l'écart moyen semble atteindre un maximum, plus tardif que pour la chlorophylle (35,4cm le 03/07/19), puis diminuer.

Ainsi, on observe d'abord dans le temps une décoloration avant une baisse de croissance des très jeunes plants 2019 en sol calcaire (niveau de significativité) par rapport aux plants en sol témoin. Après une courte période, on a donc bien un effet significatif du sol sur les paramètres mesurés. On observe également un écart de plus en plus fort au cours du temps entre les deux modalités de sol, ce qui montre que la chlorose est bien un phénomène qui s'aggrave dans le temps. Néanmoins, un maximum d'écart entre les deux sols semble exister pour toutes les variables, ici encore plus précoce pour la chlorophylle mesurée que pour la longueur mesurée.

4.2. Effet du bassin d'irrigation et de la distance dans chaque bassin sur les variables mesurées

Les variables mesurées sur tous les plants du dispositif ont été testées en fonction du bassin d'irrigation et en fonction de leur position haute ou basse sur ce bassin (voir schéma du dispositif, figure 12) afin de vérifier l'absence d'effet significatif de la position, et la bonne irrigation homogène des trois bassins. Chaque combinaison de bassin et de position « haute » ou « basse » est appelée un « bloc ».

Lot	Sol	Variable	Date	Type de test	P-Value	% du sum square facteur "sol" par rapport au sum square total	
Plant d'1 an	Calcaire	Longueur	2018	ANOVA	**	47	
			15-mai	ANOVA	***	53	
			04/06/19	ANOVA	***	58	
			18-juin	ANOVA	***	62	
			03-juil	ANOVA	***	64	
			15-juil	ANOVA	***	64	
			01-août	ANOVA	***	63	
			14-août	ANOVA	***	62	
			Chlorophylle	15-mai	ANOVA	***	51
				23/05/19	ANOVA	***	59
				06-juin	ANOVA	***	54
				17-juin	ANOVA	**	56
				03-juil	ANOVA	***	67
				12-juil	ANOVA	***	62
	Pouget	24-juil	ANOVA	***	70		
		07-août	ANOVA	***	60		
		15-mai	ANOVA	***	54		
		07-juin	ANOVA	**	47		
		03/07/19	ANOVA	***	58		
		01-août	ANOVA	***	63		
	Témoin	Longueur	2018	ANOVA	***	52	
			15-mai	ANOVA	**	50	
			04/06/19	ANOVA	***	52	
			18-juin	ANOVA	***	58	
03-juil			ANOVA	***	54		
15-juil			ANOVA	***	57		
Chlorophylle		01-août	ANOVA	***	55		
		14-août	ANOVA	***	52		
		15-mai	ANOVA	**	47		
		23/05/19	ANOVA	0,52	32		
		06-juin	ANOVA	0,08	40		
		17-juin	ANOVA	0,78	40		
		03-juil	ANOVA	0,03*	43		
		12-juil	ANOVA	0,01*	46		
24-juil	ANOVA	***	60				
07-août	ANOVA	0,11	46				

Lot	Sol	Variable	Date	Type de test	P-Value	% du sum square facteur "sol" par rapport au sum square total	
Plants 2019	Calcaire	Longueur	03-juil	ANOVA	***	57	
			23-juil	ANOVA	***	58	
			06/08/19	ANOVA	***	58	
			23-août	ANOVA	***	59	
			06-sept	ANOVA	***	61	
			Chlorophylle	09-juil	ANOVA	0,03*	44
				22/07/19	ANOVA	0,05*	43
				05-août	ANOVA	**	51
				15-août	ANOVA	**	58
			Pouget	03-juil	KW test	0,05*	
	24-juil	KW test		***			
	06-août	KW test		***			
	Témoin	Longueur		03-juil	ANOVA	***	54
			23-juil	ANOVA	***	53	
			06/08/19	ANOVA	***	58	
			23-août	ANOVA	***	57	
		Chlorophylle	06-août	ANOVA	***	58	
			09-juil	ANOVA	***	53	
22/07/19			ANOVA	***	58		
05-août			ANOVA	***	58		
15-août	ANOVA	***	63				

Figure 19: Analyse statistique de l'effet porte-greffe sur les variables mesurées des plants 2018 et 2019 en fonction de la modalité de sol.

Les p-value en rouge sont significatives et celles en vert ne le sont pas.

D'après les résultats de l'analyse statistique (Annexe 8), on a alors un effet significatif sur la longueur des plants en sol témoin du lot 2018 d'environ 9cm de plus dans le bloc bas, et un effet significatif sur le taux de chlorophylle des plants témoins, avec une différence très variable en fonction des dates. Concernant les plants en terre calcaire, seuls les taux de chlorophylle du 15/05/19 et du 07/08/19 sont significativement différents entre les deux blocs, avec des différences moyennes très contrastées (respectivement 1,6 et -3,1).

En revanche, concernant les jeunes plants 2019, seul l'effet sur la chlorophylle mesurée est significatif entre les différents « blocs »

Il est donc pertinent de placer une répétition d'une combinaison « sol/porte-greffe » par « bloc », afin de prendre en compte cet effet. Cette distribution aléatoire au sein d'un « bloc » a pu être faite pour les plants 2018, mais pas sur les nouveaux plants 2019.

4.3. Effet significatif du porte-greffe sur les variables mesurées

Au regard de l'effet significatif de la modalité de sol sur ces variables, nous étudierons séparément les individus en terre témoin et les individus en terre calcaire (figure 19).

4.3.1. Lot de plants 2018 en conditions « témoin »

On remarque que la différence de chlorophylle entre les porte-greffes en sol témoin n'est plus significative à partir du 23/05 (sauf pour le 24/07). Le porte-greffe ne semble donc pas influencer la quantité de chlorophylle contenue dans les feuilles dans des conditions témoins. En revanche, la croissance du plant est influencée par le porte-greffe en sol témoin de façon très significative. Cet effet peut être mis en relation avec l'influence du porte-greffe sur la vigueur conférée.

4.3.2. Lot de plants 2018 en conditions « calcaire »

Le porte-greffe influence fortement l'indice de chlorophylle et la croissance du plant en condition calcaire (effet très significatif, $p\text{-value} < 0,01$). En écartant la mesure du 24/07, on pourrait donc travailler uniquement sur les valeurs de chlorophylle en sol calcaire pour comparer les porte-greffes entre eux, puisqu'en conditions témoins, le porte-greffe n'influe pas sur cette variable. En revanche, on ne peut donc pas étudier la réponse à la chlorose uniquement en étudiant les valeurs absolues de longueur du sol calcaire. Il faut tenir compte de sa réponse en conditions témoins.

Enfin, le porte-greffe a un effet très significatif sur l'indice de Pouget, ce qui confirme que cet indice peut être utilisé pour discriminer les porte-greffes.

4.3.3. Lot de plants 2019

Concernant les plants 2019, la croissance du plant ainsi que l'indice de chlorophylle sont subissés une influence de la modalité de porte-greffe à la fois en sol témoin et en sol calcaire, de façon très significative ($p\text{-value} < 0,01$).

De même, le porte-greffe a toujours un effet très significatif sur l'indice de Pouget pour la modalité du sol calcaire, surtout à partir du 24/07. Cela confirme que cet indice est très efficace pour discriminer les porte-greffes entre eux.

Le porte-greffe contribue également très fortement à la variance de ces différentes variables mesurées (part des sum square du facteur « sol » par rapport aux sum square totaux toujours $> 40\%$). Cela signifie qu'au sein d'une même modalité de sol, le porte-greffe permet d'expliquer plus de 50% de la variabilité des longueurs entre individus, et plus de 40% de la

variabilité des indices de chlorophylle entre individus. En comparaison, l'effet bloc (ou distance au point d'irrigation), lorsqu'il est significatif, n'explique en moyenne que 8% de la variabilité de chlorophylle (29% au maximum) et 2% en moyenne de la variabilité de longueur, sur les deux lots de plantes.

Cela permet donc de conclure que le porte-greffe est bien un facteur prépondérant pour l'étude de la tolérance à la chlorose, en relation avec l'indice de Pouget et le taux de chlorophylle d'un plant de vigne.

4.4. Corrélation des variables de longueur, de chlorophylle et d'indice de Pouget.

Nous avons corrélié graphiquement les différentes variables entre elles à des dates proches (Annexes 9 & 10) afin de comprendre s'il existe une relation entre les différentes grandeurs que ces variables mesurent. Si ces variables sont bien corrélées, cela signifie que nous pouvons caractériser plus précisément la tolérance à la chlorose grâce à ces variables quantitatives, en plus de l'indice de Pouget déjà existant.

4.4.1. Lot de plants 2018

Tout d'abord, concernant le lot de 2018, il n'existe pas de relation pour les plants en terre témoin entre l'indice de chlorophylle et la longueur du rameau ($R^2 < 0,01$). En revanche, pour les plants en terre calcaire, cette corrélation peut être assez forte en fonction de la date considérée ($R^2 > 0,01$ toujours, jusqu'à $R^2 = 0,31$ le 03/07/19).

De même, pour toutes les dates de mesures, il y a bien une différence significative pour l'indice de chlorophylle des plants en fonction du stade de Pouget observé.

A partir du 03/07/19, cette relation est aussi valable pour les plants en terre calcaire à forte longueur de rameau qui sont bien corrélés à un faible indice de Pouget et significativement différents des plants en terre calcaire à faible longueur émise qui, eux aussi, sont bien corrélés à un fort indice de Pouget.

4.4.2. Lot de plants 2019

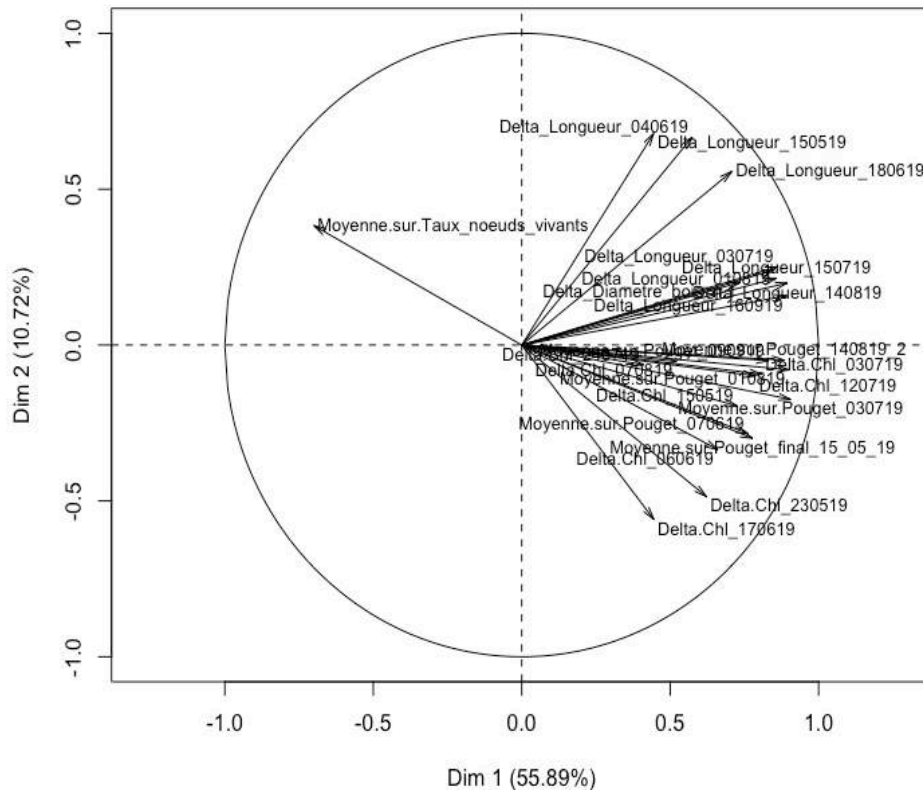
Concernant le lot de 2019, on assiste au phénomène inverse pour la corrélation entre l'indice de chlorophylle et la longueur de rameau : il n'existe pas de relation significative entre l'indice de chlorophylle et la longueur du rameau pour les plants en terre calcaire ($R^2 < 0,01$). En revanche, pour les plants en terre témoin, cette corrélation peut être de plus en plus forte au cours du temps ($R^2 > 0,01$ toujours, jusqu'à $R^2 = 0,33$ le 15-23/08/19).

De même, pour toutes les dates mesures, les plants en terre calcaire à fort indice de chlorophylle sont bien corrélés à un faible indice de Pouget, et significativement différents des plants en terre calcaire à faible indice de chlorophylle qui sont bien corrélés à de forts indices de Pouget, à partir du 22-23/07/19.

Cependant, cette corrélation n'est pas valable pour les plants en terre calcaire à forte longueur de rameau émise qui ne sont pas corrélés aux indices de Pouget mesurés.

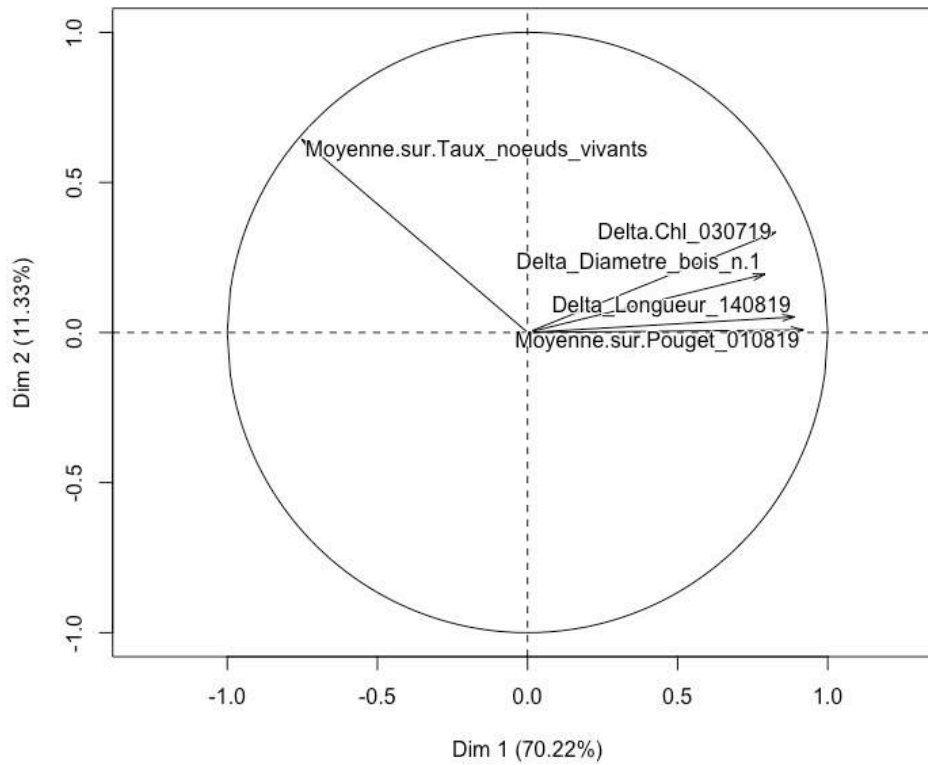
Ainsi, au cours du temps, lorsque le phénomène de chlorose est plus fort, l'indice de chlorophylle est de plus en plus corrélé à l'indice de Pouget pour les deux lots de plantes. L'indice de Pouget fait aujourd'hui référence pour caractériser la tolérance à la chlorose, ce résultat permet de confirmer que cette variable quantitative d'indice de chlorophylle permet peut être aussi d'exprimer de façon plus précise les différences marquées par l'indice de Pouget.

Variables factor map (PCA)



a)

Variables factor map (PCA)



b)

Figure 20: Cercle de l'ensemble des variables (a) du lot de plants 2018, et cercle des variables sélectionnées (b) pour l'Analyse en Composantes Principales finale sur le lot 2018

Delta.Chl= Ecart témoin-calcaire des moyennes des indices de chlorophylle par Porte-greffe
 Delta_Longueur=Ecart témoin-calcaire des moyennes des longueurs de rameaux par Porte-greffe

Concernant la longueur des rameaux, cette variable est bien corrélée à l'indice de chlorophylle et à l'indice de Pouget pour le lot 2018, alors qu'elle ne l'est pas pour le lot 2019 (plants greffés dans l'année), en ce qui concerne les plants en sol calcaire.

Selon la bibliographie, l'âge des vignes augmenterait les effets de la chlorose sur les vignes. Nous avons déjà observé dans le cadre de l'étude de l'influence du sol un décalage entre le jaunissement et la baisse de croissance (postérieure) pour les plants 2019. On peut donc supposer que ce symptôme de baisse de croissance est plus tardif et s'exprime donc encore plus avec le temps et peut-être l'âge des vignes, après leur jaunissement. Cela expliquerait la meilleure corrélation de la longueur de rameau avec l'indice de Pouget sur des vignes âgées, et donc l'indice de chlorophylle, qui mesurent tous deux les symptômes de jaunissement.

4.5. Analyse en composante principale (ACP) : détermination des variables les plus discriminantes et identification des porte-greffes les plus tolérants sur la saison.

Afin de rechercher quels porte-greffes semblent les plus tolérants à la chlorose, nous allons réaliser une ACP sur les différentes variables mesurées pour chaque date. Afin de prendre en compte également l'effet du sol sur ces variables, la moyenne d'une variable pour les individus d'un même porte-greffe et d'un même sol est réalisée, puis l'étude porte sur la différence des moyennes des deux sols pour les variables « longueur » et « indice de chlorophylle » (définition de cette différence précisée dans le paragraphe 3.4.6.).

Pour définir la « tolérance à la chlorose » que nous étudierons, nous recherchons des porte-greffes qui présentent un faible indice moyen de Pouget, un faible écart d'indice moyen de chlorophylle entre terre témoin et terre calcaire, et un faible écart de longueur moyenne de rameau entre terre témoin et terre calcaire. Concernant le lot de plants 2018 (1 an), nous cherchons également à savoir si les variables supplémentaires de « différence de diamètre du bois n-1 entre terre témoin et calcaire » et de « taux de feuilles vivantes des plants calcaire » pour un même porte-greffe sont bien corrélées aux variables principales étudiées et si tel est le cas, nous les utiliserons dans ces analyses.

4.5.1. Analyse des plants d'un an (lot 2018)

Les porte-greffes comprenant moins de 2 répétitions en terre calcaire et en terre témoin à cause de la mortalité des plants peuvent également être écartés car ils ne sont pas statistiquement acceptables : 17-37MGT, 107Vidal et 161-49C. Nous ne les étudierons donc pas en détail pour ce lot de plantes.

Nous réalisons une première étude des variables étudiées aux différentes dates de mesure, pour définir quelles dates nous retiendrons (figure 20a). Le grand nombre de ces dates de mesures permet de savoir avec précision à quel moment de la saison les différences sont les plus élevées entre porte-greffes sur ces trois variables mesurées.

Les variables qui présentent le meilleur « \cos^2 », c'est à dire qui sont le plus corrélées au cercle des corrélations parmi toutes les dates de mesures (qui implique la meilleure dispersion des données, donc les plus grands écarts entre individus) sont : le delta de longueur du rameau du 14/08/19, le delta d'indice de chlorophylle du 03/07/19, et la moyenne d'indice de Pouget du 01/08/19. Les deux autres variables supplémentaires mesurées, le taux de feuilles vivantes et le diamètre du bois de l'année précédente, ne comportent qu'une seule date, mais elles sont bien corrélées aux variables principales. Ainsi, l'ACP est réalisée une seconde fois sur ces cinq variables, (figure 20b). Tout comme le premier cercle de corrélation des variable, ce

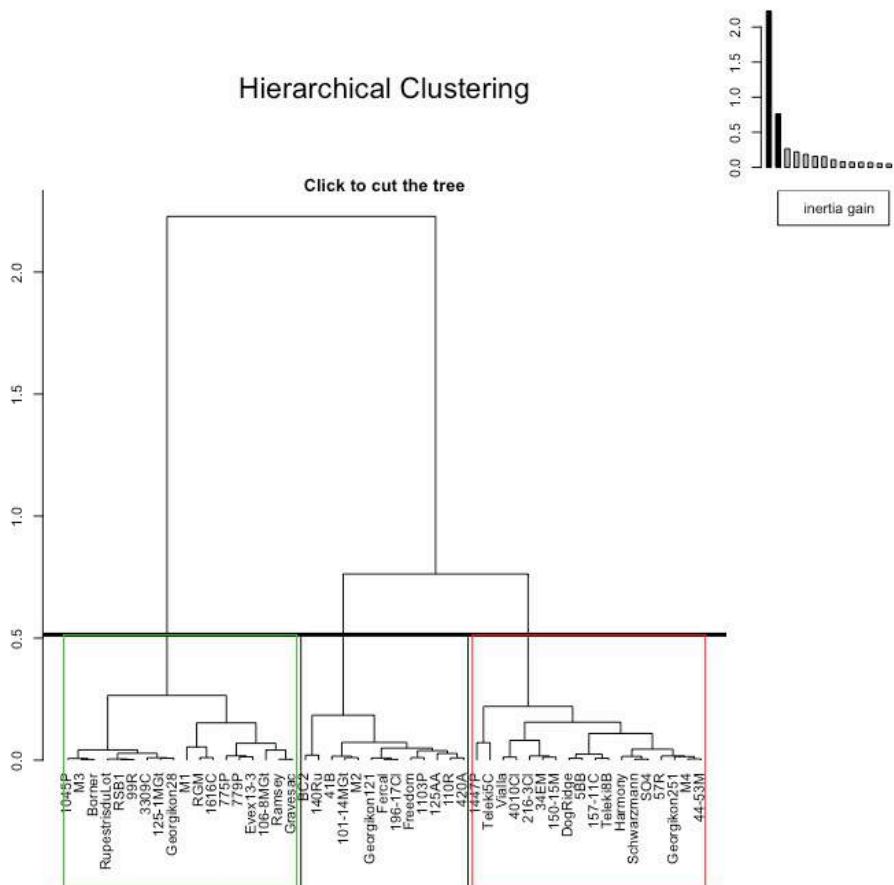
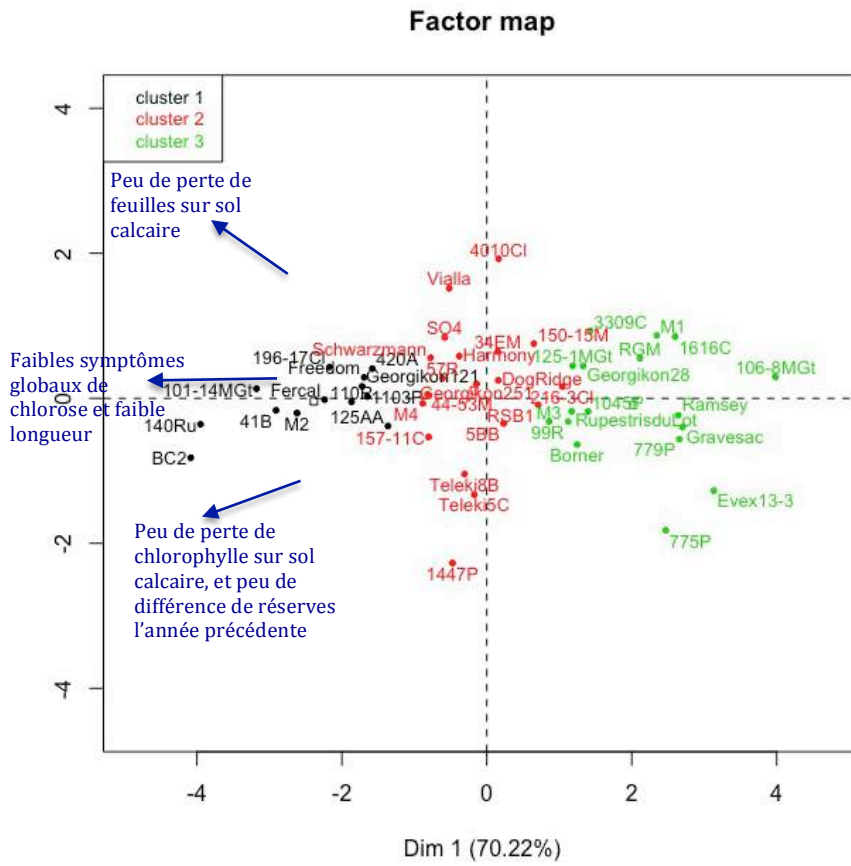
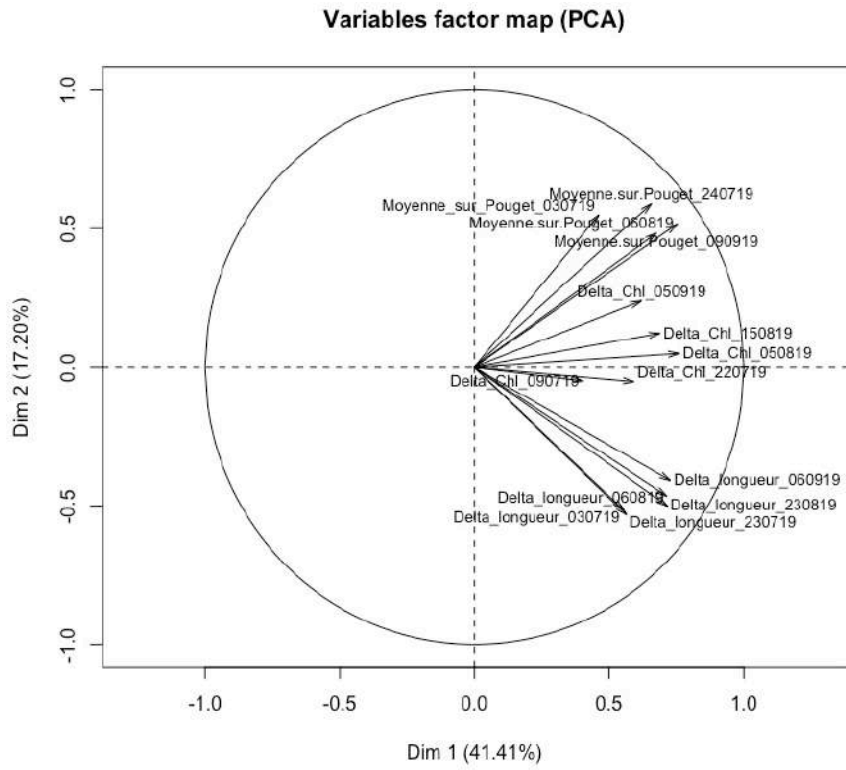


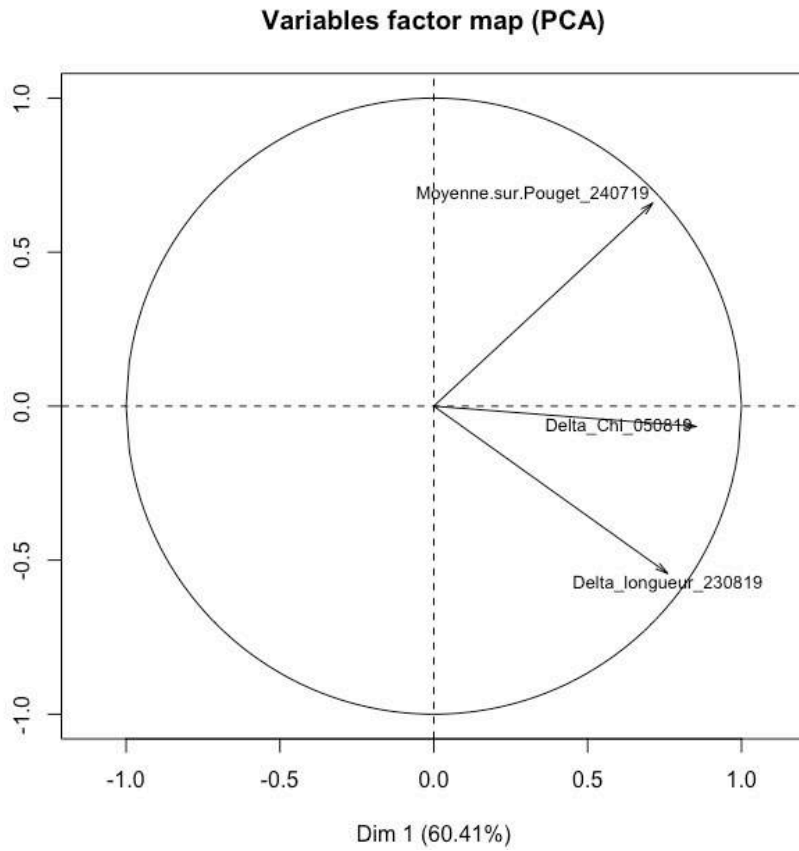
Figure 21 : Nuage des individus en fonction des dimensions sélectionnées, et sélection des groupes d'individus par la classification hiérarchique pour le lot 2018.

second cercle montre bien que les variables représentant l'indice de Pouget, l'indice de chlorophylle, la longueur des rameaux et les réserves de l'année précédente sont bien corrélées à l'axe principal et que le taux de feuilles vivantes est anticorrélé à l'axe 1 qui explique 70,2% de la variance. On cherche donc les porte greffes qui comportent la plus faible coordonnée d'axe 1. Puis, cette ACP est accompagnée d'une classification hiérarchique (CAH) de ces résultats (figure 21).

Ainsi, sur cette classification, on peut dresser une première liste de porte-greffes français et utilisés à l'étrangers dans le *cluster 1*, qui semblent être parmi les plus tolérants à la chlorose, selon nos trois variables étudiées : **BC2, 140Ru, 41B, Fercal, 101-14MGt, M2 et Georgikon 121**. Cette liste sera par la suite appelée **groupe 1**. On peut également rajouter le **196-17Cl, le 1447P, le 420A, le Freedom et le Schwarzmans**, qui présentent aussi une faible coordonnée sur cet axe 1. Cette liste sera par la suite appelée **groupe 2**. On retrouve dans cette liste les porte-greffes français déjà connus pour leur tolérance comme le 140Ru, le Fercal, le 41B, mais aussi des porte-greffes français non-caractérisés comme tels comme le BC2 et le 101-14MGt, et 4 porte-greffes utilisés à l'étranger.



a)



b)

Figure 22: Cercle de l'ensemble des variables (a) du lot de plants 2019, et cercle des variables sélectionnées (b) pour l'Analyse en Composantes Principales finale sur le lot 2019.

Les variables mesurées sont prises uniquement pour les sols calcaire et témoin.

Delta.Chl= Ecart témoin-calcaire des moyennes des indices de chlorophylle par Porte-greffe

Delta_Longueur=Ecart témoin-calcaire des moyennes des longueurs de rameaux par Porte-greffe

4.5.2. Analyse des plants de l'année (lot 2019)

On s'intéresse ensuite aux moyennes des variables par porte-greffe, et à la différence entre les porte-greffes en terre témoin et en terre calcaire pour les variables « longueur de rameau » et « indice de chlorophylle ». La modalité « terre organique » n'est pas retenue pour les raisons citées plus-haut, à savoir le manque de différence significative entre porte-greffe et la mauvaise croissance générale des plants. Les porte-greffes comprenant moins de 3 répétitions dans une des modalités de sol (calcaire ou témoin) à cause de la mortalité des plants peuvent également être écartés car ils ne sont pas statistiquement acceptables : NemadexAB, DogRidge, M4 et 99R. Nous ne les étudierons donc pas pour ce lot de plantes.

Là encore, nous réalisons une étude des variables étudiées aux différentes dates de mesure, pour définir quelles dates nous retiendrons (figure 22a).

Les variables qui présentent le meilleur \cos^2 , c'est à dire qui sont le plus corrélées au cercle des corrélations, sont la moyenne par porte-greffe de l'indice de Pouget du 24/07/19, le delta d'indice de chlorophylle du 05/08/19, et le delta de longueur de rameau du 23/08/19 (entre porte-greffe en terre témoin et en terre calcaire). Ainsi, une nouvelle ACP est réalisée une seconde fois sur ces trois nouvelles variables (figure 22b).

Ici en revanche, les variables d'indice de Pouget et d'écart témoin-calcaire de la moyenne de l'indice de chlorophylle par porte-greffe sont corrélées, mais la variable d'écart témoin-calcaire des moyennes de longueur de rameau par porte-greffe n'est pas du tout corrélée à l'indice de Pouget. L'axe 1, le plus explicatif de la dispersion des données (60%), est ainsi surtout corrélé à l'écart d'indice de chlorophylle. On cherchera donc les individus qui ont la plus faible coordonnée sur l'axe 1 et sur l'axe 2, qui représente aussi une partie de l'écart en longueur de rameau.

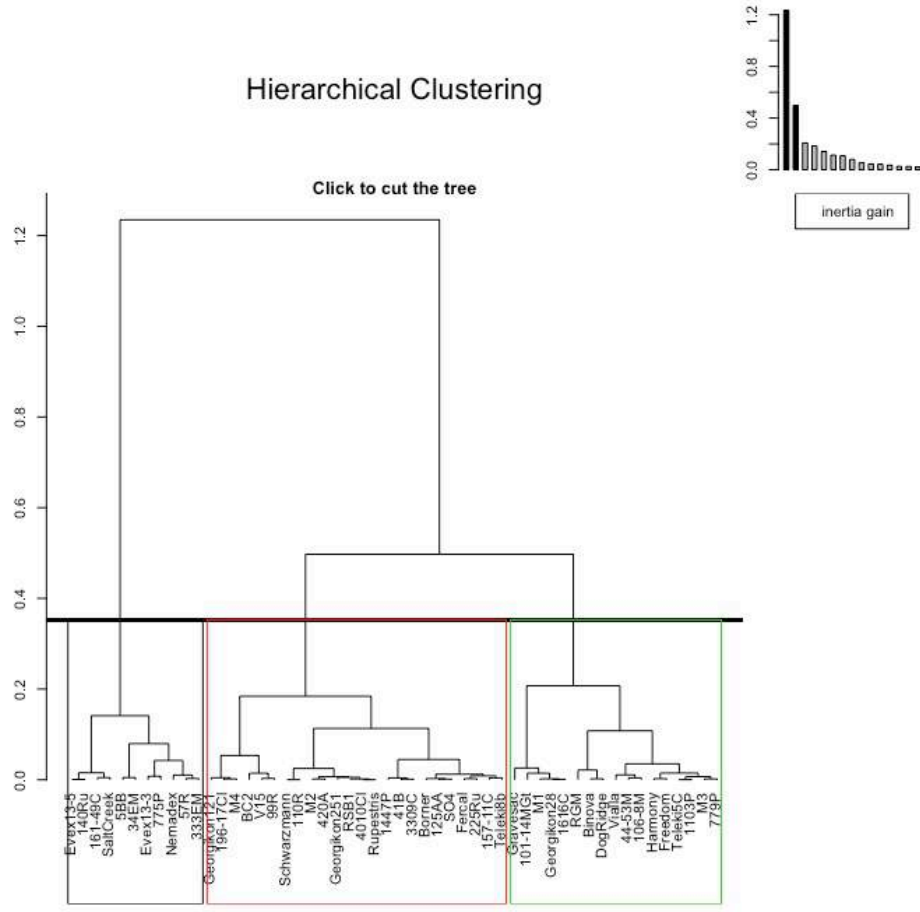
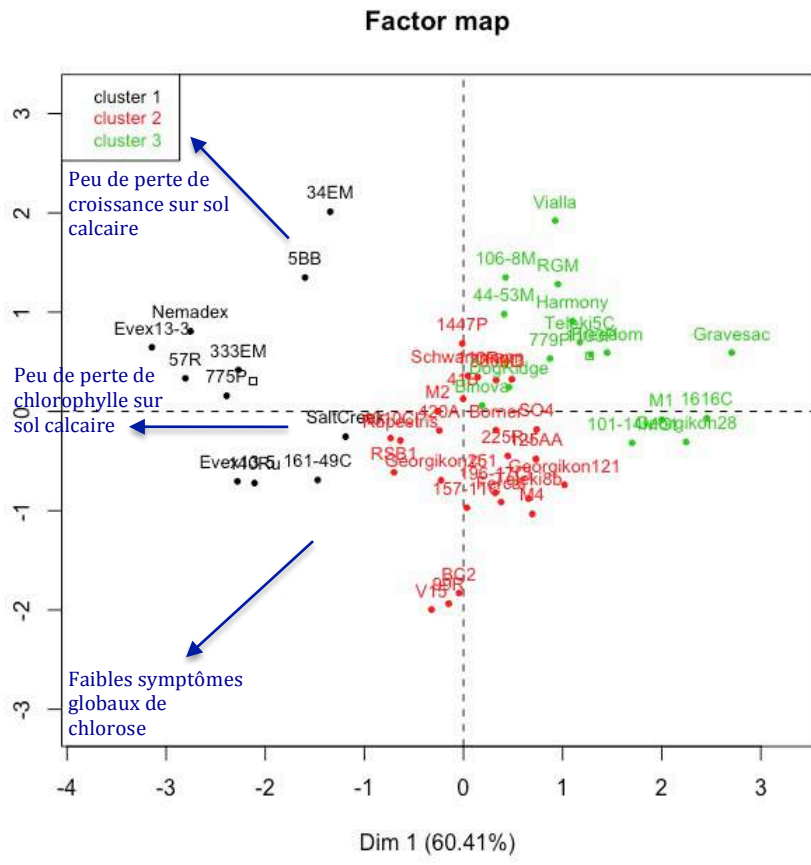


Figure 23 : Nuage des individus en fonction des dimensions et sélection des groupes d'individus par la classification hiérarchique pour le lot 2019.

Puis, cette ACP est accompagnée d'une classification hiérarchique (CAH) de ces résultats afin de rechercher des groupes éventuels de porte-greffes partageant les mêmes caractéristiques (figure 23).

Ainsi, on observe une classification assez différente de la première sur les porte-greffes issus de l'étranger principalement. On peut dresser une première liste de porte-greffes français et utilisés à l'étranger qui semblent être parmi les plus tolérants à la chlorose dans ce lot, selon nos trois variables étudiées, et selon la classification hiérarchique : **Evex 13-5, 333EM, 57R, 140Ru, Evex 13-3, SaltCreek, 775P et 161-49C**. Cette liste est toujours par la suite appelée **groupe 1**. On peut également rajouter **BC2, 4010Cl, RSB1, 157-11C, 420A et M2** qui présentent aussi une faible coordonnée sur cet axe 1. Cette liste est toujours par la suite appelée **groupe 2**.

Dans ce lot également, on retrouve les porte-greffes français déjà connus pour leur tolérance comme le 140Ru et le 333EM mais aussi des porte-greffes français non-caractérisés comme « tolérants » comme le BC2 et le 4010Cl et 4 porte-greffes utilisés à l'étranger. En revanche, le Fercal et le 41B, connus pour leur tolérance, semblent apparaître comme « moyennement tolérant » selon nos critères dans ce lot.

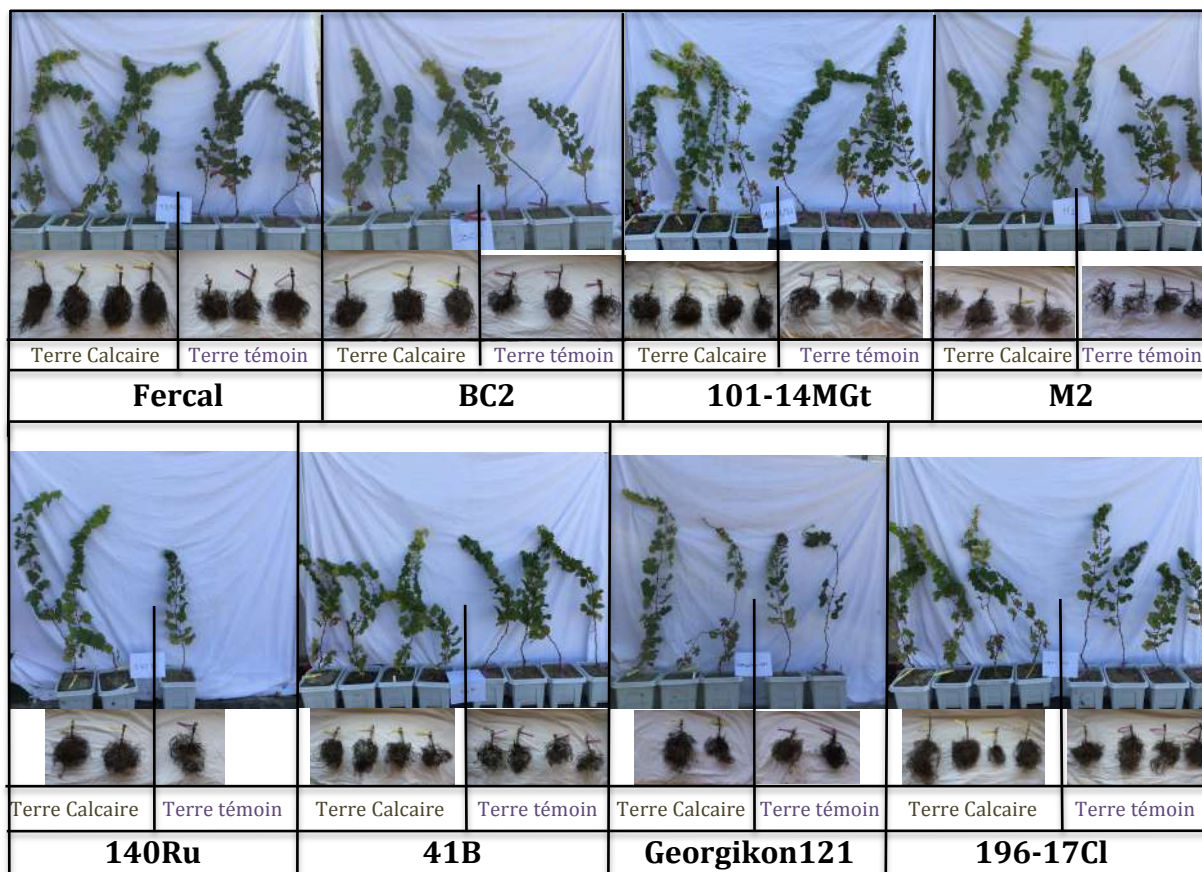


Figure 24: Photographies des systèmes aériens et des systèmes racinaires correspondant, des individus de 8 porte-greffes apparaissant comme « les plus tolérants » sur l'ACP du lot 2018, en sols calcaire et témoin.

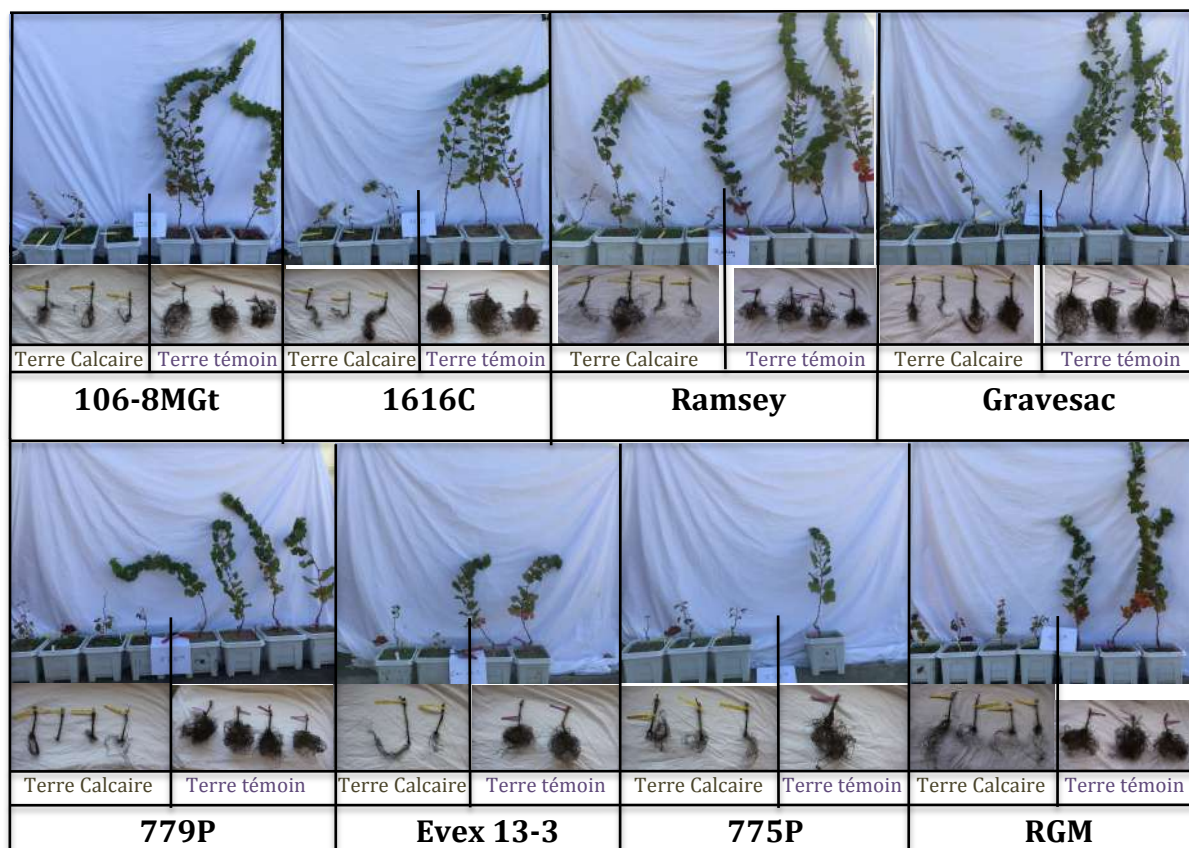


Figure 25: Photographies des systèmes aériens et des systèmes racinaires correspondant, des individus de 8 porte-greffes, apparaissant comme « les moins tolérants » sur l'ACP du lot 2018, en sols calcaire et témoin.

4.5.3. Bilan des ACP et établissement d'une liste par lot.

Le résultat des deux lots analysés plus haut est résumé ci-contre par code couleur, à partir des groupes déterminés par les classifications, et des variables d'intérêt:

Porte-greffe	Lot 2018	Lot 2019	Porte-greffe	Lot 2018	Lot 2019	Porte-greffe	Lot 2018	Lot 2019
101-14MGt	Vert	Rouge	4010CI	Orange	Orange	Georgikon28	Rouge	Rouge
1045P	Rouge	Orange	41B	Vert	Orange	Gravesac	Rouge	Rouge
106-8MGt	Rouge	Rouge	420A	Orange	Orange	Harmony	Orange	Rouge
1103P	Vert	Orange	44-53M	Orange	Rouge	M1	Rouge	Rouge
110R	Orange	Orange	57R	Orange	Vert	M2	Vert	Orange
125-1MGt	Rouge	Orange	5BB	Orange	Orange	M3	Rouge	Orange
125AA	Vert	Orange	775P	Rouge	Vert	M4	Orange	Orange
140Ru	Vert	Vert	779P	Rouge	Rouge	Ramsey	Rouge	Orange
1447P	Rouge	Orange	99R	Rouge	Vert	Nemadex	Orange	Orange
150-15M	Orange	Orange	BC2	Vert	Vert	RGM	Rouge	Rouge
157-11C	Orange	Orange	Binova	Orange	Orange	RSB1	Orange	Vert
161-49C	Vert	Vert	Borner	Rouge	Orange	Rupestris du Lot	Rouge	Orange
1616C	Rouge	Rouge	DogRidge	Orange	Orange	SaltCreek	Orange	Vert
196-17CI	Orange	Orange	Evex13-3	Rouge	Rouge	Schwarzmann	Orange	Orange
216-3CI	Rouge	Orange	Evex13-5	Orange	Vert	SO4	Orange	Orange
225Ru	Orange	Orange	Fercal	Vert	Orange	Teleki5C	Orange	Rouge
3309C	Rouge	Rouge	Freedom	Vert	Rouge	Teleki8B	Orange	Orange
333EM	Orange	Vert	Georgikon121	Vert	Orange	V15	Orange	Vert
34EM	Orange	Orange	Georgikon251	Orange	Orange	Vialla	Orange	Rouge

Tableau 3 : « Tolérance » de porte-greffes établie selon les groupes de la Classification Hiérarchique, modulés par la position des individus par rapport aux variables principales dans l'Analyses en Composantes Principales.

Rouge=Porte-greffe (PG) peu tolérant à la chlorose
 Orange=Porte-greffe moyennement tolérant à la chlorose
 Vert=Porte-greffe tolérant à la chlorose
 Porte-greffe grisé=Porte-greffe issu de l'étranger

On remarque que les classements de tolérance sont très différents en fonction du lot considéré, ce qui démontre la complexité du comportement de réaction des porte-greffes à la chlorose, ici en fonction de l'âge et peut être aussi du climat de l'année. Concernant les porte-greffes issus de l'étranger, les porte-greffes M2, Georgikon121 et 57R sont parmi les mieux classés dans les deux lots, donc les plus « tolérants » à la chlorose. On peut retenir également les porte-greffes Georgikon251, DogRidge, 157-11C, Schwarzmann et M4 qui apparaissent « moyennement tolérant » pour les deux lots.

Enfin, les porte-greffes Evex13-5 et SaltCreek font partie des porte-greffes étrangers les mieux classés dans le lot 2019, mais n'ont pas de répétition dans le lot 2018, tout comme le V15 et le Binova. Ils mériteront donc une attention particulière dans la suite de ce projet, à savoir la réalisation d'un nouveau lot de plants 2020 pour étudier à nouveau ces mêmes variables sur des porte-greffes en sol chlorosant afin de confirmer la tolérance des porte-greffes de cette liste.

Des photographies de porte-greffes du lot 2018 apparaissant comme « les plus tolérants » sur l'ACP ont été réalisées (figure 24), ainsi que des porte-greffes apparaissant comme les moins « tolérants » (figure 25) à titre de comparaison plus visuelle des symptômes des individus d'une même modalité.

5. Discussion

5.1. Matériel végétal : des plants sains sans fruits, greffés dans l'année, pour un même greffon étudié.

Les plants utilisés n'ont pas de fruits, donc ils présentent une physiologie différente des vignes « en production ». Or, des pertes de rendement par coulure ou millérandage ont aussi déjà été observés comme conséquences de la chlorose (ROMBOLA et TAGLIAVINI 2006⁶¹, GUILBAULT 2003⁶², REYNIER 2007⁶³). Cet effet de la chlorose sur la vendange et ses symptômes sur les fructifications n'est donc pas directement caractérisé dans cette étude, un élément important pour les conséquences économiques de cette carence. Néanmoins, l'effet du rendement sur l'intensité des symptômes n'est pas connu, et l'on peut penser que la variable du rendement serait peut être corrélée à celle de l'intensité des symptômes, ce qui ne biaiserait donc pas ce classement.

Les tests sanitaires et génétiques permettent de se procurer des bois de greffes de différents pépiniéristes ou centre expérimentaux, contrairement aux études précédentes de la tolérance à la chlorose dans lesquelles les plants devaient venir d'un même pépiniériste pour plus de sécurité (POUGET et OTTENWAEELTER 1978)¹.

Nous avons également pu observer des plants morts dans les individus du lot 2018. Exactement la moitié des pieds morts étaient plantés en sol témoin, et l'autre moitié en sol chlorosant, tous issus de porte-greffes différents. L'hypothèse de l'année précédente était qu'il s'agissait de problèmes de greffage à l'origine de leur mort, ce qui confirme cette hypothèse. De plus, le « test du pouce » sur ces plants s'est révélé très efficace pour remarquer que le point de greffe n'était pas assez solide.

De même, le fait de travailler en expérimentation avec des pieds greffés dans l'année n'est pas conseillé même si cela nécessite de l'anticipation dans la préparation des plants, ce qui n'est pas toujours possible en fonction de l'acceptation des financements des projets de recherche.

De plus, un seul greffon a été testé : le Pinot noir 115, ce qui veut dire que pour le moment, les résultats de cet expérimentation sont difficilement généralisables à d'autres contextes, comme d'autres cépages. En effet, certains cépages sont plus sensibles à l'effet porte-greffe que d'autres sur certains caractères et c'est par exemple le cas du Cabernet-Sauvignon dont la vigueur varie significativement en fonction du porte-greffe (TANDONNET et al. 2008⁶⁴). De même, selon les résultats de POUGET et OTTENWAEELTER (1978)¹, on observe une différence de classement de la tolérance des porte-greffes en fonction du greffon utilisé. On peut également supposer que ce greffon possède une exigence très forte en fer sur son système aérien, ce qui expliquerait aussi l'apparition de symptômes de chlorose sur du Fercal, qui a toujours été décrit comme le plus résistant des porte-greffes dans la littérature, bien au-delà de 20 en calcaire actif (figure 9, GALET 1947⁴⁸).

Un autre cépage aurait pu être testé dans le cadre du projet RootBourgogne à destination de la Bourgogne : le Chardonnay, très utilisé puisque 59% de la production bourguignonne concerne les vins blancs à base de Chardonnay exclusivement, contre seulement 30% pour les rouges à base de Pinot noir exclusivement (Chiffres clés de la Bourgogne Viticole, BIVB 2019).

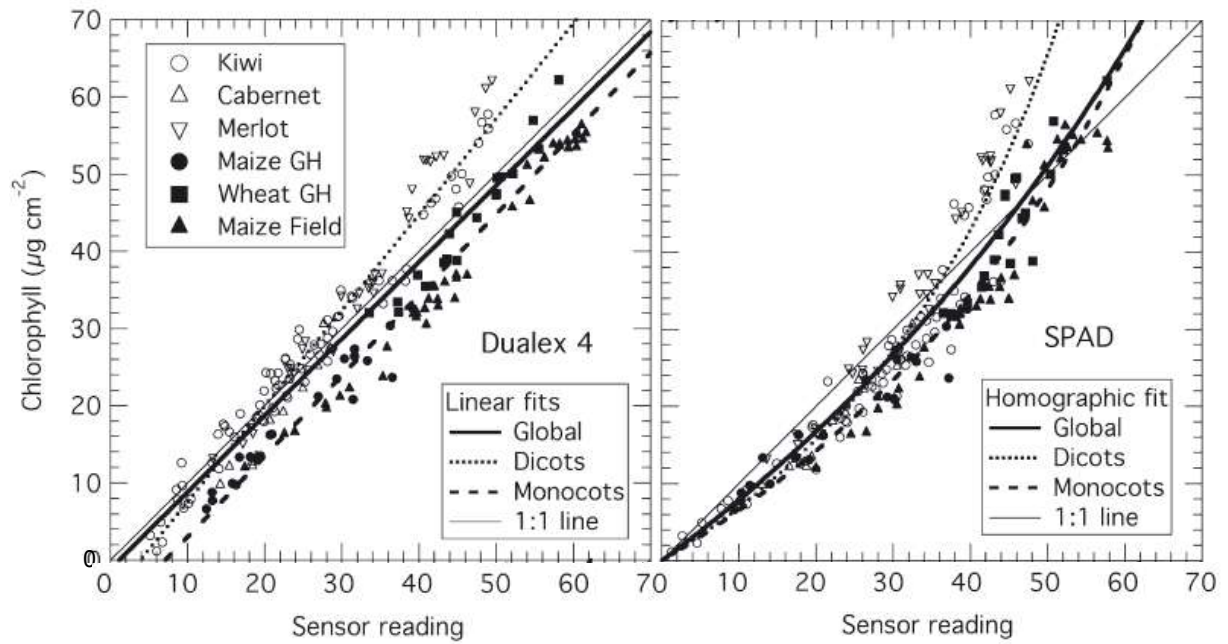


Figure 26: Calibration de deux capteurs en fonction de l'extrait en chlorophylle (CEROVIC et al.2013).

Les monocotylédones testées sont indiquées par un symbole plein et les dicotylédones par un symbole vide. Les feuilles de dicotylédones proviennent exclusivement du champ et les feuilles de monocotylédones proviennent à la fois du champ et de serres. La régression « global » est réalisée sur tous les individus indépendamment des régressions « Dicots » et « Monocots »: linéaire pour le Dualex ($a + bx$) et homographique pour le SPAD ($(ax)/(b - x)$); $P < 0.0001$ pour tous les modèles.

5.2. Milieu de culture : sol maîtrisé en pots de taille finie comportant deux modalités non graduées et climat bordelais non maîtrisé.

La température et l'ensoleillement n'étaient pas maîtrisés dans cette expérimentation, seul l'apport en eau et en azote est maîtrisé afin de maintenir en excès les réserves des « sols ». Cette absence de contrôle a conduit à des « à-coup » de croissance et d'expression de la chlorose (brûlures et défoliation pendant les canicules). Cela peut être un frein à l'application de cette étude dans un contexte climatique précis, comme le climat bourguignon par exemple.

En revanche, l'utilisation de pots blancs permet de limiter l'effet de l'élévation de la température sur les parois d'un pot noir, et la hauteur des pots est conforme à celle préconisée pour reproduire la pression de succion d'eau par le sol et maintenir une bonne porosité du sol pour les racines (PASSOURIA 2006⁶⁵). Néanmoins, cette hauteur de pot de 30cm est critiquable pour conclure sur les tolérances des porte-greffes car bien souvent, en pratique, les racines vont chercher plus en profondeur que 30cm, surtout dans des périodes de sécheresse, dans des horizons proches de la roche-mère qui sont parfois encore plus chlorosant. Cette faible hauteur de pot évite cependant une hétérogénéité de la terre à l'intérieur sur le long terme.

Concernant la nouvelle modalité de sol « organique », les plants ont présenté une anomalie de croissance caractérisée par une dépigmentation des feuilles sans respecter les zones internervaires et un arrêt de croissance, ce qui ne correspondait pas du tout aux symptômes de la chlorose. Les analyses statistiques pour les variables mesurées sur les plants de cette modalité de sol n'ont d'ailleurs pas révélées de différences significatives entre porte-greffes, et une mauvaise corrélation de ces variables à l'indice de Pouget (Annexe 10), et un comportement très différent des autres modalités de sol.

Les modalités de stress chlorotiques n'ont enfin pas été graduées : il n'y a qu'un sol très calcaire comparé à un sol témoin non calcaire. Il serait pertinent d'étudier des stress intermédiaires afin de définir des seuils de tolérance plus précis entre porte-greffes résistants. En effet, selon l'échelle de calcaire actif de GALET (figure 9), la majorité des « seuils » (peu définis) de résistance des porte-greffes se situe entre 6 et 20. Afin de caractériser les plus tolérants, il serait donc intéressant par la suite d'observer la moitié la plus « tolérante » des porte-greffes de cette étude, sur 3 sols contenant 0%, 10% et 15% de calcaire actif afin de couvrir l'essentiel des seuils théoriques de tolérance.

5.3. Variables mesurées : Représentativité des mesures de chlorophylle du dualex comme indicateur de chlorose et lien avec les autres travaux.

Nous avons préféré le Dualex Scientific 4 au SPAD 502, car ses mesures de chlorophylle sont mieux corrélées à la concentration réelle en chlorophylle. En effet, cet outil présente une relation linéaire et le plus grand indice de corrélation avec la concentration en chlorophylle dosée (figure 26). Malgré le fait que la droite de corrélation soit légèrement éloignée de la réalité pour les grandes valeurs, les mesures sont plus fiables que le SPAD dans les plages que nous mesurons (0-30) pour les dicotylédones (CEROVIC et al. 2012⁶⁶). De plus, des mesures sur le terrain ont confirmé une bonne corrélation entre les deux appareils de mesure, ce qui permet de relier ces travaux avec les études ayant utilisé le SPAD comme outil de mesure de la chlorophylle (BERT 2013⁶⁷, BAVARESCO 1999¹¹).

Le degré de chlorose est évalué par l'indice de Pouget, mais également par des mesures d'indice de chlorophylle au Dualex. Ces mesures ne peuvent être faites que sur des feuilles en place, ou assez grandes pour le capteur optique. Or, sur la plupart des plants, on observe des défoliations, parfois assez sévères, qui ne laissent en place que les quelques feuilles en bonne santé. Certaines défoliations ont eu lieu suite à un déficit hydrique pendant l'été, mais cela ne



Figure 27: Photographie d'un exemple de plant hétérogène en terme de symptôme

```
> power.anova.test(groups=52,between.var=12,within.var=42,power=0.8)

Balanced one-way analysis of variance power calculation

  groups = 52
    n = 2.821484
between.var = 12
within.var = 42
 sig.level = 0.05
  power = 0.8

NOTE: n is number in each group

> power.anova.test(groups=52,between.var=30,within.var=64,power=0.8)

Balanced one-way analysis of variance power calculation

  groups = 52
    n = 2.042127
between.var = 30
within.var = 64
 sig.level = 0.05
  power = 0.8

NOTE: n is number in each group
```

Figure 28: Test de puissance statistique pour déterminer l'effectif nécessaire à l'étude de la longueur et de l'indice de chlorophylle

concernait que les quelques feuilles de la base. On parle ici des défoliations partant de l'apex, avec des feuilles jaunissant, caractéristiques des symptômes sévères de chlorose. Le Dualex ne peut alors mesurer que les feuilles vertes encore en place de la base du rameau, et affiche donc un taux normal de chlorophylle, indiquant une « bonne santé » du plant. Ainsi, il serait judicieux d'évaluer plus régulièrement le pourcentage de « nœuds » comportant des feuilles encore en place, afin de mettre en parallèle avec ces mesures de Dualex.

Il est très difficile d'obtenir des valeurs très représentatives de la chlorophylle moyenne du rameau : celui-ci alterne des périodes de fort stress (chaleur donc croissance et demande en fer, après de fortes pluies qui mettent sans doute plus de calcaire en suspension), et des période de récupération (figure 27). La mesure d'une feuille sur trois de chaque rameau est fastidieuse comparée aux autres méthodes actuelles de quantification de l'effet de la chlorose sur des plants en pot avec un échantillonnage de 3 feuilles centrales (BERT 2013²³), mais elle à l'avantage d'être représentative de l'état global du plant.

5.4. Analyses statistiques : effet de l'irrigation significatif, effectif de population suffisant et limites quantitatives de l'ACP

L'effet bloc décelé par l'analyse statistique est lié à la pente des bassins d'irrigation, qui limite un peu l'apport d'eau en haut de pente à cause donc plus vite lors de la descente passive des bassins. Cela explique, dans les quelques cas où l'effet est significatif, la moins bonne croissance des plants du « haut » des bassins par manque d'eau, et leur plus faible indice de chlorophylle par manque d'azote (une différence allant jusqu'à 10cm de longueur de rameau le 14/08 et 3 point de d'indice de chlorophylle le 07/08 pour les témoins du lot 2018).

Concernant les différences de classement de porte-greffes entre les deux lots, le recul sur l'influence de l'âge des vignes et des réserves accumulées les années suivantes n'est que de deux ans.

Malgré le fait qu'une étude à aussi grande échelle n'ait pas déjà été réalisée, on peut se demander si le nombre de répétitions est suffisant pour un même couple porte-greffe/sol (3 au maximum dans cette étude), et il convient donc de justifier ce faible effectif. Par exemple, l'étude de POUGET et OTTENWAEALTER sur l'adaptation à des sols très chlorosant (1978)¹ comportait en moyenne 10 individus par porte-greffe étudié.

Tout d'abord, il ne s'agit ici que d'une étude comparative des potentiels de tolérance de chaque porte-greffe, pas une étude exhaustive pour établir une échelle précise de tolérance. On peut ensuite calculer l'effectif nécessaire (figure 28) pour différencier les 52 modalités de porte-greffes dans l'ANOVA, pour une puissance de test de 80%, une variance de 12 entre modalités (pour l'indice de chlorophylle), et une variance de 42 au sein d'une modalité (calculée à partir des écart-types observés dans l'étude en indice de chlorophylle). Ainsi, la population nécessaire pour rejeter l'hypothèse H_0 , doit être de 2,8 individus par modalité. De même, la population nécessaire pour différencier les 52 modalités de porte-greffes dans l'ANOVA, pour une puissance de test de 80%, une variance d'environ 30 entre modalités (calculée à partir de la variance des résultats par porte-greffe pour la longueur de rameau), et une variance d'environ 65 au sein d'une modalité (calculée à partir des écart-types observés dans l'étude en indice de chlorophylle) est de 2,6 individus. L'effectif utilisé ici est donc suffisant pour comparer ces porte-greffes.

Concernant le tableau final des « tolérances » (tableau 3), celui-ci a été réalisé à partir des groupes des classifications hiérarchiques, et non à partir de seuils quantitatifs, par exemple un indice de Pouget de 4 sur un des individus d'un même porte-greffe, ce qui reste limité pour l'établissement d'un classement absolu à l'issue de cette étude.

Porte-greffe	Caractère	CS	PN	UB	Sy	Porte-greffe	Caractère	CS	PN	UB	Sy	Porte-greffe	Caractère	CS	PN	UB	Sy	Porte-greffe	Caractère	CS	PN	UB	Sy							
101-14MGt	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	161-49C	Vigueur	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	420A	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	DogRidge	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	M4	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
1045P	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	1616C	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	44-53M	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Evex13-3	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	NemadexAB	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
106-8M	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	196-17C	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	57Richter	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Evex13-5	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Ramsey	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
1103P	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	216-3C	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	5BB	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Fercal	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	RGM	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
110R	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	225Ru	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	775Paulsen	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Freedom	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	RSB1	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
125-1M	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	3309C	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	779Paulsen	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Georgikon121	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	RupduLot	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
125AA	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	333EM	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	99R	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Georgikon251	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Scharzmann	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
140Ru	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	34EM	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	BC2	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Georgikon28	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	SO4	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
1447P	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	4010C	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Binova	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Gravesac	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Téléki5C	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
157-11C	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	41B	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Börner	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Harmony	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	Téléki8B	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange		Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
	Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange		Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
																								V15	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange	
																									Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange	
																									Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange	
																									Vi11a	Vigueur	Orange	Orange	Orange	Orange
																										Rendement	Orange	Orange	Orange	Orange
																										Fertilité	Orange	Orange	Orange	Orange

Figure 29: Caractérisation des critères de fertilité, de vigueur et de rendement pour 52 porte-greffes en fonction de 4 cépages (LAGALLE 2019)

La couleur rouge signifie que le porte-greffe a une moyenne inférieure au premier quartile, la couleur verte une moyenne supérieure au troisième quartile et le orange correspond à une moyenne intermédiaire

5.5. Mise en relation avec les autres caractéristiques évaluées et classements des porte-greffes étudiés.

Ces résultats doivent être mis en relation avec les classements actuels de porte-greffes et les autres critères qui les caractérisent. En effet, le porte-greffe 161-49C apparaissant comme tolérants dans le lot 2019 et le porte-greffe 3309C présentent actuellement de graves symptômes de dépérissement (TORREGROSA et SPILMONT 2014², TORREGROSA 2011⁶⁸).

De même, en relation avec la synthèse des connaissances actuelles sur les porte-greffes qui a pu être établie par E. MARGUERIT (Annexe 11), on remarque que le classement des plants greffés dans l'année, du lot 2019, ne correspondent pas vraiment au classement classique des porte-greffes vis à vis de leur tolérance à la chlorose (des références de la tolérance comme le 41B et le Fercal sont moins bien classés que le RSB1, le 420A ou le 161-49C, toujours considérés comme moins tolérants). En revanche, le classement des plants 2018 est très similaire avec ceux précédemment établis, pour les références utilisées dans les autres classements (mis à part le 101-14MGt qui présente une grande tolérance dans ce lot figure 22)).

En parallèle, les résultats sur Pinot noir de l'étude faite par LAGALLE (2019)⁶⁹ sur la caractérisation de la vigueur conférée de différents porte-greffes sur la station de l'INRA Bordeaux au champs (figure 29) permettent de mettre en relation la vigueur conférée et le rendement à la « tolérance à la chlorose » de cette expérimentation. Les mêmes porte-greffes n'ont pas tous exactement été utilisés, mais la grande majorité peut être comparée.

Ainsi, le Georgikon121 présenterait un bon rendement et une vigueur modérée, le Schwarzmänn un mauvais rendement et une vigueur modérée, le M4 un mauvais rendement et une vigueur forte, le Georgikon251 une mauvaise vigueur et un mauvais rendement et enfin le 57R une faible vigueur et un bon rendement. Pour le lot 2019 uniquement, le Binova présenterait un rendement modéré et une vigueur modérée. Enfin, en ce qui concerne les porte-greffes français décrits dans la littérature comme peu tolérants à la chlorose mais qui présentent néanmoins une bonne tolérance dans cette expérimentation, nous pouvons citer le 196-17Cl qui présenterait un bon rendement et une bonne vigueur, et même le 101-14MGt pour le lot 2018 qui présenterait un rendement modéré et une bonne vigueur.

De même, les résultats de l'étude faite par MUYKAEW (2019)⁷⁰ sur la caractérisation de la réponse au déficit hydrique de différents porte-greffes sur la station de l'INRA Bordeaux en pots permettent de mettre en relation la vigueur conférée et le rendement à la « tolérance à la chlorose » de cette expérimentation. Ainsi, le Schwarzmänn présente une bonne tolérance à la sécheresse en 2017 mais faible en 2015, le Georgikon121 une tolérance moyenne en 2015, le Georgikon251 une tolérance bonne en 2015 à faible en 2017, le 57R une tolérance faible en 2015, et enfin le Binova une tolérance faible en 2017, et le M4 une tolérance moyenne à faible en 2017. De même pour les porte-greffes français décrits dans la littérature comme peu tolérants à la chlorose mais qui présentent néanmoins une bonne tolérance dans cette expérimentation, le 196-17Cl présenterait une très mauvaise tolérance en 2015, le BC2 une tolérance moyenne pour les deux années, et le 101-14MGt pour le lot 2018 une tolérance faible en 2015 et une tolérance moyenne en 2017.

Enfin, il faut souligner la complexité de l'étude du phénomène de tolérance à la chlorose, en rapport avec le nombre d'interactions et de facteurs à maîtriser et prendre en compte (greffon, environnement). L'existence avérée de ces interactions justifie donc l'approche multicritère de cette étude et la recherche de variables à mesurer afin de quantifier et mieux prendre en compte l'ensemble des conséquences de la chlorose.

6. Conclusion

Afin de répondre sur le long terme aux problématiques de chlorose en région calcaire, le porte-greffe est un levier primordial. Dans le cadre d'une stratégie d'adaptation innovante aux changements climatiques futurs (scénario de la prospective du projet LACCAVE de l'INRA «Adaptation à long terme au changement climatique pour la viticulture et l'œnologie»), l'utilisation de nouveaux porte-greffes est là aussi essentielle. Ainsi, dans le contexte de diversification de la gamme de porte-greffes disponibles en Bourgogne, ces nouveaux porte-greffes doivent répondre à ces deux facteurs. La caractérisation de la tolérance à la chlorose d'une large gamme de nouveaux porte-greffes issus de l'étrangers et peu étudiés est donc un pré-requis indispensable pour sélectionner plus tard parmi eux des nouveaux candidats potentiels. Les 52 porte-greffes utilisés dans cette étude en conditions contrôlées et associés au Pinot noir permettent d'étudier cette « tolérance », et de la caractériser afin d'en déduire des individus intéressants.

Dans ces conditions expérimentales, nous avons démontré tout d'abord que cette gamme permet d'observer des tolérances très variables. Puis, nous avons confirmé que le type de sol de culture a un effet très significatif sur les symptômes de chlorose, la croissance et le taux de chlorophylle des individus. Nous avons également montré que le porte-greffe a un effet très significatif sur ces trois variables. Concernant la caractérisation de la tolérance, nous avons montré que les mesures de la croissance et de l'indice de chlorophylle sont très corrélées à la mesure classique et qualitative des symptômes de chlorose, mais aussi que le taux de feuilles vivantes et le diamètre de bois de l'année précédente le sont aussi, sur une seule année. Enfin, nous avons observé que la décoloration du feuillage précède la plupart du temps la perte de croissance.

L'effet de l'année d'étude est très important sur la tolérance à la chlorose ainsi caractérisée des individus, mais certains porte-greffes étrangers semblent présenter une tolérance intéressante sur ces deux années. Ainsi, le 57R et le M2 mérite une attention toute particulière même si le 57R semble posséder une faible vigueur conférée sur d'autres études (LAGALLE 2019⁶⁹). L'objectif à long terme de cette étude est également d'inscrire ces nouveaux porte-greffes d'intérêt au catalogue français.

Enfin, certains porte-greffes semblent également se démarquer des autres, mais n'ont pu être étudié que sur une seule année (Evex 13-5, Binova, SaltCreek, V15).

D'autres caractères pourraient être étudiés facilement comme la biomasse aérienne et racinaire lors de la destruction des plants, ainsi que le poids de vendange afin de mieux sélectionner les porte-greffes d'intérêt.

7. Liste des références bibliographiques

1. Pouget, R. & Ottenwaelter, M. Etude de l'adaptation de nouvelles variétés de porte-greffes à des sols très chlorosants. *OENO One* **12**, 167 (1978).
2. Spilmont, A. S., Sereno, C., El khoti, N. & Torregrosa, L. The decline of the young vines grafted onto 161-49 C. *Acta Hortic.* 251–264 (2014).
3. Audin, M. La chlorose de la vigne dans le Beaujolais. *Ann. Société Bot. Lyon* **25**, 64–69 (1900).
4. Pouget, R. & Juste, C. Le choix des porte-greffes de la vigne pour les sols calcaires. *OENO One* **6**, 357–364 (1972).
5. Ravaz, L. Les porte-greffes des terrains calcaires. *Prog. Agric. Vitic.* 1–19 (1902).
6. Cordeau, J. Chapitre 5: Les porte-greffes et la chlorose de la vigne. in *Création d'un vignoble* **1**, 53–62 (Editions Féret, 1998).
7. Champagnol, F. Chapitre 5: Troubles de la nutrition minérale, 1) La chlorose. in *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale* **1**, (1984).
8. Pouget, R., Delmas, J. & Bouvard, J. La chlorose ferrique. Maladies physiologiques et accidents divers. *Sci. Tech. Vigne* 431–435 (1971).
9. Hidalgo, L. R. & Candela, M. El poder clorosante de los suelos calizos en el vinedo. *Bol INIA Espana* 383–439 (1958).
10. Manaresi, A. *Viticultura* 174–196 (1947).
11. Bavaresco, L., Giachino, E. & Colla, R. Iron chlorosis paradox in grapevine. *J. Plant Nutr.* **22**, 1589–1597 (1999).
12. Drouineau, G. Dosage rapide du calcaire actif des sols. *Ann. Agron.* 441–450 (1942).
13. Gilbert, J. A., Van der Lelie, D. & Zarraonaindia, I. Microbial terroir for wine grape. *Proc Natl Acad. Sci. U. S. Am.* 5–6 (2014).
14. Lewis, R. W., LeTourneau, M. K., Davenport, J. R. & Sullivan, T. S. 'Concord' grapevine nutritional status and chlorosis rank associated with fungal and bacterial root zone microbiomes. *Plant Physiol. Biochem.* **129**, 429–436 (2018).
15. Gris, E. Nouvelles expériences sur l'action des composés ferrugineux solubles appliqués à la végétation et spécialement au traitement de la chlorose et de la débilité des plantes. *C.R.A.S.* 1118 (1844).
16. Maze, P., Ruot, M. & Lemoigne, M. Recherche sur la chlorose végétale provoquée par le carbonate de calcium. *C.R.A.S.* 435 (1912).
17. Varanini, Z. & Maggioni, A. Iron reduction and uptake by grapevine roots. *J. Plant Nutr.* **5**, 521–529 (1982).
18. Römheld, V. & Marschner, H. Mobilization of iron in the rhizosphere of different plant species. *Adv Plant Nutr* **2**, 155–204 (1986).
19. Pouget, R. Influence des réserves glucidiques sur l'intensité de la chlorose ferrique chez la vigne. *OENO One* **8**, 305–314 (1974).
20. Lafon, J. & Couillaud, P. Chlorose, II. in *Maladies et parasites de la vigne* 132–150 (1961).
21. Juste, C. & Pouget, R. Influence des exsorbats radiculaires de vigne sur le maintien en solution de fer à pH élevé en présence ou en l'absence de calcaire. *Compte-Rendu Académie Agric.* **53**, 85–90 (1967).
22. Jimenez, S., Gogorcena, Y., Hévin, C., Rombola, A. & Ollat, N. Nitrogen nutrition influences Strategy I responses to iron deficiency in tolerant and sensitive genotype of

- Vitis. *Plant Soil* 343–355 (2007).
23. Bert, P.-F. *et al.* Mapping genetic loci for tolerance to lime-induced iron deficiency chlorosis in grapevine rootstocks (*Vitis* sp.). *Theor. Appl. Genet.* **126**, 451–473 (2013).
 24. Vert, G. A., Briat, J. F. & Curie, C. Dual regulation of the Arabidopsis high-affinity root iron uptake system by local and long-distance signals. *Plant Physiol.* **132**, 796–804 (2003).
 25. Schmidt, W. Iron stress response in roots of strategy I plants. In: Barton LL, Abadia J (eds) Iron nutrition in plants and rhizosphere microorganisms. *Springer Neth.* 229–250 (2006).
 26. Gay-Bellile, F. La chlorose calcaire de la vigne, ses traitements. *Prog. Agric. Vitic.* 326–332 (1972).
 27. Delmas, J. Recherche sur la nutrition minérale de la vigne, *Vitis vinifera* var. Merlot, en aquiculture. (1971).
 28. Hardley, C. P. & Lindner, R. C. Observed responses of apple and pear trees in some irrigation waters of North Central Washington. *Proc Am Soc Hort Scien Proc* 35–44 (1945).
 29. Porter, L. K. & Thorne, D. W. Interrelation of carbon dioxide and bicarbonate ions in causing plant chlorosis. *Soil Sci.* **5**, 373–381 (1955).
 30. Miller, G. W. & Evans, H. J. Inhibition of plant cytochrome oxidase by carbonate. North Carolina Agriculture Experimental Station Raleigh. *NC Nat.* **178**, 974–976 (1956).
 31. Stelwijk, J. A. J. & Thimann, K. W. On the uptake of carbon dioxide and bicarbonate by roots and its influence on growth. *Plant Physiol.* **36**, (1957).
 32. Boxma, R. Bicarbonate as the most important soil factor in lime-induced chlorosis in the Netherlands. *Plant Soil* **37**, 233–243 (1972).
 33. Delas, J. Chapitre 12: Les carences, partie II, 1) La chlorose. in *Fertilisation de la vigne* **1**, 122–124 (Editions Féret, 2010).
 34. Branas, J. Chapitre 2: Maladies physiologiques, Chlorose. in *Viticulture* 626–635 (1974).
 35. Agulhon, R. & Bassino, J. P. Protection intégrée, contrôles périodiques au vignoble. *ITX ACTA* **1**, 138–139 (1980).
 36. Ravaz, L., Lagatu & Maume, L. Un cas spécial de chlorose de la vigne. *Ann. ENA Montp.* **XIX**, 159–179 (1926).
 37. Kessler, B. Some relationship between the production of carbon dioxide by roots and lime tolerance of fruit trees and grapevine hybrids. *Plants Physiol.* **35**, 140–145 (1960).
 38. Eynard, I. Ricerche sull assorbimento, traslocazione e distribuzione di alcuni isotopi vadiattivi (P32, Ca45, Fe59, Cs137) en *Vitis vinifera*. *Atti Accad. Ital. Della Vite E Vino Siena* **XIII**, 519–538 (1961).
 39. Pouget, R. & Ottenwaelter, M. Méthodologie de la résistance à la chlorose ferrique chez la vigne. *Annu. Amélioration Plantes* **23**, 347–356 (1973).
 40. Perret, P. & Koblet, W. Untersuchungen über des Zusammenhang zwischen Saverstoff-Kohlendioxyd und Actylengehalt der Bodenluft und dem Auftreten der Rebenchlorose. *Wein-Wiss.* **3**, 151–170
 41. Maggioni, A. Iron absorption by excised grapevine roots. *Vitis* **19**, 105–112
 42. Piagnani, C. & Zocchi, G. Physiological responses of grapevine callus culture to iron deficiency. *J. Plant Nutr.* **20**, 1539–1549 (1997).
 43. Tangolar, S. G., Ünlü, G., Tangolar, S., Daşgan, Y. & Yılmaz, N. Use of in vitro method to evaluate some grapevine varieties for tolerance and susceptibility to sodium bicarbonate-induced chlorosis. *Vitro Cell. Dev. Biol. - Plant* **44**, 233–237 (2008).

44. Stephens, P. A., Widholm, J. M. & Nickel, C. D. Iron-deficiency chlorosis evaluation of soybean with tissue culture. *Theor. Appl. Genet.* **80**, 417–420 (1990).
45. Branas, J., Bernon, G. & Levadoux, L. Les porte-greffes en viticulture. *Ann. Epiph Phytogénétique* 461–535 (1939).
46. Lacouture, J. & Cantagrel, R. Le choix des porte-greffes et leur caractéristiques: cas du vignoble dans les Charentes. *Rev. Paysan* (1986).
47. Galet, P. Dosage du calcaire actif et de l'appréciation du pouvoir chlorosant des sols. *Bull. OIV* **1**, 37–43 (1951).
48. Galet, P. La résistance des porte-greffes à la chlorose. *Prog. Agric. Vitic.* **64**, 128–133 (1947).
49. Rod, P. Calcaire actif et calcaire total dans nos sols viticoles. *Rev. Suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 159–164 (1974).
50. Hidalgo, L. R. Los portainjertos en viticulutura. *Cuad. INIA-Espana* **4**, 22–23 (1975).
51. Winkler, A. J. Viticultura, Cia editorial Continental S.A. Mexico-Espana-Argentina-Chile-Venezuela. in 457–458
52. Scholl, W. Erlahrungen mit der Chlorose der Weinreben in der Bundesrepublik Deutschland. *Mitt Klosterneubg.* **29**, 186–193 (1979).
53. Morlat, R. Observations sur la chlorose ferrique dans les sols viticoles calcaires du Saumurois. *OENO One* **10**, 359 (1976).
54. Bavaresco, L. & Lovisolo, C. Effect of grafting on grapevine chlorosis and hydraulic conductivity. *Vitis* **39**, 89–92 (2000).
55. Hidalgo, L. Etat actuel des recherches sur les chloroses de la vigne. *Bull. OIV* **55**, 459–483 (1982).
56. Smith, B. R. & Cheng, L. Fe-EDDHA alleviates chlorosis in Concord Grapevines grown at high pH. *Hortscience* **41**, 1498–1501 (2006).
57. Covarrubias, J. I., Pisi, A. & Rombolà, A. D. Evaluation of sustainable management techniques for preventing iron chlorosis in the grapevine: Sustainable prevention of grapevine iron chlorosis. *Aust. J. Grape Wine Res.* **20**, 149–159 (2014).
58. Lamberti, F. Xiphinema pachticum. *CIH Descr. Plant-Parasit. Nematodes* **7**, (1977).
59. Diago, M. P. *et al.* Calibration of non-invasive fluorescence-based sensors for the manual and on-the-go assessment of grapevine vegetative status in the field: Non-invasive sensing of grapevine vegetative status. *Aust. J. Grape Wine Res.* **22**, 438–449 (2016).
60. Rife, T. W. & Poland, J. A. Field Book: An Open-Source Application for Field Data Collection on Android. *Crop Sci.* **54**, 1624 (2014).
61. Rombola, A. & Tagliavini, M. Iron nutrition of fruit tree crops. *Iron Nutr. Plants Rhizospheric Microorg. Eds Barton J Abadia* 61–83 (2006).
62. Guibault, P. Identification des principales carences de la vigne. *Avenir Agric. Aquitain* (2003).
63. Reynier, A. *Manuel de Viticulture.* (2007).
64. Tandonnet, J.-P. *et al.* Long term effects of nitrogen and water supply on conferred vigour and yield by SO4 and Riparia gloire de Montpellier rootstocks. *OENO One* **42**, 89 (2008).
65. Passioura, J. B. Viewpoint: The perils of pot experiments. *Funct. Plant Biol.* **33**, 1075 (2006).
66. Cerovic, Z. G., Masdoumier, G., Ghazlen, N. B. & Latouche, G. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal

flavonoids. *Physiol. Plant.* **146**, 251–260 (2012).

67. Bert, P.-F. *et al.* Mapping genetic loci for tolerance to lime-induced iron deficiency chlorosis in grapevine rootstocks (*Vitis* sp.). *Theor. Appl. Genet.* **126**, 451–473 (2013).

68. Torregrosa, L. *et al.* Le 161-49C et le dépérissement des jeunes vignes. *Prog. Agric. Vitic.* **128**, (2011).

69. Lagalle, L. Caractérisation de la vigueur conférée par une large gamme de porte-greffes de vigne dans 2 environnements différents au stade jeune plantation. (AgroParisTech, 2019).

70. Muykaew, P. Caractérisation de la réponse à un déficit hydrique induit sur une large gamme de porte-greffes. (Geisenheim, 2019).

Annexes

Annexe 1 : Statistiques France Agrimer 2017 de la pépinière viticole – Pourcentage des porte-greffes dans les greffes-boutures de 2000 à 2017.


Tableau 42: Evolution de l'importance relative des porte-greffes dans les assemblages depuis 2000 (en % du total des greffes-boutures de l'année)

année	S.O.4	110 R	3309 C	140 Ru	Fercal	41 B	101-14	Gravesac	1103 P	161-49 C	RSB1	Rp. G1 Montp.	Autres PG	Greffes (millions)
2000	27,7	16,3	14,2	8,1	3,6	6,7	4,2	2,6	3,1	2,9	2,9	2,7	4,9	292
2001	25,6	17,4	14,6	8,4	4,1	6,8	4,4	3	3,1	3	2,4	2,6	4,7	275
2002	24,1	19,1	13,4	8,1	4,8	6,6	4,5	3,2	3,5	3,2	2,4	2,5	4,6	266
2003	23,1	19,3	13,4	8,1	5,2	6,6	4,6	3,7	3,7	3,4	2,3	2,4	4,2	290
2004	23,2	19,4	11,9	8	5,7	7,6	4,6	3,5	3,9	3,6	2,5	2,2	3,9	260
2005	22,9	20,1	11,3	8,1	7,1	6,5	4,1	3,7	4,1	4	2,4	2	3,7	246
2006	22,3	17	11,5	7,2	8,4	7	4,3	4,4	4,3	4,1	2,9	2,6	4	168
2007	22,2	17,4	11,7	6,9	8,7	7,3	4,7	4,3	3,8	3,8	3,1	2	4,1	161
2008	21	15,5	13,5	6,4	8,7	7,4	5,2	5,3	3,5	4	3	2,3	4,2	194
2009	20,6	14,1	14,9	5,2	9	7,9	6,1	6,1	2,6	3,9	3	2,3	4,5	169
2010	22,3	15,9	14,1	5,9	9,4	6,2	5,8	5,5	2,4	3,6	2,6	2,1	4,2	177
2011	22	16,5	13,8	5,9	9,5	5,9	5,3	5,6	3,2	3,6	2,6	1,7	4,5	194
2012	20,5	16,9	15,2	5,9	9,3	6	5,3	6,1	3,1	2,7	2,6	1,8	4,4	190
2013	22,3	14,1	13,5	5,9	9,5	6,5	6,2	6,1	2,7	3,1	3,1	1,9	5,1	181
2014	23,7	14,9	13,3	5,8	8,7	5,2	6	6,3	3,4	2,4	3	1,8	5,5	191
2015	22,8	14,8	13,9	5,5	9,4	5,2	6,5	7	2,7	2	2,9	1,6	5,7	213
2016	23,2	14,4	13	5,8	9,7	5,8	6,3	6,9	2,8	1,9	3,1	1,6	5,5	224
2017	23,9	14,8	14,7	6,1	9,0	5,5	5,3	6,5	3,2	1,4	2,8	1,3	5,5	223

Annexe 2 : Liste des porte-greffes utilisés dans le cadre du projet RootBourgogne

Année 2018 (1 an)		Année 2019	
Porte-greffe	Effectif	Porte-greffe	Effectif
101-14MGt	8	101-14MGt	9
1045P	7		
106-8MGt	6	106-8MGt	9
107Vidal**	1		
1103P	7	1103P	9
110R	9	110R	9
125-1MGt	5		
125AA	6	125AA	9
140Ru	3	140Ru	9
1447P	5	1447P	9
150-15M**	2		
157-11C	4	157-11C	9
161-49C**	1	161-49C	9
1616C	6	1616C	9
17-37MGt**	2		
196-17Cl	8	196-17Cl	9
216-3Cl	6		
		225Ru	9
3309C	8	3309C	9
		333EM	9
34EM	6	34EM	9
4010Cl	2	4010Cl	9
41B	8	41B	9
420A	9	420A	9
44-53M	7	44-53M	9
57R	8	57R	9
5BB	4	5BB	9
775P	4	775P	9
779P	8	779P	9
99R	5	99R**	8
BC2	6	BC2	9
		Binova	9
Borner	2	Borner	9
DogRidge	8	DogRidge**	7
Evex13-3	4	Evex13-3	7
		Evex13-5	9
Fercal	8	Fercal	9
Freedom	8	Freedom	9
Georgikon121	4	Georgikon121	9
Georgikon251	6	Georgikon251	9
Georgikon28	8	Georgikon28	9
Gravesac	8	Gravesac	9
Harmony	9	Harmony	9
M1	4	M1	9
M2	8	M2	9
M3	7	M3	9
M4	8	M4**	7
Ramsey	8		
		Nemadex**	6
RGM	7	RGM	9
RSB1	8	RSB1	9
Rupestris du Lot	7	Rupestris du Lot	9

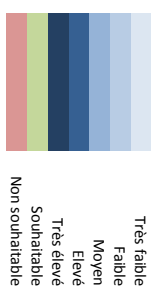
		SaltCreek	9
Schwarzmann	9	Schwarzmann	9
SO4	5	SO4	9
Teleki5C	4	Teleki5C	9
Teleki8B	5	Teleki8B	9
		V15	9
Vialla	8	Vialla	9
52 porte-greffes		52 porte-greffes	

 : Porte-greffes non inscrits au catalogue français mais utilisés à l'étranger.

** : Porte-greffes statistiquement non significatifs (moins de deux répétitions en terre témoin ou en terre calcaire)

Annexe 3 : Résultat des analyses de terre – composition des 3 terres utilisées pour l'expérimentation.

TERRE ANALYSEE	Terre Calcaire 2019			Terre Calcaire 2018			Terre Organique			Terre Témoin 2019			Terre Témoin 2018		
	REPETITION	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ARGILE (%)	100	10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
LIMONS fins (%)	32,6	34,3	33,0	31,6	33,1	33,0	29,2	29,3	30,4	14,6	14,9	14,6	14,6	14,6	14,9
LIMONS grossiers (%)	32,7	34,0	33,4	32,3	33,1	33,0	33,4	33,4	34,0	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
Sables fins (%)	16,5	15,8	16,5	1,5	16,2	15,3	18,1	15,0	17,3	37,8	32,4	32,4	32,4	32,4	32,4
Sables grossiers (%)	8,8	7,7	8,8	8,8	8,9	9,9	7,7	9,5	7,8	11,7	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9
Texture GERPPA	9,5	8,2	8,3	12,4	8,7	18,4	11,7	12,8	10,6	17,6	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3
Matière organique (%)	0,9	1,1	1	1,2	1	1	8,9	9,3	9,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Acroté total (%)	0,079	0,077	0,076	0,078	0,076	0,066	0,155	0,157	0,153	0,076	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073
Carbone organique (%)	0,523	0,640	0,581	0,640	0,581	0,581	5,174	5,407	5,349	0,698	0,698	0,698	0,698	0,698	0,698
Rapport C/N	6,5	7,9	7,4	9,3	7,9	9,4	33,4	34,3	35,1	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
pH eau	8,5	8,6	8,6	8,5	8,6	8,6	7,9	7,9	8	8	8	8	8	8	8,2
Calcaire total (g/kg)	535	605	525	545	588	575	522	501	435	10	10	10	10	10	10
Calcaire actif (g/kg)	181	183	185	184	184	185	180	175	177	0,03	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
ELEMENTS MAJEURS ASSIMILABLES															
P2O5 ass. Joret Hébert (%)	0,147	0,138	0,163	0,17	0,173	0,167	0,254	0,253	0,259	0,03	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
COMPLEXE ADSORBANT															
CFC Metson (cmol+/kg)	15,4	14,4	15,5	13,6	14,7	13,9	19	16,5	18,1	6,3	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
K2O (g/kg)	0,145	0,154	0,14	0,075	0,133	0,14	0,187	0,191	0,209	0,075	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074
K/CEC (%)	2	2,3	1,9	2	1,9	2,1	2,5	2,5	2,5	2,5	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
MgO (g/kg)	0,21	0,223	0,197	0,186	0,192	0,203	0,327	0,336	0,326	0,154	0,154	0,154	0,154	0,154	0,154
Mg/CEC (%)	6,8	7,7	6,4	6,8	6,5	7,3	8,6	10,2	9	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3
K/Mg	0,29	0,29	0,3	0,3	0,29	0,29	0,24	0,24	0,27	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
CaO (g/kg)	14,64	14,58	14,28	14,28	14,3	15,02	15,21	17	14,75	4,9	5,03	5,03	5,03	5,03	5,03
Ca/CEC (%)	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150
S (Somme des cations (cmol+/kg))	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150
OLIGO ELEMENTS															
Manganèse échangeable (mg/kg)	1,4	0,77	0,94	0,5	0,55	0,53	8,96	9,72	10,98	>150	>150	>150	>150	>150	>150
Cuivre échangeable (mg/kg)	0,63	0,61	<0,5	0,58	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	>150	>150	>150	>150	>150	>150
Fer EDTA	<9,96	10	9,97	9,95	10,97	10,01	<9,98	<9,98	<9,98	>150	>150	>150	>150	>150	>150
AUTRES RESULTATS															
IPC	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200



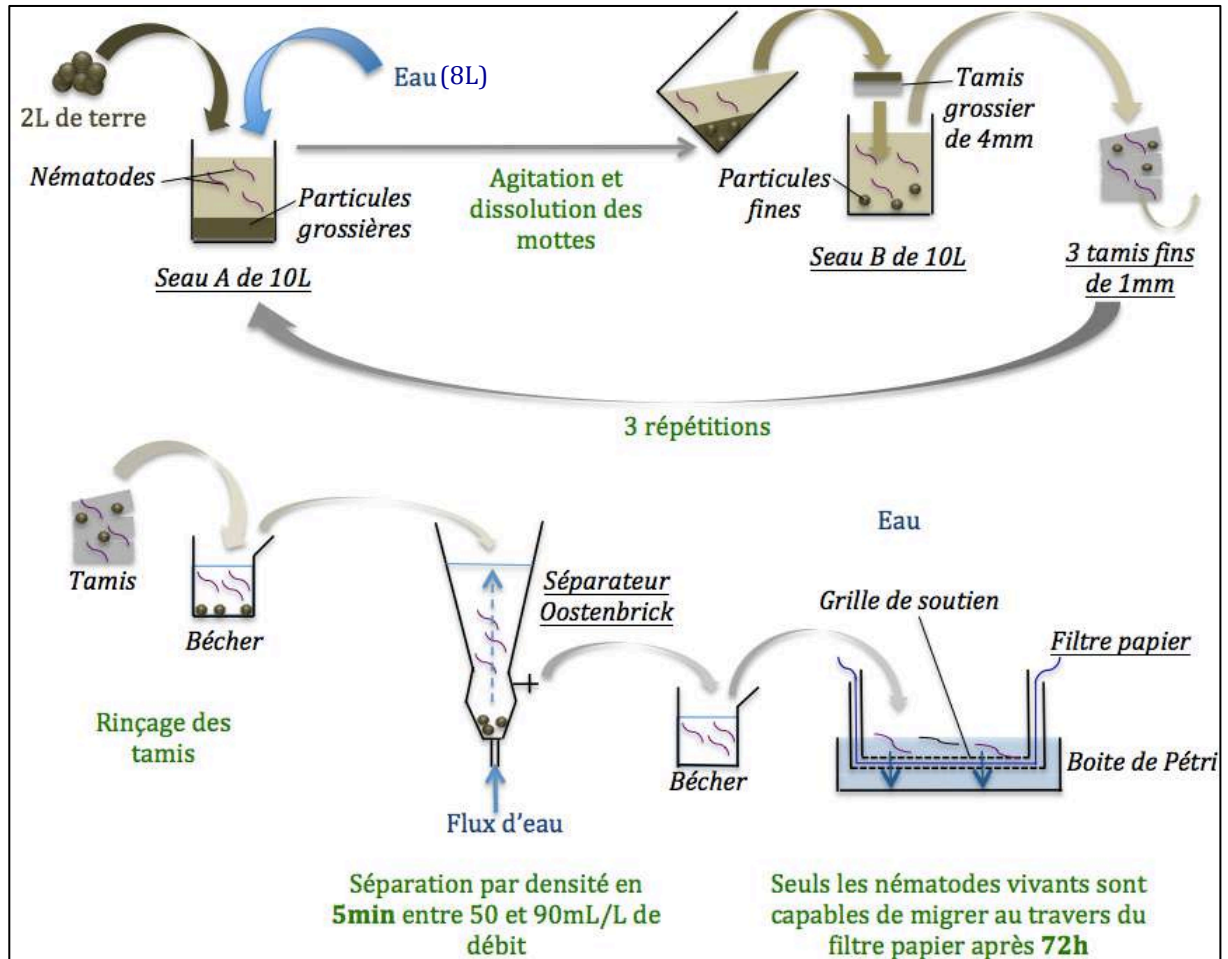


Figure 30: Schéma du protocole de dénombrement des nématodes

Annexe 4 : Protocole de dénombrement de nématodes dans une terre analysée
(source : Vitinnov).

- 1) Verser la terre de la boîte sur une table et prélever 2L de terre en différents endroits.
- 2) Dissoudre cette terre dans un seau **A** de 10L avec de l'eau, en triturant légèrement la terre pendant le remplissage pour favoriser la dissolution, mais sans tuer les nématodes.
- 3) Verser la suspension formée dans un autre seau **B** de 10L à travers un tamis grossier (4mm), en gardant ce qui ne s'est pas dissout au fond du seau **A**.
- 4) Re-dissoudre ces éléments grossiers une seconde fois dans le seau **A** avec de l'eau.
- 5) Pendant ce temps là, verser le contenu fin du seau **B** à travers 3 tamis fins successifs de même diamètre (1mm) en éliminant l'eau en dessous.
Penser à incliner les tamis et laisser passer l'air pour éviter le colmatage.

Les nématodes étant longs de 2mm, mais épais de seulement 0,1mm, ces 3 tamis permettent de retenir ceux qui auraient passé le premier tamis avec le flux d'eau.

- 6) Au total, il faut dissoudre 3 fois la terre grossière dans de l'eau nouvelle et donc passer 3 fois la terre fine dans les tamis fins, en vidant et rinçant complètement le seau **B** de terre fine au dernier passage.
- 7) Jeter enfin la terre grossière restante au fond du seau **A**.

- 8) Puis, rincer délicatement le rétentat des trois tamis dans un grand béccher.
- 9) Dans un extracteur d'Oostenbrick, allumer l'eau à une pression de 90-100mL/L.
Cet extracteur Oostenbrick permet de séparer les particules les plus denses qui tombent au fond des particules moins denses qui restent en suspension grâce au flux d'eau.

10) Avant d'avoir rempli le premier tiers, verser le béccher et le rincer dans l'entonnoir du haut de l'extracteur.

- 11) Après un tiers de remplissage, la pression doit être inférieure à 80mL/L.
Attention, la manivelle est très sensible.

12) Pendant le remplissage du second tiers, nettoyer le tamis grossier, le seau **A**, remettre le reste de terre brute dans sa boîte.

13) Après deux tiers de remplissage, baisser la pression manuellement jusqu'à 50mL/L

14) Pendant le remplissage du dernier tiers, se laver les mains, ouvrir la boîte de terre suivante, prélever les 2L et les dissoudre dans le seau **A** pour la suite.

15) À la fin du remplissage, ouvrir le bouchon du tuyau latéral directement dans les 3 tamis fins pour récupérer les nématodes, jusqu'à vidange complète de l'extracteur.

Attention car le jet est très fort au débouchage du tuyau avec le poids de la colonne d'eau.

16) Couper le robinet d'eau de l'extracteur et ouvrir le bouchon du bas pour vidanger complètement l'extracteur des particules denses. Puis nettoyer l'extracteur par le haut, en insistant sur l'entonnoir, finir par le tuyau latéral et les bouchons.

17) Rincer délicatement le rétentat des tamis fins dans le béccher pour mettre en suspension les nématodes.

18) Verser et rincer ce béccher dans un pot comportant un filtre au fond, en le plaçant dans une boîte de Pétri rapidement pour garder de l'eau et garder les nématodes en suspension.

19) Ces pots sont numérotés et conservés 72h avant comptage au microscope et analyse.

Cette opération permet aux nématodes vivants de la suspension de passer au travers du filtre et de se retrouver en-dessous du pot, dans l'eau.

(voir figure 27)

Annexe 5 : Protocole officiel de caractérisation de la tolérance à la chlorose



Confidentiel

Annexe 1

Protocole proposé pour l'évaluation des porte-greffes pour la résistance à la chlorose calcaire (d'après Pouget et al. 1973),

Deux tests complémentaires seront réalisés en 2017 et au cours des 6 premiers mois de 2018.

Ces évaluations précoces permettent de classer le matériel nouveau par rapport à des génotypes connus, mais ne remplacent pas une évaluation de type VATE en site chlorosant dans des conditions viticoles classiques avec des vignes fructifères. (cf protocole VATE)

Méthode des greffages réciproques (Bordeaux, UMR EGFV)

Cette méthode permet de comparer l'aptitude de la nouvelle variété à satisfaire les besoins en fer des feuilles par rapport à un témoin résistant (41B).

Réalisation des greffes réciproques entre la variété à tester (X) et le témoin résistant 41B.

X/X X/41B 41B/41B 41B/X

Pour accroître la rapidité d'apparition des symptômes, il est nécessaire de diminuer l'importance des réserves en fer de la plante greffée. Pour cela, les assemblages sont réduits à un seul mérithalle d'environ 8 à 10 cm pour le porte-greffe et à un seul bourgeon pour le greffon.

Le nombre de répétition par type d'association doit être au moins de 5.

Les plantes greffées sont testées dans des pots de 4 L avec un sol un sol très fortement chlorosant.

Interprétation des résultats :

X/X est plus chlorosé que X/41B et 41B/X plus chlorosé que 41B/41B => la variété testée est moins résistante que la variété de référence 41B.

X/X est moins chlorosé que X/41B et 41B/X moins chlorosé que 41B/41B => la variété testée est plus résistante que la variété de référence 41B.

Evaluation de la nouvelle variété au sein d'une gamme de porte-greffe associée à un greffon unique en pot et au vignoble.

Le niveau de résistance relatif de la nouvelle variété est déterminé en comparaison avec des porte-greffes témoins choisis en fonction de l'IPC du sol. Il s'agit le plus souvent de : SO4, 41B, 333EM, RSB1, 140 RU, ou Fercal. Le nombre de porte-greffes témoins sera au minimum de 3. Il peut aller jusqu'à 5 en incluant des porte-greffes sensibles. Toutes les plantes d'un même essai doivent obligatoirement provenir de la même origine (même pépinière et si possible même provenance des boutures) afin de constituer des lots le plus homogène possible. Le greffon utilisé peut dépendre du demandeur (ex Ugni blanc). Les plants sont mis en pot l'année du greffage.

En pot (UMR EGFV) : L'effectif par combinaison doit être au minimum de 5 plantes. Les greffés-soudés sont testés dans des pots de 4 L avec un substrat très fortement chlorosant. Les plants sont conduits sur l'axe principal et épamprés une fois par semaine. Ils sont arrosés par subirrigation une fois par jour avec une solution nutritive ne contenant pas de fer.

Calendrier

Les plants seront greffés au printemps 2017 (février-mars) par EGFV, puis mis en pot en terre chlorosante en mai-juin 2017. Les premières notations auront lieu au cours de l'été 2017, elles seront complétées par une seconde série de notations au cours du second cycle de greffage.

Notations

Le suivi des essais est effectué dès la plantation. Les notations et les mesures doivent être réalisées sur chaque plante, tous les 15 jours, dès l'apparition des symptômes. Un suivi chaque année est nécessaire pendant une période au moins égale à 2 cycles végétatifs consécutifs.

Les mesures portent sur :

- des notations directes des symptômes sur les jeunes feuilles de l'extrémité des sarments suivant l'échelle de Pouget.
- des mesures d'indice chlorophyllien (SPAD) sur jeunes feuilles. Les mesures sont effectuées sur les feuilles situées sous l'apex en évitant les nervures centrales. Un minimum de 30 lectures par combinaison est recommandé afin de générer des valeurs fiables.
- des mesures d'allongements de 5 à 10 rameaux principaux par combinaison.
- des pesées de bois de taille par souche.

Echelle de notation de Pouget :

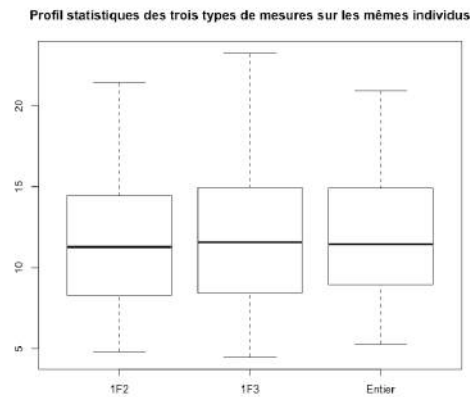
- 0 : Absence de symptômes. Limbe de couleur vert foncé.
- 1 : Limbe de couleur vert clair
- 2 : Limbe de couleur jaune pâle. Présence d'un réseau de petites nervures vertes.
- 3 : Limbe de couleur jaune franc. Nervure principales vertes.
- 4 : Apparition de petites nécroses sur le limbe jaune franc à blanchâtre
- 5 : Limbe nécrosé sur plus de 10% de la surface. Stade « cottis ».

Solution nutritive :

- 2.5 mM KNO₃
- 0.25 mM MgSO₄
- 0.62 mM NH₄NO₃
- 1mM (NH₄)H₂PO₄
- 9.1mM MnCl₂
- 46.3 mM H₃BO₃
- 2.4 mM ZnSO₄
- 0.5 mM CuSO₄
- 0.013 mM (NH₄)₆Mo₇O₂₄

Annexe 6 : Test de la représentativité d'une mesure de dualex par alternance des feuilles pour les plants chlorosés.

Nous avons donc mesuré l'indice de chlorophylle pour les 154 individus en terre calcaire sur toutes les feuilles du rameau, puis nous avons retiré dans les données une mesure sur 2 (soit une feuille sur deux), puis une mesure sur 3 (soit une feuille sur trois), et nous avons comparé ces trois façons de mesurer, afin de savoir s'il est nécessaire de mesurer toutes les feuilles des plants pour prendre en compte cette hétérogénéité.



Un test de Kruskal-Wallis entre ces 3 modalités révèle une p-value=0,911 (pas d'ANOVA car les résidus ne sont pas normaux).

On peut donc mesurer la chlorophylle sur les rameaux des individus en terre calcaire à une feuille sur trois, sans problème de représentativité des moyennes par individu.

Annexe 7 : Test de la variabilité de la mesure au Dualex en fonction de la zone de mesure au sein d'une feuille sur plusieurs feuilles d'intensité chlorosante différentes

Un test de la variabilité des mesures a été réalisé. Pour cela, nous avons choisi 4 zones de mesure dans lesquelles nous avons mesuré 10 fois la chlorophylle à l'aide du dualex sur une seule feuille, soit 40 mesures. Ces 40 mesures ont été effectuées sur 4 feuilles d'intensité chlorosante différente. On cherche à savoir si la zone de mesure a un effet significatif sur la valeur finale de chlorophylle.



Figure 1: Photo des feuilles mesurées et présentation des localisations des différentes zones de mesures sur ce feuilles

L'ANOVA (analyse de variance) à 2 facteurs sur l'intensité de la chlorose et la zone de mesure nous montre ces résultats, avec une distribution des résidus normale et homoscedastique:

	Sum square	% des sum square	Pr (>F)
Zone de mesure	92,3	1,8	$< 2,2.10^{-16}$ ***
Niveau de chlorose	4714,1	93,3	$< 2,2.10^{-16}$ ***
Zone de mesure : Niveau de chlorose	168,6	3,3	$< 2,2.10^{-16}$ ***
Résidus	78,6	1,6	

Les deux facteurs semblent donc statistiquement significatifs, mais le facteur « point de mesure » ne représente que 1,8% de la variabilité totale de l'expérience. Bien qu'il soit significatif, ce facteur semble donc négligeable devant le niveau de chlorose des feuilles pour la suite de l'expérience.

Annexe 8 : Test de l'effet des deux blocs haut et bas sur l'échantillon des plants 2018, et test de l'effet des 4 blocs (haut/bas, bassin 2/bassin 3) sur l'échantillons des plants 2019.*

Plants 2018

Plants 2019

Variable	Date	Sol	Type de test	P-Value	% du sum square facteur "bloc" par rapport au sum square total
Longueur	2018	Témoin	ANOVA	0,73	0
		Calcaire	ANOVA	0,67	0
	15-mai	Témoin	ANOVA	0,99	0
		Calcaire	ANOVA	0,41	1
	04/06/19	Témoin	ANOVA	0,44	0
		Calcaire	ANOVA	0,53	0
	18-juin	Témoin	ANOVA	0,26	1
		Calcaire	ANOVA	0,34	1
	03-juil	Témoin	ANOVA	0,002**	7
		Calcaire	ANOVA	0,24	1
	15-juil	Témoin	ANOVA	0,0001***	11
		Calcaire	KW test	0,23	
	01-août	Témoin	ANOVA	0,00075***	9
		Calcaire	ANOVA	0,31	1
	14-août	Témoin	ANOVA	0,0012**	8
Calcaire		KW test	0,18		
Chlorophylle	15-mai	Témoin	ANOVA	0,00083***	8
		Calcaire	ANOVA	0,0008***	8
	23/05/19	Témoin	ANOVA	0,93	0
		Calcaire	KW test	0,86	
	06-juin	Témoin	ANOVA	0,017*	4
		Calcaire	ANOVA	0,5	0
	17-juin	Témoin	KW test	6,92e-07***	
		Calcaire	ANOVA	0,57	0
	03-juil	Témoin	ANOVA	0,001**	8
		Calcaire	KW test	0,69	
	12-juil	Témoin	ANOVA	0,00085***	8
		Calcaire	KW test	0,22	
	24-juil	Témoin	ANOVA	0,89	0
		Calcaire	ANOVA	0,44	1
	07-août	Témoin	ANOVA	3,81e-08***	25
Calcaire		ANOVA	0,0006***	10	
Pouget	15-mai	Calcaire	ANOVA	0,52	0
		07/06/19	Calcaire	ANOVA	0,48
	03-juil	Calcaire	ANOVA	0,85	0
		01-août	Calcaire	KW test	0,3
	14-août	Calcaire	KW test	0,44	

Variable	Date	Sol	Type de test	P-Value	% du sum square facteur "bloc" par rapport au sum square total
Longueur	03-juil	Témoin	ANOVA	0,61	1
		Calcaire	ANOVA	0,58	1
	23-juil	Témoin	ANOVA	0,98	0
		Calcaire	ANOVA	0,29	3
	06/08/19	Témoin	ANOVA	0,86	1
		Calcaire	ANOVA	0,3	2
	23-août	Témoin	ANOVA	0,31	2
		Calcaire	ANOVA	0,23	3
	06-sept	Témoin	ANOVA	0,57	1
		Calcaire	ANOVA	0,27	3
Chlorophylle	09-juil	Témoin	ANOVA	0,45	2
		Calcaire	ANOVA	0,05	5
	22/07/19	Témoin	ANOVA	8e-11***	29
		Calcaire	ANOVA	2e-05***	15
	05-août	Témoin	KW test	7e-07***	
		Calcaire	ANOVA	0,42	2
	15-août	Témoin	ANOVA	0,01*	10
		Calcaire	KW test	0,0008***	
05-sept	Témoin	ANOVA	8e-07***	19	
	Calcaire	ANOVA	0,29	2	
Pouget	03-juil	Calcaire	ANOVA	0,46	2
		24/07/19	Calcaire	ANOVA	0,1
	06-août	Calcaire	KW test	0,36	
		09-sept	Calcaire	ANOVA	0,17

*Les p-value en rouge sont significatives et celles en vertes ne le sont pas

Moyenne des variables par bloc et par sol, pour les dates significatives des deux lots**

Lot	Sol	Bloc	Moyennes pour les dates significatives									
			Longueur_030719	Longueur_150719	Longueur_010819	Longueur_140819	Chl_150519	Chl_060619	Chl_170619	Chl_030719	Chl_120719	Chl_070819
Plants 2018	calcaire	b1bas	38,3	46,9	58,0	62,3	8,2	8,2	8,2	10,9	11,2	12,3
		b1haut	42,7	52,4	63,2	69,1	6,6	8,6	7,9	11,5	12,1	15,4
		Delta bas-haut	-4,3	-5,5	-5,1	-6,7	1,6	-0,4	0,3	-0,6	-1,0	-3,1
	temoin	b1bas	79,7	88,5	96,0	98,2	13,4	22,2	22,6	24,0	23,2	22,9
		b1haut	73,2	79,0	86,2	88,2	12,1	23,4	19,7	22,5	21,8	26,0
		Delta bas-haut	6,4	9,4	9,9	10,0	1,3	-1,2	3,0	1,5	1,4	-3,1

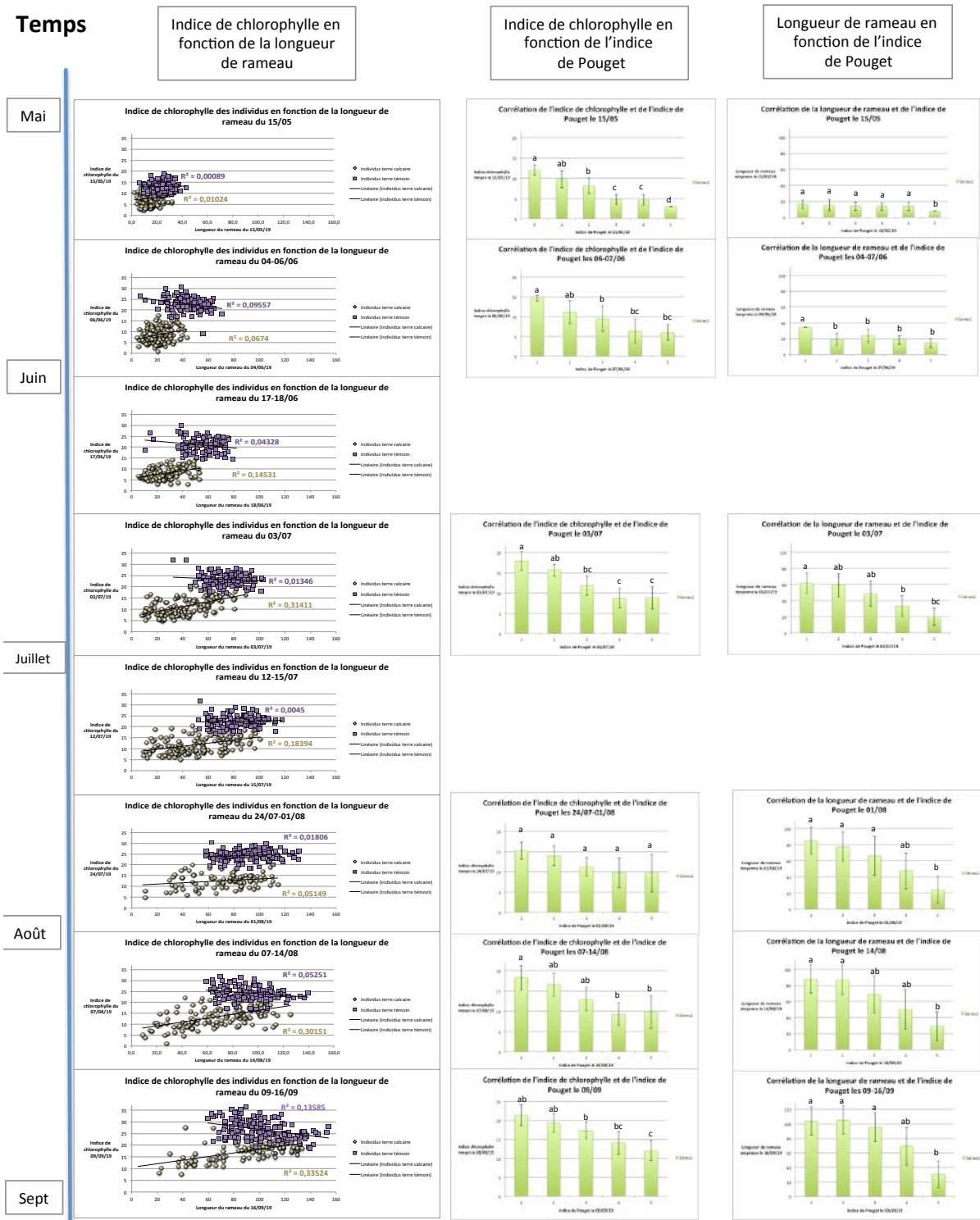
Lot	Sol	Bloc	Moyennes pour les dates significatives			
			Chl_220719	Chl_050819	Chl_150819	Chl_050919
Plants 2019	calcaire	Total	14,4	13,8	15,1	17,2
		b2bas	14,6	14,4	15,4	17,1
		b2haut	17,5	13,4	12,6	16,2
		b3bas	12,8	13,0	17,2	17,1
	temoin	b3haut	13,9	14,2	15,6	17,9
		Total	22,8	27,0	32,6	28,8
		b2bas	25,2	29,4	34,0	27,0
		b2haut	24,5	29,1	33,9	25,6
	b3bas	20,7	25,0	30,1	30,6	
	b3haut	21,5	25,7	31,2	30,6	

b1=bassin1, b2=bassin 2, b3=bassin 3.

**Les valeurs en rouges sont les moyennes pour lesquelles il y a un écart significatif des blocs entre eux

Annexe 9 : Corrélations des différentes variables entre elles pour le lot 2018, en fonction du temps

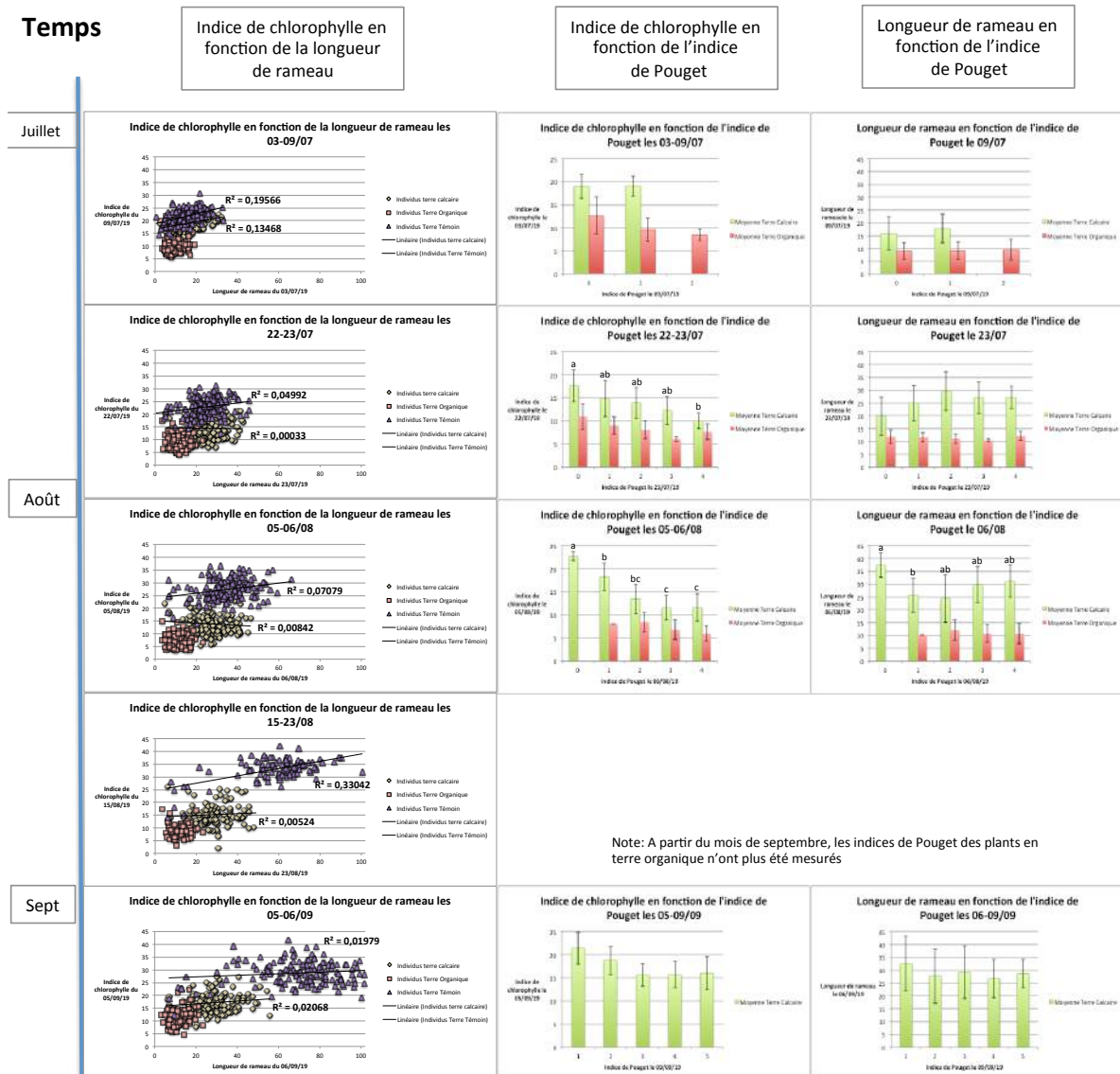
Temps



Corrélations entre les valeurs mesurées au cours du temps pour les plants 2018

Annexe 10 : Corrélations des différentes variables entre elles pour le lot 2019, en fonction du temps

Temps



Note: A partir du mois de septembre, les indices de Pouget des plants en terre organique n'ont plus été mesurés

Corrélations entre les valeurs mesurées au cours du temps pour les plants 2019

Annexe 11 : Tableau de synthèse des connaissances actuelles sur caractéristiques des porte-greffes utilisés (source : Elisa MARGUERIT, INRA Bordeaux)

Tableau 1 : Description des porte-greffes utilisés dans l'étude. Adapté à partir du catalogue des vignes cultivées en France, 2015 ; du catalogue de l'University of California : Integrated Viticulture, 2015 ; du Registro Nazionale Delle Varietà di Vite, 2015 ; Galet, 1988; Kocsis & Varga, 2009 ; Riaz et al. 2019.

Porte-greffe	Croisement	Tolérance à la sécheresse	Vigueur conférée	Tolérance à la chlorose (IPC maximal)	Tolérance au phylloxera
101-14 MGt	<i>Vitis riparia</i> × <i>V. rupestris</i>	Faible	Faible	IPC = 10 (<9% Calcaire actif)	Très bonne
1045 P	<i>V. berlandieri</i> Ressaiguier n°2 × <i>V. rupestris</i> du Lot	-	-	Moyen	Bonne
106-8 MGt	<i>V. riparia</i> × (<i>V. cordifolia</i> × <i>V. rupestris cordifolia</i> N°1 Grasset)	Bonne	Faible	Faible	Elevée
1103 P	<i>V. berlandieri</i> cv. Ressaiguier n°2 × <i>V. rupestris</i> cv Lot	Bonne	Elevée	IPC=30(<13% Calcaire actif)	Elevée
110 R	<i>V. berlandieri</i> cv. Boutin B × <i>V. rupestris</i> cv. Martin	Très bonne	Elevée	IPC=30(<17% Calcaire actif)	Très bonne
125-1 MGt	<i>V. cordifolia</i> × <i>V. riparia</i>	Très bonne	-	Faible	Très élevée
Kober 125-AA	<i>V. berlandieri</i> Ressaiguier 2x <i>V. riparia</i> Gloire de Montpellier	-	Moyenne à élevée	< 13% calcaire actif	Elevée
140 Ru	<i>V. berlandieri</i> cv. Boutin B × <i>V. rupestris</i> cv Lot	Elevée	Elevée	IPC=90(<20% Calcaire actif)	Très bonne
1447 P	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. rupestris</i> cv. Martin	Bonne	Forte	< 17% calcaire actif	Elevée
150-15 Malègue	<i>V. berlandieri</i> Malègue n°6 × (<i>V. vinifera</i> Aramon × <i>V. rupestris</i> Ganzin n°1)	Bonne	Moyenne	<15% calcaire actif	Moyenne
157-11 C	<i>V. berlandieri</i> Las Sorres × <i>V. riparia</i> cv. Gloire de Montpellier	Faible	Moyenne	Moins résistant à la chlorose que le 161-49C	Moyenne
161-49 C	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. riparia</i> ×	Moyenne à Bonne	Moyenne	IPC=50(<25% Calcaire actif)	Elevée
1616 C	<i>V. acerifolia</i> × <i>V. riparia</i>	Moyenne	Faible	< 11 % calcaire actif	Elevée
196-17 Cl	1203 Couderc (<i>V. vinifera</i> × <i>V. rupestris</i>) × <i>V. riparia</i> cv Gloire de Montpellier	Très bonne	Elevée	IPC=5(<6% Calcaire actif)	Moyenne
216-3 Cl	1616 Couderc × <i>V. rupestris</i> cv. Lot	Bonne	Forte	<10% calcaire actif	Élevée
225 Ru	<i>V. berlandieri</i> Ressaiguier 2x <i>V. riparia</i> Gloire de Montpellier	-	-	-	-
3309 C	<i>V. riparia</i> cv Tomenteux × <i>V. rupestris</i>	Faible	Faible/ Moyenne	IPC=10(<11% Calcaire actif)	Elevée
333 EM	<i>V. vinifera</i> cv Cabernet Sauvignon × <i>V. berlandieri</i>	Elevée	Elevée	IPC=70(<40% Calcaire actif)	Moyenne à élevée
34 EM	<i>V. berlandieri</i> cv Ecole × <i>V. riparia</i>	Faible	Moyenne	IPC=40(<20% Calcaire actif)	Élevée
4010 Cl	<i>V. riparia</i> cv. Grand glabre × Aramon Rupestris Ganzin n° 1	Moyenne	Assez forte	< 6 % calcaire actif	Moyenne
41 B MGt	<i>V. vinifera</i> cv Chasselas B × <i>V. berlandieri</i>	Moyenne	Moyenne à élevée	IPC=60(<40% Calcaire actif)	Moyenne à élevée
420 A MGt	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. riparia</i>	Moyenne	Faible	IPC=40(<20% Calcaire actif)	Elevée
44-53 M	<i>V. riparia</i> cv. Grand Glabre × 144 Malègue (<i>V. cordifolia</i> × <i>V. rupestris</i>)	Très bonne	Faible à Moyenne	IPC=10(<10% Calcaire actif)	Très bonne
57 R	<i>V. berlandieri</i> cv. Boutin B × <i>V. rupestris</i> Martin	Bonne	Faible	< 15 % calcaire actif	-
Kober 5 BB	<i>V. berlandieri</i> Ressaiguier 2x <i>V. riparia</i> Gloire de Montpellier	Faible	Elevée	IPC=40(<20% Calcaire actif)	Élevée
775 P	<i>V. berlandieri</i> cv. Ressaiguier N°2 × <i>V. rupestris</i> cv. Lot	Très bonne	-	<20% calcaire actif	-
779 P	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. rupestris</i> cv. Lot	-	-	<20% calcaire actif	Très bonne
99 R	<i>V. berlandieri</i> cv. Ressaiguier N°2 × <i>V. rupestris</i> cv. Lot	Moyenne à élevée	Elevée	IPC=20(<14% Calcaire actif)	Elevée
BC2	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. vinifera</i> cv. Ugni blanc B	-	-	< 40% calcaire actif	Moyenne à élevée
Binova	Mutation du SO4	-	-	-	-

Porte-greffe	Croisement	Tolérance à la sécheresse	Vigueur conférée	Tolérance à la chlorose (IPC maximal)	Tolérance au phylloxera
Borner	<i>V. riparia</i> 183 G × <i>V. cinerea</i> Arnold	Bonne	-	-	Elevée
Dog Ridge	<i>V. champinii</i>	Moyenne	Elevée	<60% calcaire total	Moyenne
Evex 13-3	Pollinisation libre de <i>V. berlandieri</i> Ressaiguier n°2	-	-	-	-
Evex 13-5	Pollinisation libre de <i>V. berlandieri</i> Ressaiguier n°2	-	-	-	-
Fercal	Berlandieri Colombar n° 1 (<i>V. berlandieri</i> × <i>V. vinifera</i> cv Ugni blanc B × 31 Richter (<i>V. berlandieri</i> cv Ressaiguier n°2 × <i>V. longii</i> cv Novo-mexicana)	Moyenne à bonne	Moyenne à élevée	IPC=120(<60% Calcaire actif)	Elevée
Freedom	1613C OP Seedling × <i>V. champinii</i>	Moyenne	Elevée	Moyenne	Faible
Georgikon 121	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. riparia</i> × <i>V. rupestris</i>	Bonne	Elevée	-	-
Georgikon 251	Georgikon 28 × Borner	-	Très élevée	-	-
Georgikon 28	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. vinifera</i> pollen mixture	Elevée	-	Elevée	Bonne
Gravesac	161-49 Couderc × 3309 Couderc	Moyenne	Moyenne à élevée	IPC=5(<6% Calcaire actif)	Elevée
Harmony	1613C OP Seedling × Dog Ridge OP Seedling	Faible à Moyenne	-	-	-
M1	(<i>V. riparia</i> × (<i>V. cordifolia</i> × <i>V. rupestris</i>)) × Ressaiguier n°4 (<i>V. berlandieri</i>)	Elevée	Très élevée	Très élevée	Elevée
M3	(<i>V. berlandieri</i> × <i>V. riparia</i> × Teleki 5C (<i>V. berlandieri</i> × <i>V. riparia</i>))	Très élevée	Très élevée	Moyenne	Elevée
M4	41B (<i>V. vinifera</i> × <i>V. berlandieri</i>) × <i>V. berlandieri</i> Ressaiguier n. 1	Très élevée	Très élevée	Moyenne	Elevée
Nemadex Alain Bouquet	Hybride F1 (VMH877) de <i>V. vinifera</i> (Cabernet Sauvignon × Alicante Henri Bouschet) × <i>Muscadinia rotundifolia</i> (NC184-4) × 140 Ruggeri	Faible	Faible	IPC=30(<15% Calcaire actif)	Très élevée
Ramsey Ou Salt Creek	Natural cross <i>V. champinii</i>	Bonne (WRITING, 2012) Faible (GALET, 1988)	-	-	-
Riparia Gloire de Montpellier	Sélection de <i>V. riparia</i> Michaux	Très faible	Très faible	IPC=5(<6% Calcaire actif)	Très élevée
RSB1	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. riparia</i> provenant d'Euryale Ressaiguier	Bonne	Elevée	IPC=50(<20% Calcaire actif)	Elevée
Rupestris du Lot	Sélection de <i>V. rupestris</i> Scheele	Moyenne	Elevée	IPC=20(<14% Calcaire actif)	Bonne
Schwarzmann	<i>V. rupestris</i> × <i>V. riparia</i> Gloire de Montpellier -	Bonne	Bonne	-	-
SO4	<i>V. berlandieri</i> Ressaiguier 2x <i>V. riparia</i> Gloire de Montpellier	Moyenne à bonne	Forte (surtout les 15 premières années)	IPC=30(<17% Calcaire actif)	Elevée
Teleki 5C	<i>V. berlandieri</i> Ressaiguier 2x <i>V. riparia</i> Gloire de Montpellier	Faible	Elevée	20% calcaire actif	Elevée
Teleki 8B	<i>V. berlandieri</i> Ressaiguier 2x <i>V. riparia</i> Gloire de Montpellier	Bonne	Moyenne	17% calcaire actif	Elevée
Vialla	<i>V. labrusca</i> × <i>V. riparia</i>	Faible	Forte	IPC=2(<4% Calcaire actif)	Faible à moyenne
Vivet 15	<i>V. berlandieri</i> × <i>V. rupestris</i>	Bonne	-	-	-

Vert : Les 6 porte-greffes les plus utilisés en France
Jaune : Porte-greffes issus de l'étranger

Caractérisation de l'adaptation aux sols chlorosants des porte-greffes de vigne.

Résumé : *La chlorose est une carence en fer complexe induite par les sols calcaires, difficile à corriger, très étudiée au cours de l'histoire des sciences de la vigne. De nombreux facteurs influencent cette tolérance et le choix du porte-greffe semble être le plus important après le choix du sol, avec l'avantage de ne pas être limité dans l'espace. L'objectif de cette étude est de chercher à phénotyper ou caractériser la tolérance à la chlorose de certains porte-greffes en sol calcaire, puis de trouver des tolérances intéressantes chez certains porte-greffes issus de l'étranger, ou encore non caractérisés. Pour cela, un panel de 52 porte-greffes a été greffé sur Pinot noir et cultivé en pot sur 2 années, avec 2 modalités de sols : « témoin » et « calcaire ». Des variables de croissance, de chlorophylle, de réserves et de symptômes visuels ont été mesurées. Ces variables semblent caractériser plus finement les tolérances des plants et permettent de retenir certains porte-greffes issus de l'étranger comme le Georgikon121, le 57R et le M2, ainsi que le BC2 qui n'a jamais été pu être caractérisé dans les classifications précédentes. Ces résultats permettent de valider l'efficacité relative d'un tel dispositif afin de caractériser simultanément plusieurs porte-greffes en conditions contrôlées pour leur tolérance tout en affinant les classements et seuils potentiels à l'avenir.*

Mot-clés : *Chlorose, Vigne, Porte-greffe, Fer, Physiologie, Sol, Calcaire,*

Characterization of responses of grapevine rootstocks to chlorotic soils.

Abstract : *The chlorosis is an iron deficiency induced by limestone soils, hard to cure and that has been studied a lot during the history of grapevine sciences. Several factors can influence this tolerance and the choice of the rootstock seems to be the most important behind the choice of the soil, having the additional advantage not to be restricted in space. The goal of this experiment is to seek to phenotype or characterize the chlorosis tolerance of some rootstocks in limestone soil, then to find in some rootstocks from abroad or poorly characterized interesting chlorosis tolerance. To reach this goal, a range of 52 rootstocks has been grafted with Pinot noir and cultivated in pots for 2 years, with 2 soil modalities : « controlled » and « limestone ». Growth, chlorophyll, stocks and visual symptoms have been measured. Those variables seem to characterized with more details the plants tolerances and allow to withhold some rootstocks from abroad as Georgikon121, 57R and M2, as well as BC2 that has never been characterized in previous ranking. These results allow also to confirm the relative efficiency of such an experiment in order to characterize simultaneously several rootstocks in controlled conditions for their tolerance and fine-tune the rankings and potential thresholds in the future.*

Keywords: *Chlorosis, Grapevine, Rootstock, Iron, Physiology, Soil, Limestone*