



HAL
open science

Traitement alternatif contre *Plasmopara viticola* en viticulture biodynamique : Huile essentielle d'origan

Malo Marcel

► To cite this version:

Malo Marcel. Traitement alternatif contre *Plasmopara viticola* en viticulture biodynamique : Huile essentielle d'origan. Agronomie. 2021. dumas-03794266

HAL Id: dumas-03794266

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03794266>

Submitted on 3 Oct 2022

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

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



Mémoire de fin d'études

**Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome
Option Viticulture - Œnologie**

Traitement alternatif contre *Plasmopara viticola* en viticulture biodynamique : Huile essentielle d'origan



Par Malo MARCEL

Année de soutenance : 2021

Organisme d'accueil : Château Palmer

Mémoire de fin d'études

**Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome
Option Viticulture – Œnologie**

Traitement alternatif contre *Plasmopara viticola* en viticulture biodynamique : Huile essentielle d'origan



par Malo MARCEL

Année de soutenance : 2021

**Mémoire préparé sous la direction de :
Elsa BALLINI**

Présenté le : 08/11/2021

Devant le jury :

Elsa BALLINI

Véronique MARIE-JEANNE

Organisme d'accueil : Château Palmer

**CHÂTEAU
PALMER**

•

Maître de stage : Oriane HEUILLET

RESUME

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de vérifier l'efficacité de l'huile essentielle d'origan pour diminuer les doses de cuivres utilisées dans la lutte contre l'oomycète *Plasmopara viticola*. Cette expérimentation s'est déroulée dans le vignoble de Château Palmer, 3^{ème} Grand Cru Classé de l'AOC Margaux. Elle fait suite à une étude lancée en 2019. Cette année, un des aspects était le passage à une échelle dite « industrielle », c'est-à-dire sur une surface plus étendue, nécessitant l'utilisation de tracteurs pulvérisateurs pour les traitements.

Concernant les conditions climatiques du millésime 2021, celles-ci furent humides pendant le Printemps, avec des températures moyennes avoisinant les 17°C. L'association d'une humidité régulière avec des températures douces a créé un climat favorable au développement et à la croissance du mildiou. Celui-ci a montré ses premiers signes d'apparition à la mi-Mai, ce qui est tardif par rapport aux millésimes précédents, mais sa croissance a été continue jusqu'aux vendanges. La vague de gelée noire n'a pas épargné l'AOC Margaux, mais les parcelles expérimentales n'ont heureusement pas été touchées. D'un point de vue phénologique, le millésime a été un peu plus tardif que les précédents à cause de cette période gélive et de l'humidité régulière et l'absence de températures suffisamment hautes pendant la période végétative.

Trois parcelles ont été sélectionnées pour mener cette expérimentation, dans un ilot planté en Merlot et Cabernet Sauvignon. Les modalités de traitements de l'étude étaient au nombre de trois : un témoin non traité, le traitement traditionnel de la propriété et un traitement associant cuivre et huile essentielle d'origan en application préventive jusqu'à la floraison. Les huiles essentielles sont connues pour leurs actions antifongiques, antibactériennes et antivirales.

Cette alternative pourrait ralentir l'usage abusif des produits cupriques en agriculture biologique et biodynamique, et mener à une viticulture plus durable et responsable de ses sols. Les résultats sont d'autant plus intéressants que le millésime 2021 se prête bien à l'étude du mildiou. De nombreuses voies d'amélioration ont émergé de cette expérimentation, notamment la méthode d'application des huiles et sont timing, la compréhension des interactions entre l'huile essentielle, la plante et le pathogène... C'est cette recherche d'un équilibre avec son environnement qui motive tous les ans Château Palmer à poursuivre des expérimentations pour trouver des solutions durables aux déséquilibres observés à la vigne.

Mots clés

Oomycète, *Plasmopara viticola*, mildiou, huile essentielle, biodynamie, cuivre, AOC Margaux, Médoc, origan, *Origanum compactum*

Pour citer ce document : MARCEL, Malo, 2021. Traitement alternatif contre *Plasmopara viticola* en viticulture biodynamique : Huile essentielle d'origan. Mémoire d'Ingénieur Agronome, option Viticulture-Œnologie, Institut Agro | Montpellier SupAgro, 56 p.

ABSTRACT

Title : Alternative treatment against *Plasmopara viticola* in biodynamic viticulture: Oregano essential oil

The objective of the study presented in this thesis is to assess the efficiency of oregano essential oil to reduce the doses of copper used in the treatments against the oomycete *Plasmopara viticola*. This experiment took place in the vineyard of Château Palmer, 3rd Grand Cru Classé of the Margaux AOC. It follows a study launched in 2019. This year, one of the aspects was the transition to an "industrial" scale, i.e. on a larger surface, requiring the use of tractors for treatments.

Regarding the weather conditions of the 2021 vintage, they were wet during spring, with average temperatures around 17°C. The combination of a steady humidity and mild temperatures created a suitable environment for the development and growth of downy mildew. It showed its first signs of appearance mid-May, which is late compared to previous vintages, but its growth was constant until harvest. The black frost wave did not spare the Margaux AOC, but fortunately the experimental plots were not affected. From a phenological point of view, the vintage was a little late compared to the previous ones because of this frosty period and the regular humidity and lack of sufficiently high temperatures during the vegetative period.

Three plots were selected to conduct this experiment, in an area planted with Merlot and Cabernet Sauvignon. The treatment modalities of the study were three: an untreated control, the traditional treatment of the property and a treatment combining copper and oregano essential oil in preventive application until flowering. Essential oils are known for their antifungal, antibacterial and antiviral actions.

This alternative could slow down the abusive use of copper-based products in organic and biodynamic agriculture, and lead to a more sustainable and responsible viticulture for its soils. The results are all the more interesting as the 2021 vintage is well suited for the study of downy mildew. Many paths of improvement have emerged from this experimentation, especially the method of application of the oils and their timing, the understanding of the interactions between the essential oil, the plant and the pathogen... It is this search for a balance with its environment that inspires Château Palmer to pursue experimentations year after year to find sustainable solutions to the disorders observed on the vine.

Key words

Oomycete, *Plasmopara viticola*, downy mildew, essential oil, biodynamics, copper, AOC Margaux, Médoc, *Origanum compactum*, oregano

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire est le fruit du concours de nombreuses personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais évidemment remercier l'Equipe de Château Palmer pour m'avoir offert cette possibilité de développer mon expérience professionnelle au sein d'un domaine d'excellence. Merci à Monsieur Thomas Duroux et Madame Sabrina Pernet pour m'avoir accordé leur confiance et m'avoir accepté au sein de l'équipe du Millésime 2021.

A Oriane Heuillet, ma maîtresse de stage, pour m'avoir écouté, conseillé et supporté au quotidien pendant ce stage, pour m'avoir partagé sa passion de la vigne et m'avoir enseigné les principes de la biodynamie, merci.

A Vincent Jaraudias et l'équipe des tractoristes, Julien, Yannick, Thomas, Gabriel, Romain et plus particulièrement David et Gaétan pour leur aide, leur implication et leur motivation tout au long de la saison, un grand merci.

Merci à Alba Sanchez et toutes les équipes de vigneronnes pour leurs observations, commentaires et travail acharné malgré un millésime compliqué. Les nuits de combat contre le gel avec vous resteront un souvenir inoubliable.

Je souhaite également remercier Olivier Campadiou et Hervé Klébanowski pour leur supervision au chai et leur envie permanente de nous aider et de nous apprendre l'excellence. Un grand merci aux ouvriers de chai, Mathis, Pablo et Nicolas pour avoir rendu les journées de travail intense infiniment plus supportables et intéressantes.

J'aimerais remercier Elsa BALLINI pour m'avoir encadré et recadré quand nécessaire par ses conseils toujours précis et bienveillants. Je pense également à tous les professeurs de la formation Viti-Ceno de Montpellier SupAgro pour m'avoir enseigné et transmis leur passion de la vigne et du vin.

A mes collègues, colocataires et amis stagiaires, Cassandre, Clara, Elisa, Lucie, Ivo et Louis, merci de m'avoir supporté pendant tout ce temps, d'avoir gardé votre bonne humeur en toute circonstance et d'avoir transformé cette fameuse maison des stagiaires en véritable foyer le temps de ces quelques mois.

A tous les stagiaires des châteaux voisins, avec qui nous avons pu échanger et profiter de cette période particulière, merci beaucoup.

Mention spéciale pour Mathis en qui j'ai trouvé un véritable ami. Je te souhaite toute la réussite possible dans tes projets futurs.

Enfin, je ne remercierai jamais assez mes parents, ma famille et tous mes amis pour m'avoir soutenu et poussé vers la réussite depuis le début de mes études.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

I.	Etat de l'art.....	2
1.1	Présentation de <i>Plasmopara viticola</i>	2
1.1.1	Cycle de vie et conditions favorables	2
1.1.2	Symptômes.....	3
1.1.3	Nocivité et dégâts.....	5
1.2	Les produits phytosanitaires et le cuivre pour lutter contre <i>Plasmopara viticola</i>	5
1.3	Le cuivre dans le sol : accumulation, disponibilité et situation européenne	6
1.4	La biodynamie en viticulture	8
1.5	Le cuivre en viticulture biologique, biodynamique et à Château Palmer.....	9
1.6	Les huiles essentielles pour la réduction de l'utilisation du cuivre	11
1.7	Système immunitaire et système de défense de la vigne.....	12
II.	Matériel et méthode	13
2.1	Site expérimental	13
2.2	Mise en place expérimentale	15
2.3	Protocole et calendrier de traitement	16
2.3.1	Protocole de traitement	16
2.3.2	Calendrier de traitements	17
2.4	Données climatiques.....	17
2.5	État hydrique / azoté des parcelles	17
2.6	Evaluation de l'apparition de mildiou / protocole de comptage.....	17
2.7	Fréquence d'attaque, Intensité d'attaque, cinétique	18
2.8	Analyse statistique des données	18
III.	Résultats.....	19
3.1	Données climatiques, statuts hydrique et azoté	19
3.1.1	Données climatiques	19
3.1.2	Statut hydrique	20
3.1.3	Statut azoté.....	21
3.2	Résultats des données sur feuilles	22
3.2.1	Par cépage	22
3.2.2	Entre cépages	24
3.3	Résultats des données sur grappes.....	25
3.3.1	Par cépage	25
3.3.2	Entre cépages	27
3.4	Résultats de la cinétique d'attaque	28
IV.	Analyse des résultats.....	29

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Cycle de vie de <i>Plasmopara viticola</i> (Buonassisi et al., 2017)	2
Figure 2 Mildiou sur un nœud après contamination par les feuilles (source : DPIRD, 2020) ..	4
Figure 3 Ci-dessus : pourriture grise sur une inflorescence ; ci-contre : pourriture brune sur grappe à la nouaison (source personnelle)	5
Figure 4 Ventes de pesticides des 5 premiers pays consommateurs entre 2011 et 2018 (en kilogrammes vendus/an) (Source site : Eurostat, Pesticide purchase, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/aei_fm_salpest09/default/table?lang=en).....	6
Figure 5 Localisation des parcelles expérimentales, du château et de la station météo de Margaux (source personnelle)	14
Figure 6 Focus de la carte NDVI sur les parcelles 18, 19 et 20 (source : Château Palmer, Sovivins, 2021).....	15
Figure 7 Organisation spatiale des modalités de traitement et des placettes de comptage sur les parcelles expérimentales (source personnelle).	16
Figure 8 Diagramme ombrothermique décadaire de la station météo de Margaux (source : Château Palmer, 2021).	19
Figure 9 Fréquences d'attaques théoriques (%) de mildiou des millésimes 2018 à 2021 (source : Château Palmer, 2021).	20
Figure 10 Analyse en box plots des valeurs de potentiel hydrique. Les lettres correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.....	20
Figure 11 Analyse en box plots des valeurs de N-tester. Les lettres correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	21
Figure 12 Résultats des fréquences d'attaques sur feuilles des modalités plantées en merlot pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	22
Figure 13 Résultats des intensités d'attaques sur feuilles des modalités plantées en merlot pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	23
Figure 14 Résultats des fréquences d'attaques sur feuilles de toutes les modalités confondues pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	24
Figure 15 Résultats des intensités d'attaques sur feuilles de toutes les modalités confondues pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	25
Figure 16 Résultats des fréquences d'attaques sur grappes des modalités plantées en merlot pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	26
Figure 17 Résultats des intensités d'attaques sur grappes des modalités plantées en merlot pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	26
Figure 18 Résultats des fréquences d'attaques sur grappes de toutes les modalités confondues pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	27
Figure 19 Résultats des intensités d'attaques sur grappes de toutes les modalités confondues pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.	28

INTRODUCTION

Château Palmer est situé dans la commune d'Issan, voisine de la commune de Margaux. Le parcellaire de Château Palmer est intégralement intégré dans l'Appellation d'Origine Contrôlée de Margaux. Son histoire viti-vinicole débute au 18^{ème} siècle. S'appelant alors Château Gascq et regroupant 50 hectares de vignes, il fut ensuite acheté par le Lieutenant-Colonel Charles Palmer et en emprunta le nom en 1814. En 1855, il obtient le titre de 3^{ème} Grand Cru Classé par la Classification Officielle des Vins de Bordeaux. Profitant de la crise économique de 1929, les familles de négociants bordelais Sichel, Ginestet, Mialhe et Mähler-Besse prennent le contrôle de la propriété et forment la Société Civile de Château Palmer. Les familles Sichel et Mähler-Besse sont aujourd'hui les actionnaires majoritaires. En 2004, le directeur général et la directrice technique actuels sont nommés, respectivement Monsieur Thomas DUROUX et Madame Sabrina PERNET.

Le cadastre actuel du château regroupe 67 hectares de vignes représentés par 3 cépages typiques du bordelais : Cabernet Sauvignon et Merlot à hauteur de 47% chacun et le Petit Verdot sur les 6% restants. Le domaine produit 2 vins rouges en appellation à partir de ces vignes :

- Le « Grand Vin Palmer », issu des meilleures parcelles, avec un potentiel de vieillissement long ;
- « Alter Ego », le second vin, dont l'objectif est d'atteindre son potentiel de dégustation plus rapidement que le premier vin.

Le millésime 2008 marque le début de la conversion des pratiques viticoles vers une agriculture plus respectueuse de l'environnement avec les premiers essais en biodynamie. La certification Demeter est obtenue pour l'ensemble du vignoble en 2013. Cette transition fait de Château Palmer une propriété pionnière de la biodynamie dans le Médoc.

La viticulture biodynamique s'appuie sur les principes de l'agriculture biologique. A ces principes s'ajoutent les aspects holistiques qui cherchent à atteindre un équilibre entre des forces terrestres et cosmiques par des actions adaptées de l'homme. L'objectif premier de ce système agricole est le respect de l'environnement et la recherche d'une auto-régulation de ce dernier par la compréhension des déséquilibres, l'augmentation de la biodiversité, le respect des rythmes de la nature et une approche systémique de la vigne et de tout ce qui l'entoure. Dans cette optique, un cheptel de brebis et de vaches est utilisé toute l'année dans la vie du domaine, des arbres fruitiers et des plantes aromatiques sont plantés. Ces dernières permettent l'utilisation de tisanes lors de la saison végétative de la vigne et la période de traitements.

Depuis quelques années, l'accent a été mis sur la réduction des doses de produits utilisés à la vigne, et notamment le cuivre. En effet, la bouillie bordelaise, mélange de cuivre et de soufre, reste à ce jour le moyen le plus performant pour lutter contre le mildiou qui touche de façon récurrente le vignoble bordelais. Seulement, le cuivre, un métal lourd, est reconnu comme nocif pour le sol et sa faune, en raison de sa durabilité et dégradation lente. La recherche de méthodes alternatives pour la protection de la vigne est une priorité pour le Château. Différentes recherches ont été menées avec des résultats variés.

Différentes voies ont été explorées ces dernières années, sur l'utilisation de la musique comme facteur de stimulation des défenses immunitaires de la vigne, la réduction des doses de cuivre et l'utilisation d'huiles essentielles comme complément de traitement. L'étude présentée dans ce mémoire concerne les huiles essentielles et plus précisément celle d'origan comme traitement préventif à l'oomyète *Plasmopara viticola*. Les huiles essentielles sont reconnues pour leurs effets antifongiques, antibactériens, insecticides et antiviral, du moins en milieu in vitro. L'objectif de cette étude est de vérifier leur efficacité in vivo et à l'échelle des parcelles.

I. ETAT DE L'ART

1.1 PRESENTATION DE *PLASMOPARA VITICOLA*

Plasmopara viticola, communément appelé mildiou, est une maladie cryptogamique endémique des espèces sauvages *Vitis* d'Amérique du Nord. Son apparition en Europe à la fin du 19^{ème} siècle est due à l'utilisation de boutures américaine lors de la crise phylloxérique (Gessler et al., 2011).

Le cycle de vie, symptômes et dégâts sur la vigne seront détaillés dans les paragraphes suivants.

1.1.1 Cycle de vie et conditions favorables

Le mildiou se développe sous conditions climatiques tempérées et humides. *Plasmopara viticola* est un oomycète biotrophe qui attaque les jeunes tissus verts de la vigne (jeunes feuilles, rameaux non lignifiés, vrilles, grappes). Les premiers symptômes apparaissent sous forme de « tache d'huile » à la surface des jeunes feuilles. La sporulation est activée par des conditions atmosphériques connues : humidité supérieure à 92% et des températures allant de 13°C à 20°C. Cette sporulation peut être observée sur tous les tissus verts de la vigne.

L'oomycète traverse l'hiver sous forme d'oospores sexués dans les feuilles et baies tombées au sol. Au printemps, lorsque les températures dépassent 10°C et après des précipitations, il y a germination des oospores puis production de macrosporangies qui développent des zoospores sexués (Buonassisi et al., 2017). Le mildiou reste diploïde aux stades sexuels et asexuel (Rumbou et Gessler, 2004). Suite à l'infection primaire, si les conditions atmosphériques sont favorables, des infections secondaires peuvent avoir lieu selon le même mode opératoire que la primaire (Gessler et al., 2011).

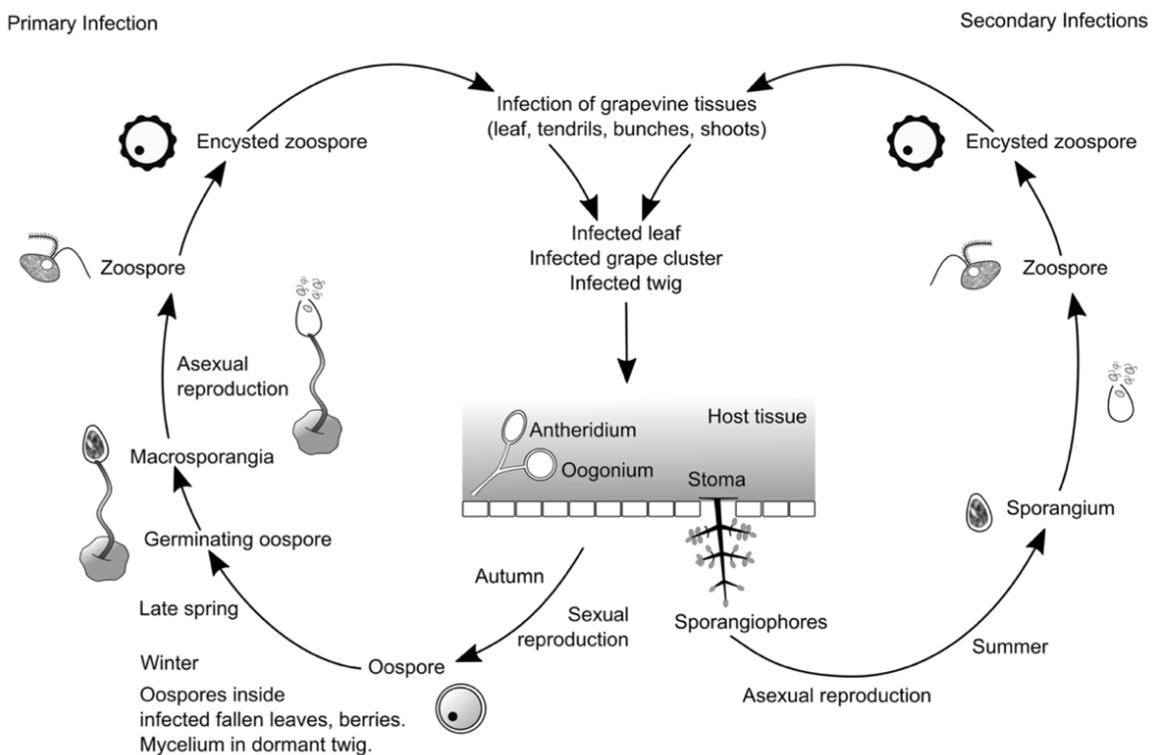


Figure 1 Cycle de vie de *Plasmopara viticola* (Buonassisi et al., 2017)

Le mildiou vit selon des cycles de multiplication asexués pendant la croissance végétative de

la vigne et une phase d'hivernage sexuée. Cet hivernage se fait sous forme d'oospore logé dans les feuilles tombées au sol et d'autres tissus hôtes infectés lors de la saison végétative précédente. Ces oospores sont préférentiellement produites dans des conditions sèches, quand la sporulation est ralentie ou pendant la sénescence de la vigne (Grünzel, 1961). Les oospores matures germent rapidement en présence d'humidité et forment les sporanges (Gessler et al., 2011). Un tube germinatif se forme au printemps et aboutit à la formation d'un macrosporange, ce qui marque la fin du processus de germination.

Le gel et l'humidité favorisent la germination des oospores en fragilisant leurs parois externes. Les formes actives de *Plasmopara viticola* sont les zoospores. Ce sont eux qui sont dispersés en surface des tissus de la vigne par le vent, la pluie, les tracteurs...

L'infection primaire peut arriver à partir du stade 3 feuilles, si les températures minimales moyennes dépassent 10°C et qu'il y a eu 10mm de précipitations les dernières 48h. Les zoospores sont responsables des contaminations secondaires. Ils s'enkystent dans un stomate après migration dans l'eau en surface du tissu attaqué. Il y a formation d'une vésicule substomatale à partir de laquelle le mycélium intracellulaire croît (Gessler et al., 2019).

L'étude du cycle de vie du mildiou et les modèles de simulation s'appuient sur les paramètres de Blaeser (Blaeser, 1978), qui incluent un minimum de 98% d'humidité relative, 4h d'obscurité et une température optimale de 19°C. La sporulation est achevée en 7h. Elle est inhibée par la lumière blanche (Rhumbolz et al., 2002). Les sporanges sont désactivés entre 5h et 7h du matin en général (Kennelly et al., 2007). Les sporangiophores sont expulsés par les stomates puis produisent des zoospores par voie asexuée et marque un cycle de contamination secondaire.

Les contaminations secondaires s'effectuent tout au long de la période végétative selon les conditions atmosphériques explicitées préalablement. En l'absence ITd'opportunité ou de conditions sèches ou chaudes, les lésions conservent généralement leur potentiel de production de sporanges pendant 1 à 2 mois (Kennelly et al., 2007). D'après Caffi et al. (2013), la production de sporanges est élevée les 4 premiers jours puis ralentit jusqu'à un arrêt total de sporulation. L'incubation, durée entre l'infection et l'apparition des premiers symptômes, varie de 5 à 20 jours en fonction de l'organe touché, de la température et de la résistance ontogénique de la plante (Rossi et al., 2013). La période de latence, durée entre l'infection et les premières productions de sporanges, est quant à elle plus courte que l'incubation, avec pour conséquence une sporulation effective avant l'apparition des premiers symptômes visibles (Ash, 2000).

1.1.2 Symptômes

Sur feuilles

Les symptômes foliaires sont les premiers à être visibles à l'œil nu, avec l'apparition d'une poudre blanche (sporangies) sur la face adaxiale lors de la sporulation (Viret et Gindro, 2014) et la naissance des taches d'huile sur la face supérieure. Ce changement de couleur est dû à une baisse de teneur en chlorophylle associée à une synthèse de pigments phénoliques jaunes (Galet, 1977).

En conditions favorables, le mycélium croît en même temps que la feuille. Si la surface foliaire attaquée est trop importante, le limbe chute. En cas de chaleur et sécheresse, la zone touchée se nécrose, ce qui diminue la capacité photosynthétique de la plante.

En fin de période de croissance végétative de la vigne, cette dernière se focalise sur la maturation du raisin. Les feuilles perdent en concentration de nutriments et la résistance des

membranes cellulaires augmente, induisant un ralentissement du développement du mildiou dans les nervures. Les taches d'huile prennent des formes polygonales avec des âges différents et des couleurs différentes, c'est le « mildiou mosaïque ».

Sur rameaux



Les rameaux sont contaminés via les feuilles déjà touchées et les inflorescences environnantes. Les nœuds sont plus riches en eau, les rendant ainsi plus sensibles aux attaques de mildiou. Cela mène à l'affaiblissement de la pousse et augmente le risque de rupture. La croissance des pousses affectées est ralentie, ce qui fait que leur longueur ne dépassera pas 15 cm. Normalement, seules les très jeunes pousses peuvent être infectées, ce qui peut être caractérisé par des fleurs blanchâtres couvrant leur surface (Galet, 1999).

En outre, les pousses attaquées auront une vigueur beaucoup plus faible et peuvent affecter négativement la lignification de la pousse. Par conséquent, cela affectera la production de l'année suivante, ce qui affectera grandement la durabilité de la vigne au fil des années (Ephytia, 2016).

Figure 2 Mildiou sur un nœud après contamination par les feuilles (source : DPIRD, 2020)

Sur fleurs et grappes

Le stade de l'évolution influence fortement la sensibilité des inflorescences et des grappes à l'infection par *Plasmopara viticola*. Si l'infection se produit avant ou pendant la floraison, l'inflorescence jaunit, se recroqueville et même se dessèche. Dans les cas les plus bénins, la sporulation à la surface des jeunes baies entraîne l'apparition d'une poudre blanche, appelée pourriture grise. Certaines études ont souligné que la pourriture grise pourrait être le résultat d'une infection précoce des inflorescences, ce qui suggère que le mildiou pourrait avoir une action partiellement systémique (Gindro et al., 2012). Au fur et à mesure de la croissance, les baies infectées se dessèchent et deviennent brunes, ce que l'on appelle la pourriture brune (Figure 3). Cependant, une fois la véraison passée, le mildiou ne peut plus attaquer les raisins (Gallet, 1999). Mais ce n'est pas le cas pour les feuilles, car les infections peuvent se produire pendant toute la saison de croissance car elles dépendent largement des conditions climatiques de la saison.



Figure 3 Ci-dessus : pourriture grise sur une inflorescence ; ci-contre : pourriture brune sur grappe à la nouaison (source personnelle)

1.1.3 Nocivité et dégâts

Comme il est très dépendant de l'environnement, de nombreux cycles d'infection peuvent se produire, ce qui peut sérieusement affecter et réduire le rendement final et la qualité du raisin. Selon les études, en l'absence de traitements, et avec des conditions climatiques favorables, le mildiou peut dévaster jusqu'à 75% de la récolte en une saison et affaiblir les pousses naissantes, entraînant une perte économique considérable. De plus, une attaque foliaire importante réduit fortement la capacité photosynthétique de la plante et entrave la mise en réserve en fin de cycle végétatif, avant la dormance. Au contraire, l'utilisation répétée et massive de fongicides conduit à la pollution de l'environnement, au développement de résistances et à une toxicité résiduelle, et affecte la santé humaine (Pimentel, 2005).

1.2 LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES ET LE CUIVRE POUR LUTTER CONTRE *PLASMOPARA VITICOLA*

Au cours de la dernière décennie, depuis l'apparition du mildiou, l'utilisation du cuivre a été très étendue, surtout dans la viticulture biologique et biodynamique, car c'est le seul produit autorisé pour lutter contre le mildiou. Le cuivre (Cu) et les préparations cuivriques sont utilisées pour lutter contre les maladies fongiques et bactériennes. Cette préparation est mondialement connue sous le nom de bouillie bordelaise, qui contient du sulfate de cuivre (II) (CuSO_4) et de la chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Elle était d'abord utilisée pour dissuader les passants de manger les raisins, mais plus tard, en 1885, le scientifique français Millardet a réalisé des expériences, qui ont confirmé que la bouillie bordelaise est très efficace contre le mildiou, à un coût relativement faible.

Les apports de cuivre de 1890 à 1940 atteignaient généralement 50 kg/ha/an en viticulture (Strumpf et al., 2011). Cela a créé un problème, car le Cu est connu comme un métal lourd et

son accumulation dans les sols des vignobles et les eaux souterraines entraîne une pollution des sols. De plus, la viticulture est un secteur agricole très important dans les régions méditerranéennes car environ 60 % de la production mondiale de vin provient de seulement trois pays de l'Union européenne (UE) (France, Italie et Espagne) (Hall et Mitchell, 2000). La pollution des sols est sans aucun doute une menace majeure pour les sols de l'UE, puisque le nombre de sites potentiellement contaminés est estimé à plus de 2,5 millions et les sites identifiés environ 342 000 (Panagos et al., 2013a).

La France est l'un des trois premiers pays répertoriés en ce qui concerne l'utilisation de pesticides (fongicides, bactéricides, insecticides et acaricides) selon l'analyse statistique d'Eurostat (Figure 4). Bien que la viticulture représente 3 % de la superficie agricole de la France, le secteur s'étend sur 20 % de la superficie totale de la France. Le secteur viticole français épand 20 % des fongicides du pays (Robert, 2019). Pourtant, il y a eu déjà fait des efforts vers une approche plus durable de la production de raisins. Comme le prévoit la directive établissant un cadre pour parvenir à une utilisation durable des pesticides, le secteur viticole est la première filière agricole à s'être engagée à réduire de 50 % l'utilisation des produits phytosanitaires, notamment en modifiant ses méthodes de pulvérisation (Robert, 2019).

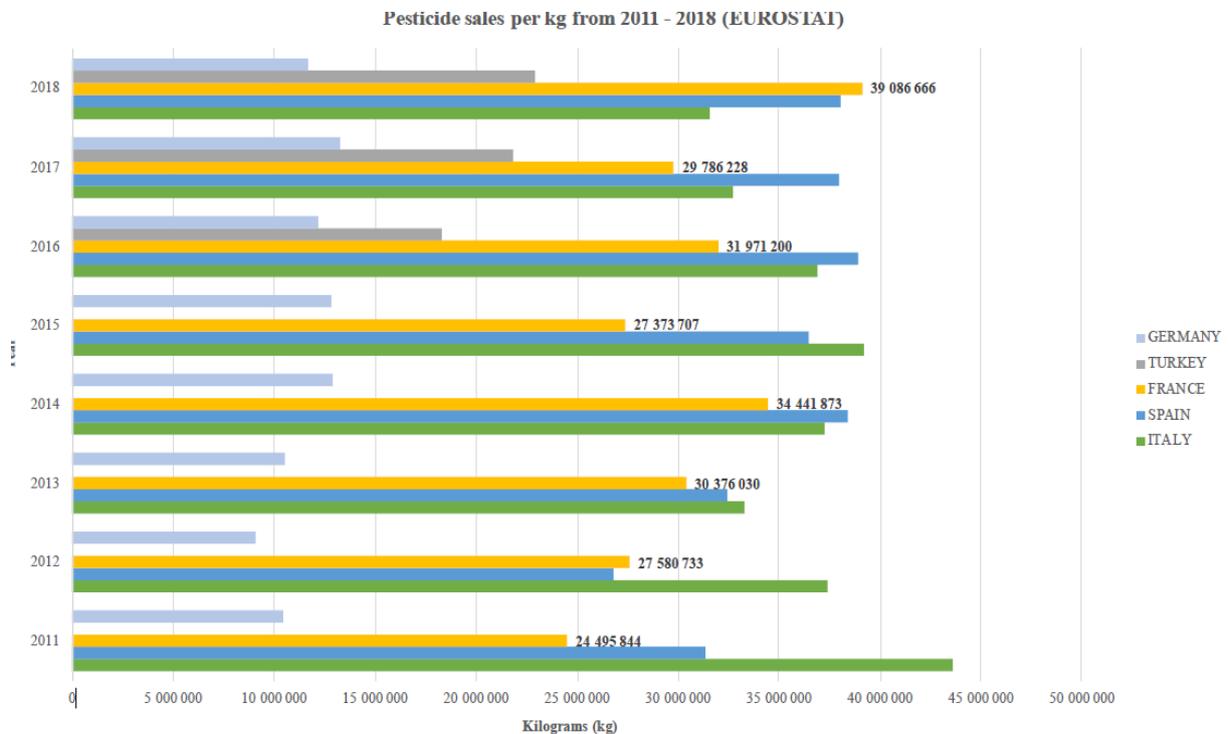


Figure 4 *Ventes de pesticides des 5 premiers pays consommateurs entre 2011 et 2018 (en kilogrammes vendus/an) (Source site : Eurostat, Pesticide purchase, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/aei_fm_salpest09/default/table?lang=en)*

1.3 LE CUIVRE DANS LE SOL : ACCUMULATION, DISPONIBILITE ET SITUATION EUROPEENNE

Le cuivre est présent dans la matière organique, les oxydes et les minéraux qui libèrent facilement des ions Cu dans des conditions acides (Kabata-Pendias et al., 1992 ; Mortvedt, 2000). En fait, la concentration de Cu dans le sol dépend des différentes interactions entre le

matériau parental, les propriétés physico-chimiques du sol et les éventuels apports exogènes de l'agriculture (ou de l'industrie). La disponibilité du cuivre diminue avec un pH élevé, une teneur élevée en carbone organique du sol et une teneur élevée en argile (Baker et Senft, 1995). Une faible valeur de pH augmente la solubilité, et par conséquent la mobilité du cuivre (Evans, 1989). 80 % du cuivre inorganique dans le sol est présent sous forme insoluble que les plantes ne peuvent pas utiliser et seulement 20 % est présent sous une forme soluble, disponible pour les plantes. Le cuivre du sol est le plus disponible pour les plantes à des valeurs de pH comprises entre 5 et 6 (Fregoni et Corallo, 2001). Le cuivre s'accumule dans les couches supérieures du sol et est principalement lié aux particules d'argile (Van der Perk et al., 2004) et à la matière organique (Adriano, 1986 ; Yu et al., 2002 ; Fernandez-Calvino et al., 2008). Les déficiences dans le sol sont courantes sur les sols sableux, les sols à forte teneur en matière organique et les sols calcaires (Martens et Westerman, 1991). Néanmoins, il est important de mentionner que le cuivre a également des effets positifs, puisqu'il influence positivement l'apport en micro- et macronutriments (Vercesi et al., 2008).

L'augmentation des niveaux d'azote (N) et de phosphore (P) affecte négativement la disponibilité du cuivre dans le sol. Ce type de carence en cuivre peut ralentir le transport du calcium (Ca) vers les parties supérieures de la plante. Tandis que les quantités excessives de cuivre peuvent affecter négativement la réception du fer (Fe), et la carence en Fe peut conduire à une toxicité du cuivre chez les plantes (Marschner, 1995). La fertilisation avec du compost et du fumier augmente le nombre de composés complexes du cuivre et réduit la phytotoxicité du cuivre (Bolan et al., 2003), mais n'affecte pas la teneur en cuivre dans les feuilles de vigne (Kovačič et al., 2013). De plus, le cuivre agit comme un catalyseur pour de nombreuses réactions chimiques.

Dans les cellules végétales, il participe au transport photosynthétique des électrons et fait partie intégrante d'enzymes telles que la polyphénol oxydase, la monoamine oxydase et d'autres phénolases. Les organismes en tant que tels sont en fait incapables de contrôler totalement le cuivre qui pénètre dans leurs structures cellulaires. De plus, ils n'ont pas la capacité de neutraliser complètement ses effets nocifs en cas d'accumulation excessive dans les cellules et les tissus. Or, les organismes qui sont exposés à l'environnement avec des concentrations plus élevées de cuivre sont plus à risque de souffrir de plusieurs troubles du développement et de la reproduction (Kovačič et al., 2013). Cet excès de cuivre du sol peut entraver le métabolisme azoté de la vigne, qui se traduit dans le système racinaire par une réduction de l'azote, principalement du nitrate et des acides aminés libres (notamment la glutamine et l'acide glutamique), et l'activité enzymatique (Llorens et al., 2000).

Les niveaux de cuivre dans les sols viticoles ont un impact sur le C total, les activités enzymatiques et la biodiversité, en particulier sur l'abondance des vers de terre dans le sol (Mackie et al., 2013). En revanche, il n'y a pas de corrélation directe entre la teneur en cuivre dans le sol et sa disponibilité pour les plantes (Steindl et al., 2011).

Cependant, au niveau de l'Union européenne, il n'y a pas d'accord commun sur les valeurs seuils de cuivre pour la définition du risque. Certaines lignes directrices et valeurs seuils ont été établies en ce qui concerne les caractéristiques du sol, mais elles varient d'un pays à l'autre (Carlson et al., 2007). Néanmoins, certaines règles générales ont été acceptées, grâce aux législations finlandaise et suédoise sur la contamination des sols (MEF, 2007). Selon le Décret gouvernemental sur l'évaluation de la contamination des sols et des besoins de remédiation 214/2007 (MEF, 2007), la valeur seuil du cuivre est de 100 mg/kg et la valeur indicative est de

150 mg/kg (Ballabio et al., 2018). Le seuil est la valeur au-delà de laquelle une évaluation plus poussée du sol et de la zone est nécessaire, alors que la valeur guide est considérée comme un risque écologique ou sanitaire (Tóth et al., 2016a, 2016b). Cette valeur seuil a également été proposée par d'autres études (Baize, 1997 ; Adriano, 2005).

Ballabio et al. 2018 se sont concentrés sur l'évaluation de la distribution du cuivre dans le sol européen, en se basant sur l'étude de sol LUCAS. Cette étude a montré que la concentration moyenne en cuivre des échantillons dans les sols de l'UE est de 16,86 mg/kg avec une fourchette allant de 0 à 496,3 mg/kg, avec une grande variabilité, l'écart type étant de 21,92 mg/kg. De plus, les vignobles ont une concentration moyenne de cuivre de 49,26 mg/kg avec une très grande variabilité entre les pays. En outre, le vignoble est la classe d'occupation du sol avec le pourcentage le plus élevé d'échantillons de sol affichant des valeurs supérieures à 100 mg/kg (14,6%) (Ballabio et al., 2018). Néanmoins, La France a été évaluée comme le pays présentant la plus forte concentration de cuivre dans les sols viticoles, avec une valeur moyenne de 91,29 mg/kg, près de la moitié des échantillons présentant des valeurs supérieures au seuil mentionné.

1.4 LA BIODYNAMIE EN VITICULTURE

La viticulture biologique et biodynamique prend de plus en plus d'importance, non seulement pour l'environnement et la production d'aliments sains, mais aussi pour la santé des personnes impliquées dans l'agriculture. Le secteur vitivinicole, mais aussi les politiques agricoles et environnementales générales, réagissent à ces demandes en prenant des initiatives visant à limiter, voire à exclure, l'utilisation de pesticides et d'herbicides de synthèse et en s'orientant vers des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement. L'agriculture biologique trouve ses racines au début du siècle dernier. Le mouvement s'est développé en réaction aux problèmes écologiques et liés au sol, ainsi qu'aux problèmes économiques et sociaux survenus pendant les deux guerres mondiales. L'intensification de l'agriculture a conduit à l'acidification des sols, à la perte de leur structure et à leur épuisement, ce qui a entraîné une baisse de la qualité des aliments et parallèlement, une augmentation de l'incidence des maladies chez les humains et les animaux. Il y avait une forte volonté d'améliorer la fertilité des sols et de réduire l'utilisation d'engrais minéraux, et de créer une forme d'agriculture durable tout en produisant des cultures de haute qualité. En outre, différentes méthodes d'agriculture biologique se sont développées, dont l'une est également la biodynamie. En viticulture, les méthodes de gestion biologique et biodynamique ont été appliquées pour la première fois à la fin des années 1960, et la recherche sur la viticulture biologique a débuté peu après (Danner, 1985).

On peut dire que la viticulture biodynamique a la même base de réglementation que l'agriculture biologique, tout en étant un système agricole holistique, basé sur la dimension spirituelle du vivant et de l'inorganique (Vogt, 2007). Elle a été fondée en 1924 par Rudolf Steiner et a été l'un des premiers mouvements vers l'agriculture biologique (Steiner, 2005).

L'idée de l'agriculture biodynamique est d'être pratiquée dans des fermes mixtes, comprenant des cultures et du bétail, qui répondraient aux exigences de l'exploitation en tant qu'organisme, tel que défini par Steiner. L'un des éléments clés est également l'utilisation de différentes préparations biodynamiques qui stimulent le cycle des nutriments du sol, l'état des nutriments du sol et la santé du sol, ainsi que l'activité photosynthétique des cultures et la composition du compost (Masson et Masson, 2013).

Par ailleurs, de nombreuses plantes et leurs extraits sont connus pour avoir des propriétés

allélopathiques. C'est-à-dire qu'elles ont un effet direct ou indirect, positif ou négatif, sur d'autres plantes par la production de composés chimiques (c'est-à-dire des métabolites secondaires) qui sont libérés dans l'environnement, la proximité (microclimat) de la plante et la présence d'une source de chaleur. Ils peuvent soit stimuler le système immunitaire des plantes et réguler leur réponse aux différents facteurs abiotiques ou biotiques. Ces extraits de plantes sont préparés la veille de chaque traitement ou le jour même du traitement, selon le type de préparation ou le moment du traitement (matin, après-midi). Contrairement au pur jus ou au purin qui peuvent être conservés pendant des mois, ces préparations à base de plantes doivent être réalisées et également utilisées rapidement après leur préparation. Les extraits de plantes qui servent d'anti-cryptogrammes sont fabriqués à partir de la tisane d'ortie (*Urtica dioica*), de la décoction de prêles (*Equisetum arvense*), de la tisane d'osier blanc (*Salix alba*) et de l'écorce de nerprun (*Frangula alnus*).

L'ortie est récoltée au domaine et pour la préparation de la tisane, 100 g/ha suffisent. C'est l'un des extraits végétaux les plus favorables à la vigne : il joue un rôle dans le renforcement de la plante, il a une action tonique et vitalisante en régulant le flux de sève et il stimule la photosynthèse. Il a également un effet préventif contre le mildiou. Utilisée avec la bouillie bordelaise, l'ortie permet également de réduire les doses de cuivre. La prêle est largement utilisée la semaine précédant Pâques pour décaler le cycle du mildiou, en pulvérisation sur le sol mais aussi en association avec des traitements, en tisane. Elle est aussi bien utilisée en association avec la tisane d'ortie et de saule pour réduire les doses de cuivre (Zhou, 2017). Ce printemps, elle a été appliquée avec la tisane de consoude (*Symphytum officinale*) et de valériane (*Valeriana officinalis*). La consoude est un stimulateur de croissance et un revitalisant, idéal après une grêle ou une attaque de maladie. Il permet de réduire les doses de soufre.

Au contraire, les plantes suivantes et leurs extraits ont des propriétés anti-stress, comme la tisane de camomille (*Matriarca recutita*), la tisane d'achillée millefeuille (*Achillea millefolium*) ou l'extrait de valériane.

Au cours de la saison de croissance de 2020, diverses préparations d'extraits de plantes ont été utilisées et intégrées au calendrier de traitements. Au total, 18 à 21 traitements ont été effectués au Château Palmer, en fonction des parcelles. Les plantes incluses dans les préparations d'extraits végétaux, c'est-à-dire les tisanes, sont l'osier, l'achillée, la prêle, l'ortie, la reine des prés, la consoude, la bourdaine et la valériane. Parfois, ces tisanes étaient assemblées, selon la partie de la saison et le stade phénologique de la vigne.

Enfin, l'un des volets de la recherche de cette année portait également sur l'utilisation de l'huile essentielle d'origan en suivant la recette d'Éric Petiot, tirée du livre "Soigner les plantes par les huiles essentielles et les huiles végétales" (2019). Les résultats seront présentés dans ce mémoire. Les résultats ont permis de mieux comprendre l'utilisation et de l'application du cuivre et des huiles essentielles. Par conséquent, Château Palmer espère améliorer son temps et son mode d'application et continuer à améliorer les résultats finaux afin de diminuer l'utilisation du cuivre et de contrôler le niveau d'incidence du mildiou.

1.5 LE CUIVRE EN VITICULTURE BIOLOGIQUE, BIODYNAMIQUE ET A CHATEAU PALMER

L'Union européenne a fait de gros efforts pour réduire la quantité de cuivre et de produits à base

de cuivre dans la viticulture biologique et biodynamique. Elle a ainsi réussi à réduire sa quantité de 8 kg/ha/an à 4 kg/ha/an. De plus, pour la certification Demeter, qui représente la production de vin biodynamique, la limite d'utilisation du cuivre est fixée à une moyenne de 3 kg/ha/an sur 7 ans, avec un maximum de 500 g/ha par traitement. Cette limite peut toutefois être dépassée pour atteindre la dose annuelle de 4 kg au cours d'une année où les conditions de culture sont difficiles, lorsque cela est dûment justifié ("Demeter", s.d.). Bien qu'il soit important de mentionner que plusieurs études ont montré que les quantités de cuivre utilisées pour la protection des plantes en viticulture biologique sont plus élevées par rapport aux quantités habituellement utilisées en viticulture conventionnelle, les sols des vignobles gérés biologiquement en France, en Croatie et en Allemagne n'avaient pas une teneur en cuivre plus élevée par rapport à leurs homologues conventionnels (Probst et al., 2008 ; Coll et al., 2011 ; Strumpf et al., 2011 ; Radić et al., 2014). Parallèlement, l'utilisation d'extraits de plantes et de tisanes dans le cadre de la viticulture est déjà fortement suggérée. A chaque traitement phytosanitaire, il est conseillé d'ajouter les tisanes, en fonction des conditions climatiques du moment. Ces extraits végétaux sont connus pour posséder des composés actifs, qui auront un effet préventif sur le mildiou, une stimulation des défenses naturelles, des effets antigerminatifs et anti-sporulant, et lorsqu'ils sont combinés avec le cuivre, ils peuvent en renforcer l'efficacité. Par ailleurs, l'objectif de Château Palmer est bien de se tourner vers l'utilisation des huiles essentielles qui présentent également des propriétés antifongiques. Par conséquent, l'objectif est de réduire le nombre d'applications et la dose avec la stratégie d'augmenter l'utilisation de préparations biologiques ou en abandonnant totalement l'utilisation de fongicides à base de cuivre et en les remplaçant par d'autres (Goebel et al., 2004). Speiser et al. (2000) ont proposé l'utilisation de phosphonates de potassium dans la viticulture biologique, qui sont très efficaces contre le mildiou, mais ils ne le recommandent pas, en raison des résidus de phosphonates retrouvés dans le vin. De plus, elle n'est pas compatible avec la réputation du vin biologique auprès des consommateurs (Speiser et al., 2000). Une autre étude a suggéré l'utilisation d'extraits d'algues marines pour améliorer la réception du cuivre et ainsi augmenter ses concentrations dans la vigne, mais n'ont aucun effet sur la réception de N, P, K, Ca, Fe, Mg, Mn, et Zn (Turan et Kose, 2004).

Le tableau ci-dessous indique la dose finale de cuivre utilisée dans les traitements pour chaque année à partir de 2009 à Château Palmer. Par exemple, la saison de croissance de 2018 a eu des conditions très favorables au mildiou, conduisant à des doses plus élevées et à plus de traitements. De plus, Château Palmer fait partie de la certification Demeter, qui permet des ajouts de Cu maximum de 4 kg/ha/an. A partir du tableau 1, nous pouvons voir que la saison de culture de 2018 a été très difficile en termes de lutte contre le mildiou. Le millésime 2021 a été marqué par le gel et l'humidité. Les conditions ont été idéales pour le développement du mildiou. Cependant, les premières attaques cryptogamiques ont été observées fin Mai. La campagne de traitement au cuivre a débuté plus tardivement que l'année précédente (8 avril 2020 contre 22 avril 2021) et compte 3 traitements de moins, ce qui explique une dose annuelle de cuivre moindre en 2021 qu'en 2020.

Tableau 1 Dose annuelle de cuivre utilisée en kg/ha depuis 2009 au Château Palmer (source : données statistiques de Château Palmer, 2021)

Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Moyenne
Cu utilisé (kg/ha)	3,94	2,61	1,38	2,92	4,13	3,91	2,16	4,51	2,75	5,29	4,47	4,58	4,19	3,60

1.6 LES HUILES ESSENTIELLES POUR LA REDUCTION DE L'UTILISATION DU CUIVRE

De nombreux facteurs peuvent avoir une influence sur la productivité de la vigne, dont l'un des plus importants dans la région de Bordeaux et pour le Château Palmer est l'oomycète *Plasmopara viticola*. En raison de son caractère biotrophe, il peut infecter tous les tissus verts, en réduisant la surface photosynthétique et en bloquant la translocation des assimilats, de sa source de production vers les zones de croissance et les fruits (Aziz et al., 2006). La lutte chimique est utilisée depuis plusieurs décennies maintenant depuis l'apparition du mildiou en Europe - elle s'est avérée économiquement viable et efficace contre la maladie. Cependant, il y a une préoccupation croissante concernant les dommages environnementaux, le développement de la résistance, ainsi que la santé des consommateurs. De plus, les applications de fongicides à long terme conduisent à une augmentation de la résistance des pathogènes (Gisi et Sierotzki, 2008).

Les alternatives récemment introduites pour le contrôle des maladies sont les composés du métabolisme secondaire des plantes, présents dans leurs huiles essentielles. Les huiles essentielles ont un grand potentiel et peuvent être une option dans la gestion des maladies des plantes. En outre, les huiles essentielles sont largement utilisées depuis le Moyen Âge, en raison de leurs applications bactéricides, virucides, fongicides, antiparasitaires, insecticides, médicinales et cosmétiques. Il y a une augmentation du nombre d'études qui cherchent à trouver l'activité antifongique des huiles essentielles comme un contrôle alternatif, avec des résultats prometteurs (Bakkali et al., 2008). L'huile essentielle d'origan (*Origanum compactum*) a montré des résultats positifs (Mallet et al., 2014). Jusqu'à présent, les huiles essentielles ont montré des propriétés antifongiques contre des agents pathogènes, notamment *Plasmopara viticola*, *Botrytis cinerea* et *Fusarium sp.* (Dagostin et al., 2010 ; Soyly et al., 2010). L'huile essentielle d'origan et son efficacité ont été testés en 2020 pour la première fois au Château Palmer.

Les huiles essentielles sont des métabolites secondaires naturellement produits par les plantes aromatiques. Ce sont des composés volatils et complexes caractérisés par une forte odeur. Ces plantes aromatiques sont généralement issues de pays tempérés à chauds, comme les pays méditerranéens et tropicaux. Les huiles se présentent sous forme liquide, limpide, rarement colorée, liposoluble et soluble dans les solvants organiques. Elles peuvent être synthétisées par tous les organes végétaux, c'est-à-dire bourgeons, fleurs, feuilles, tiges, rameaux, graines, fruits, racines, bois ou écorce. Les métabolites secondaires sont généralement stockés dans des cellules sécrétrices, cavités, canaux, cellules épidermiques ou trichomes glandulaires (Bakkali et al., 2008).

La méthode d'extraction et le type d'extraction utilisé varient en fonction du but de l'utilisation. De plus, la composition chimique des huiles essentielles diffère par leurs concentrations et les types stéréochimiques des molécules extraites. Le produit peut varier en qualité, en quantité et en composition selon le climat, la composition du sol, l'organe de la plante, l'âge et le stade du cycle végétatif (Angioni et al., 2006). Ces huiles sont ensuite chimiotypées par chromatographie en phase gazeuse et analysées par spectrométrie de masse. En général, elles sont caractérisées par deux ou trois composants majeurs à des concentrations plutôt élevées (20-70%) par rapport aux autres composants qui sont à l'état de traces. Ces composants comprennent deux groupes d'origine biosynthétique, dont le groupe principal est composé de terpènes et de terpénoïdes, et le second groupe d'autres constituants aromatiques et aliphatiques (Bakkali et al., 2008). En ce

qui concerne la composition chimique, les principaux composés ayant une activité antioxydante sont l'acide carnosique, le carnosol, l'acide rosmarinique et d'autres composés phénoliques, tandis que l'activité fongicide peut être attribuée à des molécules telles que le carvacrol, le thymol et le p-cymène (Pina-Vaz et al., 2004).

En parcourant toutes les études récentes, la partie la plus cruciale et encore à l'étude est le moment de l'application afin d'améliorer et d'augmenter l'efficacité du contrôle des pathogènes. En ce qui concerne la recherche très récente de Rienth et al. (2019), il semble également que les huiles essentielles aient été observées moins efficaces *in vivo* que celles étudiées *in vitro*. Il est cependant important de souligner que le problème majeur des huiles essentielles concernant leur efficacité contre les pathogènes est la dégradation par la chaleur, la lumière, l'oxygène, l'humidité, le temps et la méthode d'application. Des études ont prouvé que la phase vapeur des huiles essentielles est plus efficace, c'est-à-dire fongitoxique, que la phase liquide de contact. De plus, afin de se tourner vers une production plus durable, les vapeurs d'huiles essentielles en traitement direct avec des diffuseurs ou sous forme de co-plantations de plantes émettrices de composés volatils d'huiles essentielles pourraient être considérées dans des systèmes intégrés, capables de contrôler les maladies fongiques (Rienth et al., 2019).

1.7 SYSTEME IMMUNITAIRE ET SYSTEME DE DEFENSE DE LA VIGNE

Les plantes possèdent deux formes de réponses du système immunitaire inné contre les agents pathogènes. Les molécules microbiennes induisent des modèles d'expression moléculaire, c'est-à-dire des modèles moléculaires associés aux agents pathogènes, aux microbes ou aux dommages (PAMPs, MAMPs ou DAMPs). Ces modèles conduisent à une immunité déclenchée (PTI). Ceux-ci représentent la première ligne de défense des plantes contre les agents pathogènes. Le PTI enclenche une cascade de réactions, qui est généralement marquée par des événements de signalisation, tels que la phosphorylation de protéines, des flux d'ions, l'accumulation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), l'induction de gènes de défense et le renforcement de la paroi cellulaire par le dépôt de callose (Yi et al., 2014).

La seconde réponse innée est l'immunité déclenchée par les effecteurs des pathogènes (ETI). C'est-à-dire que pour l'ETI, une interaction hautement spécifique, directe ou indirecte entre les effecteurs de l'agent pathogène et les produits des gènes de résistance aux maladies de la plante, conduit à une forte réponse de défense locale, qui se traduit généralement par la mort cellulaire programmée (PCD) et stoppe la croissance du pathogène (Gomès et al., 2009).

La compréhension des mécanismes impliqués dans l'efficacité des huiles essentielles contre l'agent pathogène est d'une grande importance car elle pourrait fournir des informations très précieuses lors du développement de fongicides naturels, des produits de stimulation des défenses des plantes, ainsi que des cibles génétiques pour l'amélioration des sélections de variétés résistantes (Rienthart et al., 2009).

Jusqu'à présent, il est bien établi que les réponses des plantes aux stimuli de stress biotiques et abiotiques sont régulées par des phytohormones liées à la défense, dont l'acide salicylique, l'acide jasmonique et l'éthylène sont les principaux signaux (Bektas et al., 2019). Les voies de l'acide salicylique activent la résistance aux agents pathogènes biotrophes et hémi-biotrophes, tandis que l'acide jasmonique et l'éthylène activent la résistance à la nécrotrophie (Pieterse et al., 2012). L'acide jasmonique jouerait un rôle essentiel dans la réponse à la blessure des tissus, en régulant l'expression des gènes en redirigeant le métabolisme vers la production de

molécules de défense et la réparation des dommages (Santino et al., 2013). L'acide salicylique est un composé phénolique et sa biosynthèse est déclenchée lors de la reconnaissance par les PTI et ETI de PAMPs ou d'effecteurs d'agents pathogènes (Rienth et al., 2019). Enfin, l'éthylène est un modulateur principal et pléiotrope de nombreux aspects de la vie végétale, ce qui inclut plusieurs mécanismes par lesquels les plantes réagissent aux attaques de pathogènes. Il a été démontré par plusieurs études dont celle de Rienth et al. (2019). L'analyse de l'expression génique a montré qu'il y avait une activation complexe de la diaphonie hormonale, qui comprenait les acides jasmonique et salicylique ainsi que la biosynthèse de l'éthylène et leurs cascades de signalisation. Plus loin, cela conduit à l'activation de différents mécanismes immunitaires impliquant l'activation de gènes liés à la pathogénèse (tels que les osmotines, la chitinase et les gènes de la β -1,3-glucanase), la synthèse des flavonoïdes et des stilbènes, ainsi que des réponses telles que la réponse hypersensible, qui conduit finalement à l'apoptose ou à la mort cellulaire. Ainsi, la résistance induite aux agents pathogènes en activant le système immunitaire inné de la plante par l'application de produits naturels, qui affectent soit l'PTI soit l'ETI, pourrait représenter une stratégie alternative pour protéger les plantes contre les maladies (Bektas et Eulgem, 2015). Cependant, selon toutes les études qui ont été faites sur le sujet expliqué ci-dessus, il n'est pas encore certain dans quelle mesure l'effet inhibiteur de l'huile essentielle sur le développement de *Plasmopara viticola* est dû à une toxicité directe de l'huile sur l'agent pathogène ou à la stimulation du système immunitaire inné de la vigne (Rienth et al., 2019).

II. MATERIEL ET METHODE

2.1 SITE EXPERIMENTAL

Les trois parcelles étudiées font partie d'un îlot de Château Palmer, AOC Margaux. L'équipe technique a décidé d'effectuer cette expérimentation sur les parcelles 18, 19 et 20. Elles représentent une surface totale de 2,25 ha et appartiennent à l'îlot "Village d'Issan", voisin du Château d'Issan. Ces parcelles sont gérées en biodynamie comme le reste du vignoble depuis 2008. Ces 3 parcelles produisent en fonction des millésimes du Palmer ou de l'Alter Ego qui sont respectivement le premier et le second vin de Château Palmer.

Le site expérimental correspond donc à un îlot de parcelles enclavées entre le « Mur d'Issan » qui ferme le Clos des parcelles historiques du château d'Issan, et les habitations voisines. Ces murs, associés au terrain en faible pente forme une petite cuvette qui capte l'humidité et diminue l'aération. Au cours des précédents millésimes, il a été observé que cet îlot était régulièrement parmi les premières zones attaquées par les maladies cryptogames. Cela en fait un bon sujet d'étude pour la lutte contre le mildiou.

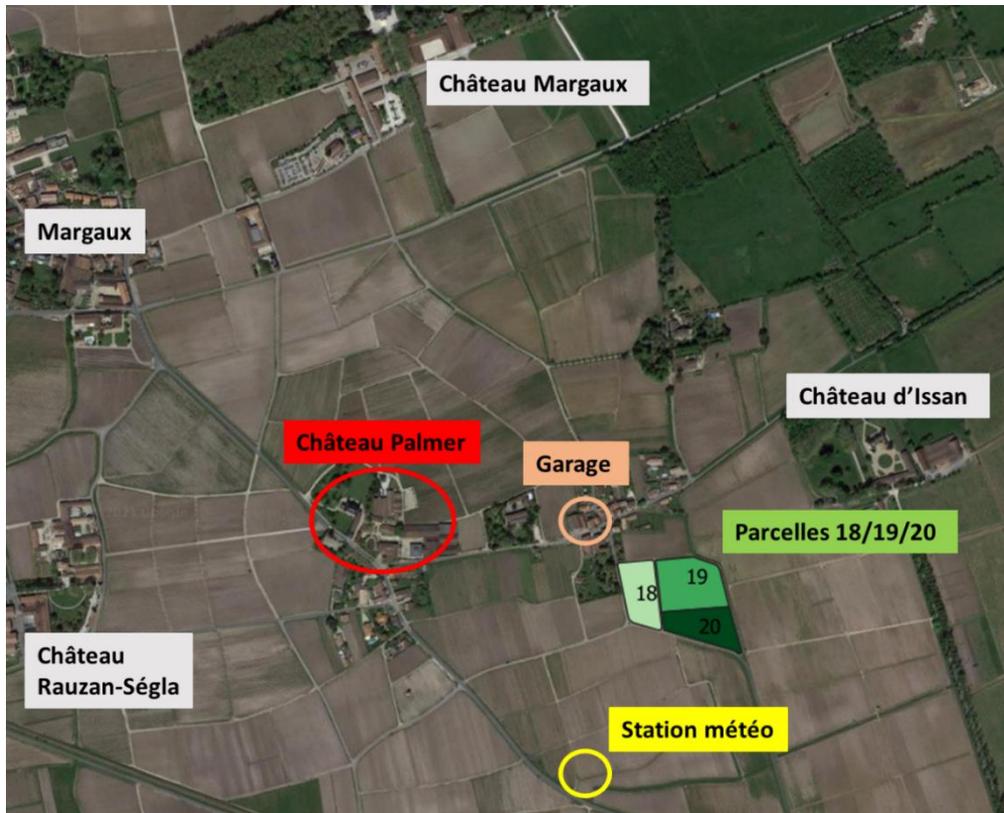


Figure 5 Localisation des parcelles expérimentales, du château et de la station météo de Margaux (source personnelle)

Sur les parcelles, 2 cépages sont représentés. Les parcelles 18 et 19 sont plantées en Cabernet Sauvignon et la 20 en Merlot. Elles sont toutes les trois plantées avec une densité 10 000 pieds à l'hectare. La plus ancienne est la 18, plantée en 1975. Les parcelles 19 et 20 ont été plantées respectivement en 1985 et 2002. Un seul porte-greffe est utilisé sur ces parcelles, le 101-14 MG. Ce dernier est bien adapté à l'humidité mais sensible à la sécheresse. Il s'implante bien sur les peu calcaires et bien alimentés en eau.

La différence de cépages induit un décalage de phénologie au cours de la saison. Cependant, avec les épisodes gélifs en avril, ce décalage est resté de l'ordre de la semaine tout au long de la saison. Cela a permis d'effectuer les différentes mesures sur une courte période temporelle à chaque fois. La vague de froid n'a pas endommagé les bourgeons, la température n'étant pas descendue sous les -1°C .

La carte NDVI montre une certaine homogénéité de la vigueur sur les parcelles 18, 19 et 20, avec néanmoins une vigueur légèrement plus élevée dans la partie nord-ouest de la parcelle 18.

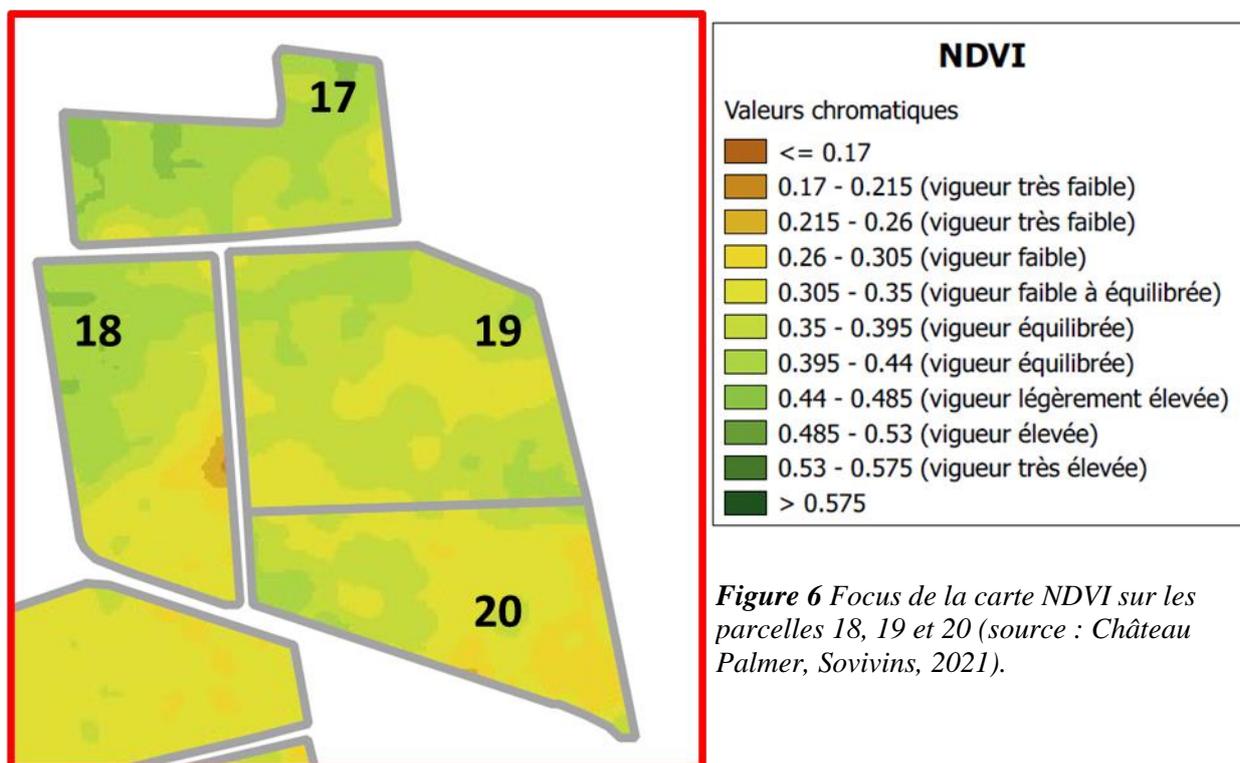


Figure 6 Focus de la carte NDVI sur les parcelles 18, 19 et 20 (source : Château Palmer, Sovivins, 2021).

2.2 MISE EN PLACE EXPERIMENTALE

Le dispositif expérimental comprend 3 modalités de traitement : - Témoin Non Traité (TNT) - Traitement Propriété (PPT) - Traitement à l'huile essentielle d'origan (HEO). Pour chacune des 3 parcelles, on crée 2 zones en traitement HEO et une zone de traitement PPT. Pour des raisons de risques sanitaires, un seul témoin non traité a pu être mis en place sur les rangs courts de la parcelle 20 (Merlot). Il n'y a donc pas de témoin non traité sur le cépage Cabernet Sauvignon. On appellera « modalité » chacune des zones de traitement des différentes parcelles. Par exemple, sur la parcelle 20 (Merlot), on trouve 4 modalités : 20HEO1 et 20HEO2 pour les 2 zones en HEO, 20PPT pour la zone en traitement propriété et 20TNT pour la zone non traitée. Au total, cela représente 10 modalités : 6 zones en HEO, 3 zones en PPT et 1 zone en TNT. Cette expérience représente 168 rangs pour 2,25 ha. Les traitements étant effectués en tracteur, il a fallu prendre en compte le nombre de manches de pulvérisation des différents tracteurs, les obstacles de la parcelle (arbres fruitiers plantés dans les rangs) et faciliter au maximum le travail des tractoristes. De plus, la surface à traiter devait être suffisante pour pouvoir remplir au minimum les cuves des tracteurs.

Les tracteurs ont été imposés par l'équipe technique. Les traitements HEO ont été effectués par un tracteur 5 manches tandis que les zones en PPT étaient gérées par un tracteur à 7 manches. Le TNT sera traité au PPT dès 50% d'attaque sur les feuilles. Pour faciliter la visibilité des délimitations des zones de traitements pour les tractoristes, toutes les tournières ont été balisées en rouge pour le traitement HEO et en bleu pour le traitement PPT. Le but de l'expérimentation étant également de voir la faisabilité de la mise en place à l'échelle des parcelles du traitement à l'huile essentielle, une grande surface des 3 parcelles expérimentales fut traitée en HEO (1.7 ha), contre un total de 28 rangs pour le traitement en propriété (0.7 ha), et approximativement 300 pieds pour le témoin non traité (0.03 ha).

Chaque zone de traitement par parcelle est considérée comme une « modalité ». Chacune de ses modalités sera analysée grâce aux valeurs mesurées sur un total de 30 pieds, répartis sur 3 placettes de 10 pieds.

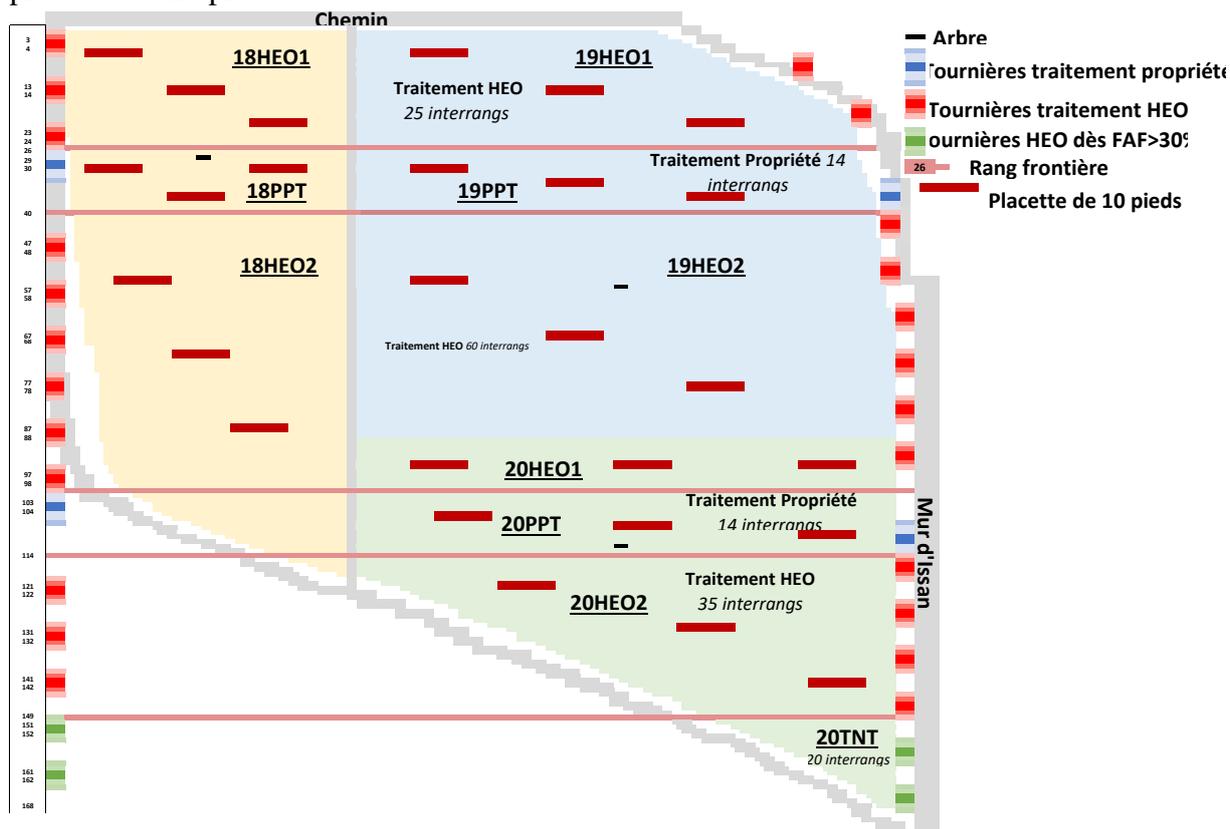


Figure 7 Organisation spatiale des modalités de traitement et des placettes de comptage sur les parcelles expérimentales (source personnelle).

2.3 PROTOCOLE ET CALENDRIER DE TRAITEMENT

2.3.1 Protocole de traitement

Les traitements ont tous été effectués par les tractoristes. L'auteur était responsable de la préparation des traitements à l'huile essentielle d'origan.

Les doses à respecter lors d'un traitement HEO sont les suivantes : 80% de la dose de cuivre de l'ordre de traitement propriété + 100 mL/ha d'huile essentielle + 100 mL/ha d'huile d'olive bio + 1,5% du volume de cuve en savon noir (contenant 5 à 15% de savon, voir étiquette du savon utilisé). Les produits doivent nécessairement provenir de l'agriculture biologique pour correspondre au label de biodynamie du vignoble. Le volume de Savon Noir a été défini après plusieurs essais afin d'optimiser la dilution de l'HEO et l'Huile végétale dans la cuve de tracteur de 800L (formation de mousse, mélange avec les produits soufrés et cupriques...).

Conditions nécessaires pour lancer un traitement à l'HEO :

- Traitement systématique après 20mm de pluie
- Traitement avant et après la pluie dès apparition des contaminations secondaires
- Doses de cuivre calculée en fonction du cumul de pluie entre les deux traitements
- Dose de cuivre augmentée au moment de la floraison
- 7 traitements prévisionnels d'Avril à Juin avec de l'HEO

- Activation plus importante du cuivre en présence d'une hygrométrie élevée le jour du traitement (> 85%) : dose de cuivre réduite de 20%
- Limitation des doses de cuivre à 300g / ha maximum par traitement

La décision est également prise en fonction de l'équipe technique et de son expérience, ainsi que des courriels d'information hebdomadaires provenant du Bulletin de Santé Végétal (BSV).

2.3.2 Calendrier de traitements

Le premier traitement de la saison fut effectué le 23 avril, au stade 6 feuilles étalées sur le merlot. Les cabernets ont été traités pour la première fois le 30 avril, au même stade phénologique. Tous les traitements suivants ont été pulvérisés sur Merlot et Cabernet les mêmes jours. Le dernier traitement est arrivé le 17 août (fin véraison). Il y a eu un total de 18 passages sur les parcelles expérimentales pour les traitements à base de cuivre.

Les traitements à l'huile essentielle ont débuté le 7 mai et le dernier traitement, pour encadrer la fleur, s'est achevé le 15 juin. Ils ont tous été incorporés au calendrier de traitement de la propriété car effectués par les tractoristes, avec des doses de produits phytosanitaires calculées en fonction du traitement propriété du jour.

2.4 DONNEES CLIMATIQUES

Les données météorologiques sont collectées via les stations météo voisines à Margaux pour les températures minimales, maximales et moyennes (°C), et pour l'humidité relative de l'air (%). Un pluviomètre positionné sur le plateau permet de mesurer les précipitations (mm). La station météo permet également de mesurer la vitesse des rafales de vent, qui influence la possibilité de traitement ou non, notamment sur la dérive des produits pulvérisés au voisinages des zones résidentielles.

2.5 ÉTAT HYDRIQUE / AZOTE DES PARCELLES

Le but de cette analyse préalable est de vérifier si les facteurs influençant la vigueur de la vigne sont homogènes ou non et pouvoir les inclure dans l'analyse des résultats (une forte vigueur favorise le développement des maladies cryptogamiques en générale et inversement pour les vignes chétives).

Le potentiel de tige a été mesuré en fin de véraison, le 3 août, au moment qui semblait le plus stressé afin d'avoir une discrimination malgré un millésime très humide. La mesure de potentiel a été faite avec une chambre à pression, en collectant 2 feuilles adultes par placette, pour un total de 6 feuilles par modalité. Ces feuilles ont été mises en sachet à 10h dans des poches plastiques recouvertes de papier aluminium et maintenues par des trombones. Les mesures ont été prises de 12h30 à 14h. Les conditions météorologiques étaient chaudes et sèches les 3 jours précédents la mesure.

La prise de mesures pour l'analyse du statut azoté de la vigne a été fait le lendemain des mesures de potentiel hydrique. L'auteur a utilisé un N-tester pour vérifier l'homogénéité de la nutrition sur l'ensemble des parcelles expérimentales. Une valeur par placette a été mesurée en poinçonnant 30 feuilles/placette. Les feuilles utilisées étaient les 5^{èmes} du rameau principal, en partant de la base du rameau.

2.6 EVALUATION DE L'APPARITION DE MILDIOU / PROTOCOLE DE COMPTAGE

Suivi de l'apparition des symptômes de mildiou sur l'ensemble des parcelles par les stagiaires,

les équipes de vigneron et par moi-même pour les parcelles d'expérimentation. Mais aussi : mails d'information, comme le BSV et le MIV qui enregistrent l'apparition des taches sur les feuilles et le degré de probabilité d'apparition en fonction de différents modèles météorologiques.

Les comptages ont commencé à partir de la première apparition des symptômes sur les feuilles des parcelles de référence. Le suivi hebdomadaire nous a également permis de suivre le développement et le degré d'apparition du mildiou, donc le degré d'infections secondaires et son niveau de feuilles et de raisins infectés. Le comptage qui a été fait pour les parcelles expérimentales a eu lieu trois fois pendant la période de végétation. Les comptages ont été effectués à la fois sur les feuilles et les raisins dans la période de juin à août. Trois comptages ont été effectués : 24 juin, 1er et 28 juillet sur feuilles ; 6 / 21 et 28 juillet sur grappes.

Il est préférable que les comptages soient effectués par le moins de personnes possible et qu'ils soient finalisés à la fin de la journée de travail ; en raison de la longueur de la procédure et des nombreuses modalités différentes, les comptages ont toujours été effectués par 2 personnes (l'auteur et le même collègue stagiaire pour tous les comptages).

Le protocole de comptage du mildiou était basé sur deux critères : le pourcentage de contamination et l'intensité de l'attaque. Pour obtenir ces résultats, le document de travail pour recueillir toutes les données consistait à compter les éléments suivants :

- Nombre de feuilles total par pied de vigne
- Nombre de feuilles attaquées par le mildiou par pied de vigne
- Intensité des feuilles attaquées (échelle à 4 niveaux de la surface de chaque feuille attaquée)
- Nombre de grappes sur la vigne
- Nombre de grappes attaquées par le mildiou
- Intensité des raisins attaqués (échelle à 4 niveaux du nombre de grains touchés par grappe).

Les parcelles de l'expérimentation ont été tressées, mais ont été échardées et effeuillées ce qui explique les variations de nombre de feuilles total par pied au cours de la saison. Le millésime ayant été très humide et sans période de stress thermique, aucune perte des feuilles basales dû à un dessèchement ne fut observée.

2.7 FREQUENCE D'ATTAQUE, INTENSITE D'ATTAQUE, CINETIQUE

La fréquence d'attaque est calculée en divisant le nombre de feuilles/grappes contaminées par le mildiou par le nombre de feuilles/grappes total du pied de vigne. Les résultats obtenus sont traités en pourcentages : $(\text{Nb de feuilles contaminées} / \text{Nb de feuilles total}) * 100$

L'intensité d'attaque correspond à la surface foliaire touchée des feuilles attaquées et la portion contaminée des grappes touchées par le mildiou. Ces intensités ont été mesurées selon une échelle à 5 niveaux : 0%, 1 à 25%, 26 à 50%, 51 à 75% et 76 à 100%. Pour le second et le dernier comptage sur feuilles, l'intensité d'attaque sur feuilles par pied a été mesurée en prenant directement le niveau moyen d'attaque sur les feuilles.

$$(\sum_0^4 \text{Niveau } i * \text{Nb de feuilles de niveau } i) / \text{Nb de feuilles mildiou}$$

Pour calculer l'indicateur AUDPC (Area Under the Disease Progress Curve), qui indique la cinétique d'attaque du mildiou, l'indicateur de « dégât » a été utilisé : fréquence d'attaque * intensité d'attaque.

2.8 ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

Les données recueillies sur le terrain ont ensuite été analysées à l'aide des logiciels XLSTAT et Rstudio. La première étape d'analyse statistique est de vérifier la répartition normale des données de chaque modalité à chacune des dates de comptage. Le test de Shapiro-Wilk permet de tester des populations de 3 à 500 individus, ce qui est tout à fait adapté pour chacun des comptages qui regroupent 30 individus/modalité chacun. L'hypothèse nulle de ce test (H0)

suppose que la population est gaussienne. Si la p-value calculée est inférieure au niveau de significativité (5%), alors la population étudiée n'est pas normale. En cas de population normale, l'homoscédasticité de la variance est ensuite testée par le test de Levene. Ce dernier permet de vérifier « l'homogénéité » des variances de 2 modalités ou plus. Si la p-value mesurée est inférieure à 5%, alors les variances sont hétérogènes et au moins 2 groupes sont statistiquement différents. La dernière étape est une ANOVA pour créer ces différents groupes statistiques.

Dans l'étude présentée ici, les populations des différentes modalités à chaque comptage ne suivent pas toutes une répartition gaussienne d'après les tests de Shapiro effectués. Il a donc fallu effectuer des tests non paramétriques comme alternatives à une ANOVA classique. Le test de Kruskal-Wallis teste si les échantillons étudiés proviennent ou non d'une même population. L'hypothèse nulle suppose que tous les échantillons proviennent d'une même population. Si H0 est rejetée, alors au moins 1 échantillon provient d'une population différente des autres. Le test de Dunn de comparaison multiple permet de créer les groupes statistiques résultant du test de Kruskal.

III. RESULTATS

3.1 DONNEES CLIMATIQUES, STATUTS HYDRIQUE ET AZOTE

3.1.1 Données climatiques

La figure 8 présente les températures et pluviométries moyennes de Janvier à début Octobre. On observe que les mois d'avril, mai et août ont été les plus secs. Malheureusement, ce sont les mois de Mai et Juin qui ont cumulé le plus de précipitations. De Mai à Septembre, il est tombé 350 mm, pour une température moyenne de 18°C.

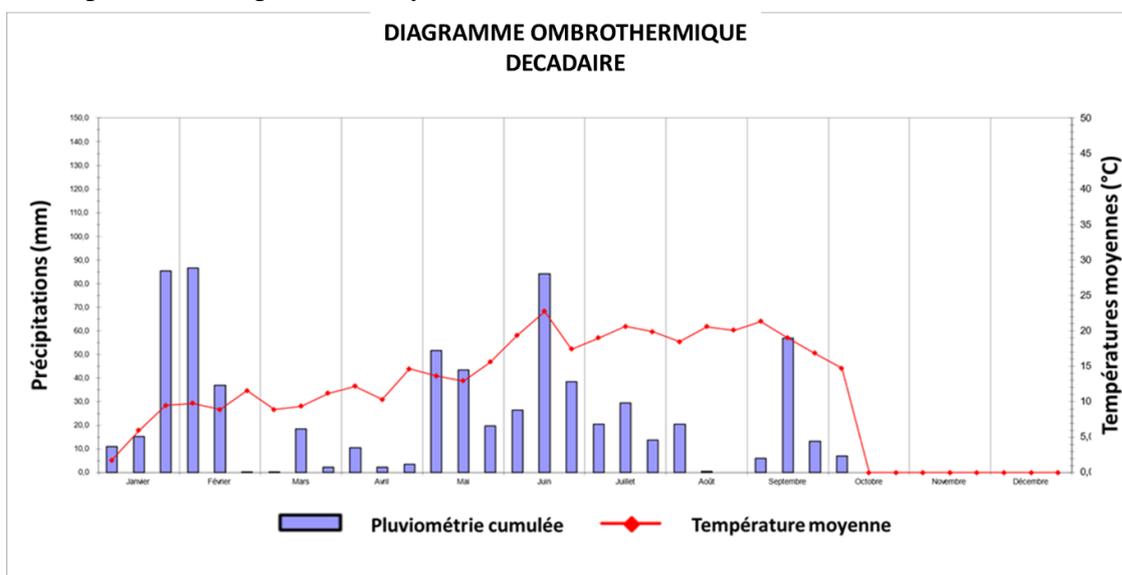


Figure 8 Diagramme ombrothermique décadaire de la station météo de Margaux (source : Château Palmer, 2021).

Les fortes précipitations au Printemps associées à des températures autour de 18°C ont été parfaites pour la croissance du mildiou. Lorsque l'on regarde les courbes de fréquence d'attaque théoriques du mildiou, présentées figure 9, on observe que le millésime 2021 est en retard par rapport aux millésimes précédents. Malgré ça, les fréquences n'ont cessé d'augmenter jusqu'à la mi-août, quand la véraison et l'absence de précipitations a aidé à ralentir la sporulation du

mildiou. A cela s'est ajouté les épisodes gélifs en Mars, qui n'ont heureusement pas causé de dégâts sur les parcelles expérimentales.

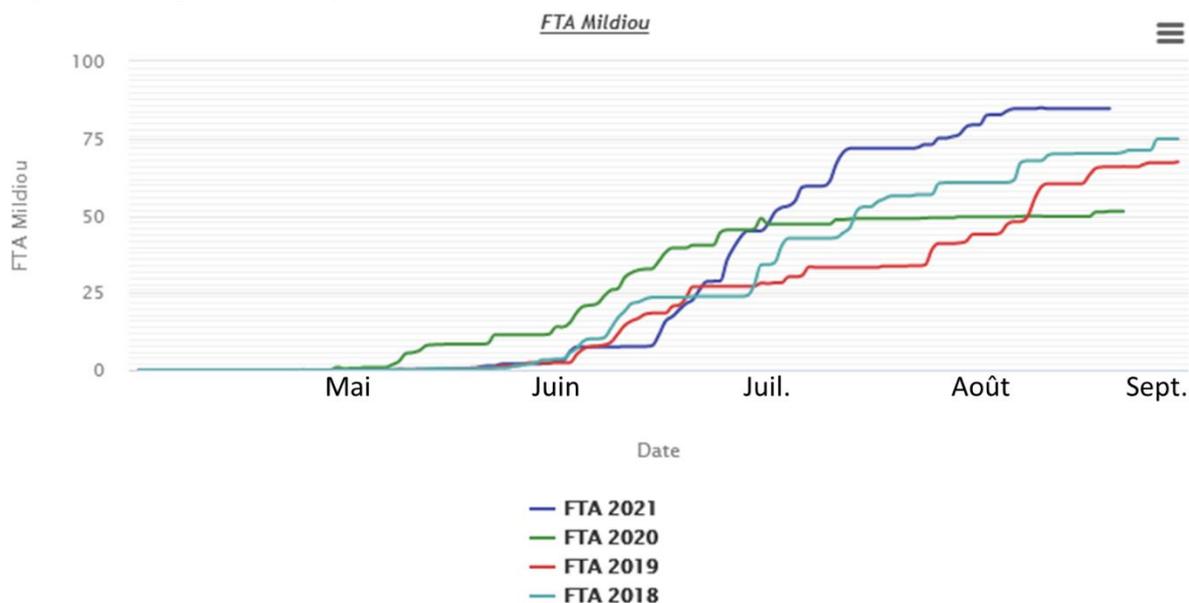


Figure 9 Fréquences d'attaques théoriques (%) de mildiou des millésimes 2018 à 2021 (source : Château Palmer, 2021).

3.1.2 Statut hydrique

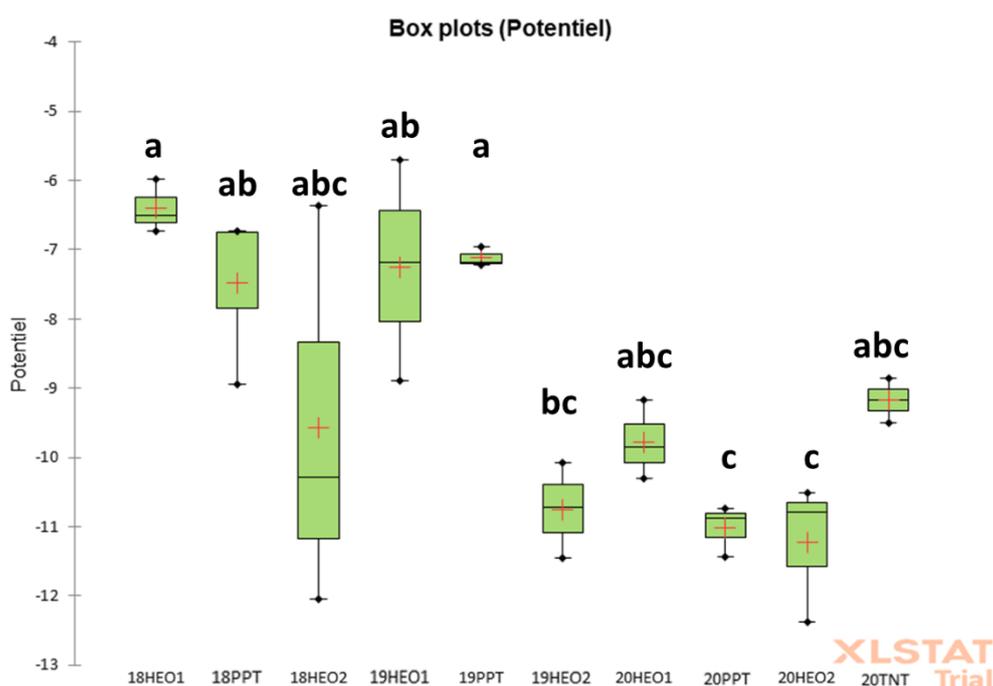


Figure 10 Analyse en box plots des valeurs de potentiel hydrique. Les lettres correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

Les résultats de mesures de potentiel hydrique sont présentés figure 10. On remarque que d'après les gammes de valeurs renseignées par l'IFV Occitanie, toutes les modalités sont en stress léger ou modéré. La date du 3 août correspond au dernier comptage, et permet d'avoir un petit aperçu d'un éventuel effet millésime. Un stress pendant ce millésime humide peut impliquer des variations plus marquées lors des millésimes plus secs. Il est intéressant de noter que la carte NDVI corrobore le stress hydrique moindre des modalités 18HEO1 et 18PPPT et le stress plus prononcé des modalités de la parcelle 20.

3.1.3 Statut azoté

Comme le montre la figure 11, la nutrition azotée est homogène entre toutes les modalités.

Il est intéressant de comparer avec la carte NDVI : la modalité 18HEO1 est effectivement la plus vigoureuse avec une meilleure nutrition azotée. Cependant, les modalités de Merlot (parcelle 20) sont visiblement bien servies en azote mais plus stressés au niveau de l'alimentation hydrique, d'où les valeurs de NDVI plus faibles.

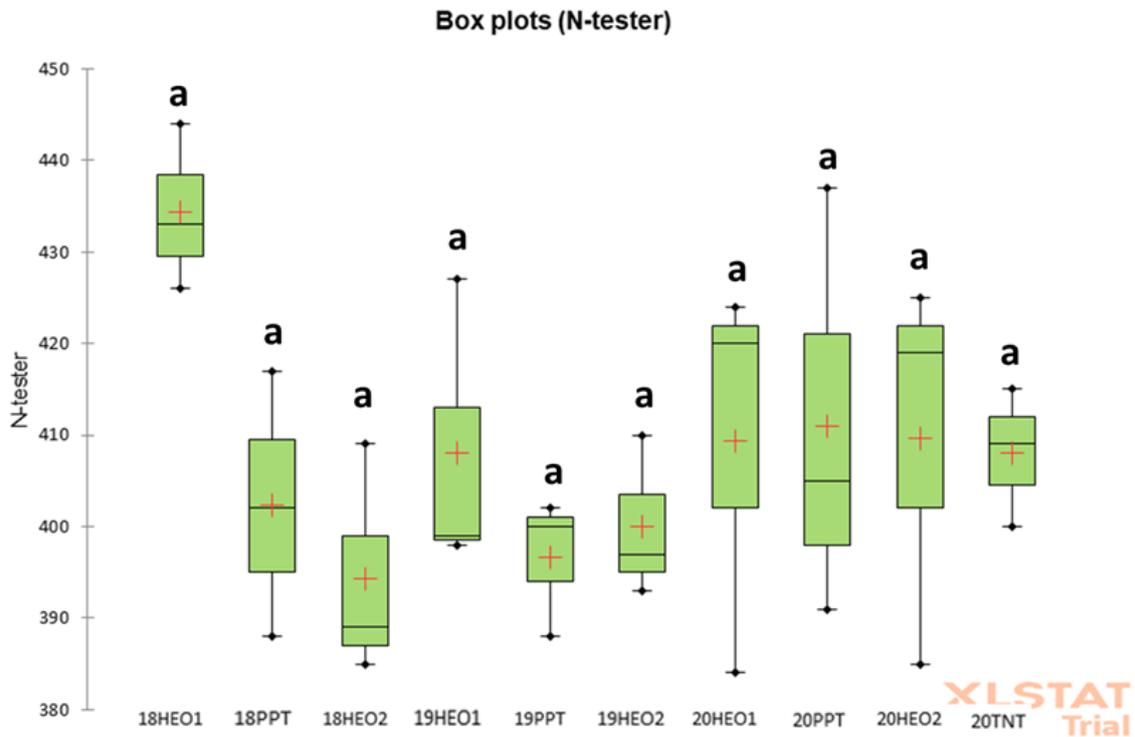


Figure 11 Analyse en box plots des valeurs de N-tester. Les lettres correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

3.2 RESULTATS DES DONNEES SUR FEUILLES

3.2.1 Par cépage

On s'intéresse d'abord aux fréquences d'attaque sur feuilles (FAF). Les résultats d'analyse des modalités de la parcelle 20, plantée en Merlot et possédant le seul témoin non traité sont exposés sur les figures 12 et 13. Ceux des modalités des parcelles 18 et 19, plantées en Cabernet Sauvignon et ne possédant pas de témoin non traité sont publiés en annexe.

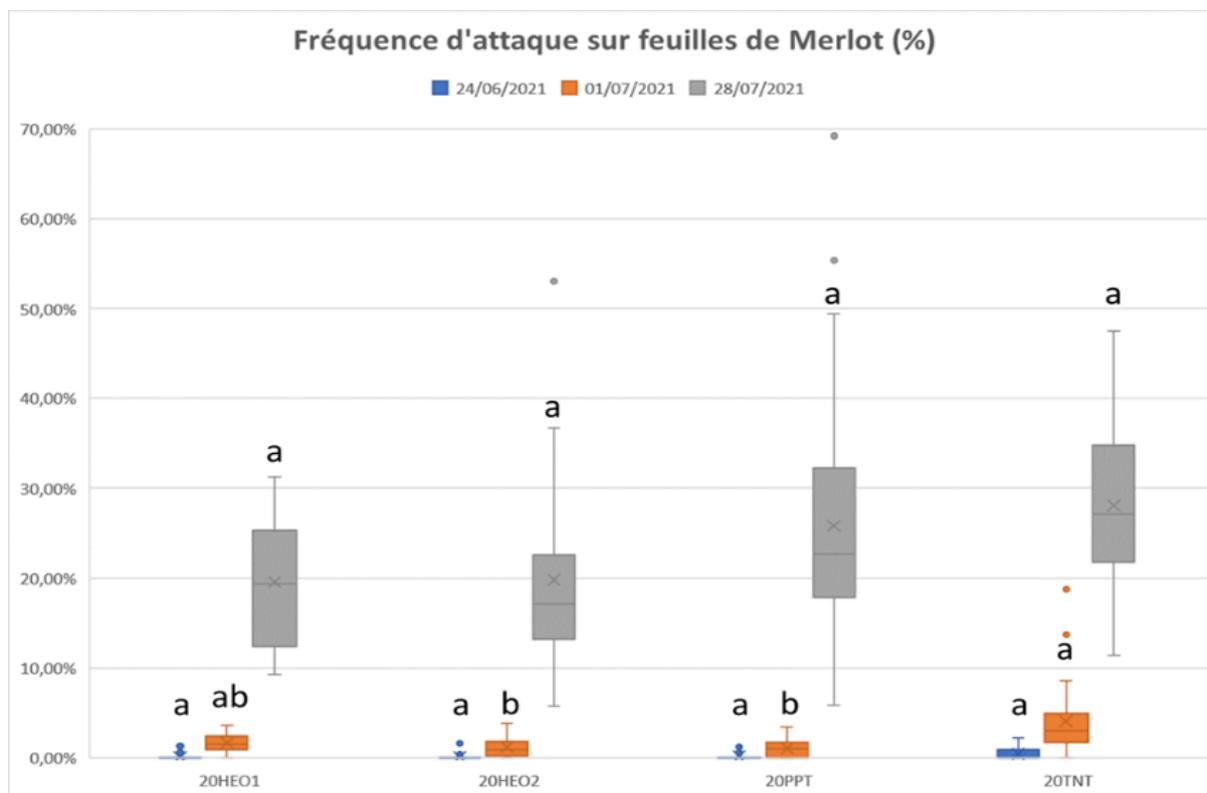


Figure 12 Résultats des fréquences d'attaques sur feuilles des modalités plantées en merlot pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

MERLOT : les tests statistiques (test non paramétrique pour comparer k échantillons - Kruskal-Wallis) permettent une petite distinction entre les modalités au second comptage (01/07/2021). Les lettres inscrites indiquent les groupes statistiques créés par le test de Dunn. Le premier et le dernier comptage ne font apparaître aucune différence statistique au niveau de la FAF. C'est-à-dire qu'en période de véraison, les différentes modalités sont touchées à la même fréquence. Les moyennes varient entre les modalités de 19% à 28%, pour une moyenne générale à 23%. Au second comptage, le témoin non traité est logiquement plus touché que les autres modalités. Au final, les traitements ne semblent pas se différencier sur la fréquence d'attaque du feuillage.

CABERNET : le 1^{er} comptage ne fait apparaître aucune différence statistique. Au 2^{ème} comptage, les 2 modalités en bas de parcelle en HEO (18HEO1 et 19HEO1) sont un peu plus touchées (respectivement les groupes ab et a, contre groupe b pour les autres modalités). Malgré des valeurs plus étalées (variance plus élevée), l'ensemble des modalités forment un seul et même groupe statistique au dernier comptage. Les résultats sur Cabernet sont similaires à ceux sur Merlot entre l'HEO et le PPT.

On s'intéresse ensuite aux intensités des attaques sur les feuilles contaminées (IAF) , présentées figure 13 pour les Merlots et en annexe pour les Cabernets.

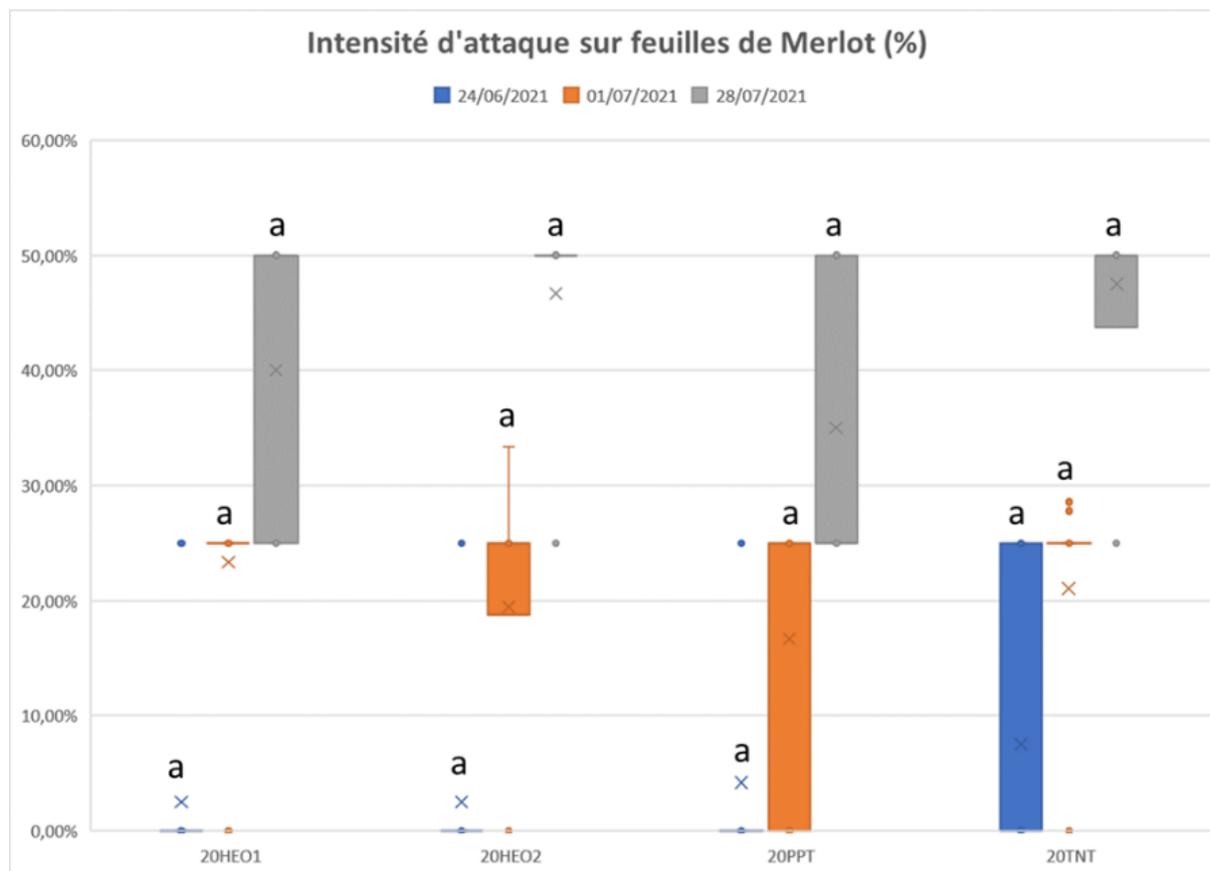


Figure 13 Résultats des intensités d'attaques sur feuilles des modalités plantées en merlot pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

MERLOT : L'intensité d'attaque est calculée à partir du niveau d'attaque sur chacune des feuilles touchées. A partir du second comptage, il n'était plus possible d'indiquer le niveau d'attaque pour chacune des feuilles attaquées. En effet, elles étaient trop nombreuses. On a donc fait pour les 2 derniers comptages une moyenne sur l'ensemble des feuilles touchées du pied. On remarque que quel que soit le comptage, aucune différence statistique n'apparaît, même par rapport au témoin non traité. Cela traduit la difficulté du millésime 2021 en termes de maladies cryptogamiques. Les moyennes s'étalent de 35% à 48%, pour une moyenne générale de 42%.

CABERNET : Les deux premiers comptages ne font apparaître aucune différence statistique entre les deux types de traitements. L'unique différence statistique au 3^{ème} comptage réside entre la modalité HEO du haut de parcelle (18HEO2) et le traitement propriété sur la parcelle 19 ; 18HEO2 étant plus intensément touchée, avec une moyenne de 44% de la surface de la feuille touchée quand attaquée, contre 31% sur la modalité en traitement propriété.

3.2.2 Entre cépages

On s'intéresse premièrement à la FAF. La figure ci-dessous montre que pour les deux premiers comptages, aucune différence statistique ne ressort. Toutes les modalités forment un unique groupe statistique « a ». Sur le dernier comptage, le TNT décroche et se différencie statistiquement des autres modalités. Les modalités statistiquement différentes du TNT appartiennent aussi bien aux traitements en HEO et PPT, sur Merlot et sur Cabernet.

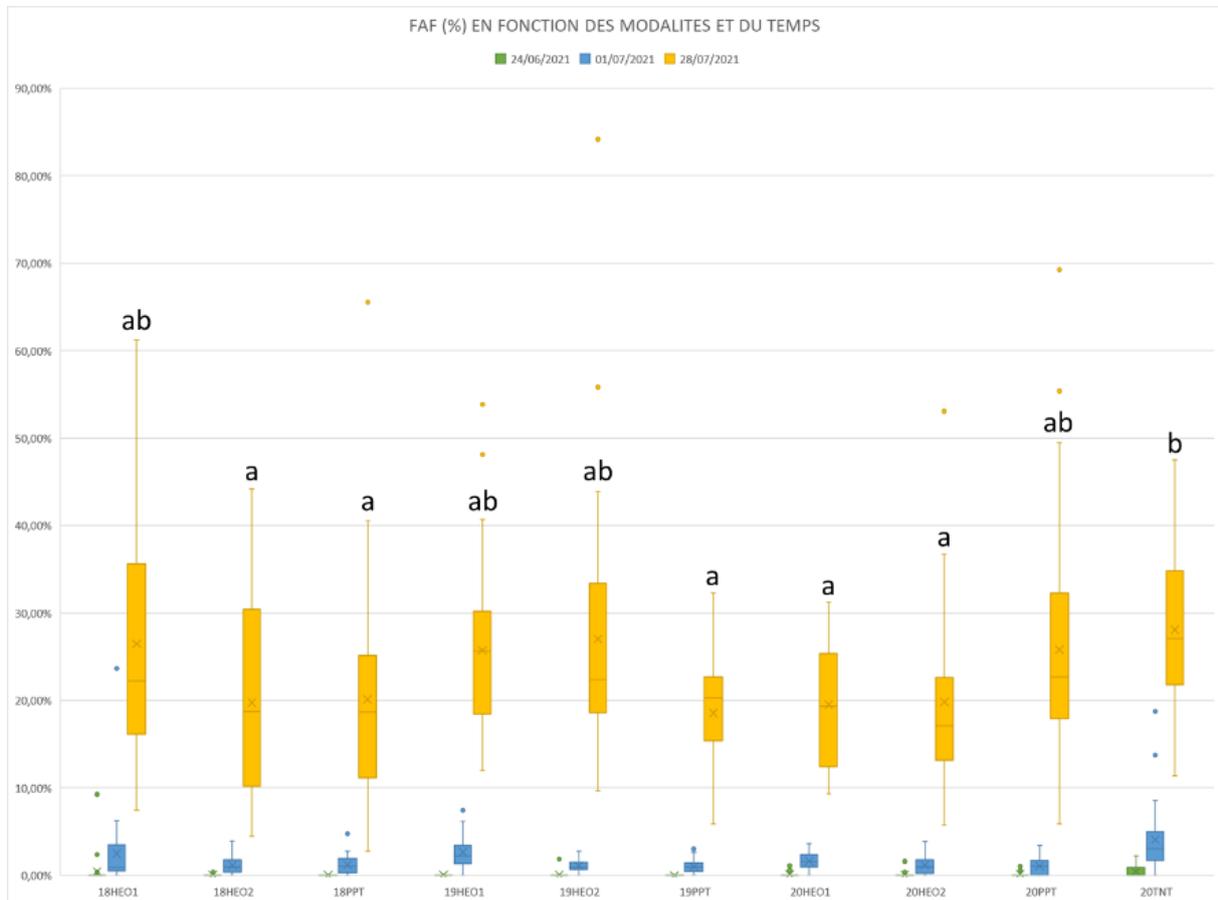


Figure 14 Résultats des fréquences d'attaques sur feuilles de toutes les modalités confondues pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

Les résultats de l'étude de l'IAF sont représentés sur la figure suivante. Au premier comptage, seules les modalités 20TNT et 19PPT diffèrent statistiquement. Ces différences sont lissées au second comptage, avec l'apparition d'un unique groupe statistique. Au dernier comptage, la modalité témoin et sa voisine (20HEO2) sont celles subissant les intensités d'attaque les plus élevées. Elles se différencient statistiquement de la modalité 19PPT. Toutes les autres modalités sont intermédiaires. On peut noter qu'à chaque comptage, les modalités les plus atteintes sont la modalité témoin et les modalités en HEO, les modalités en traitements propriété sont les moins atteintes en termes d'intensité.

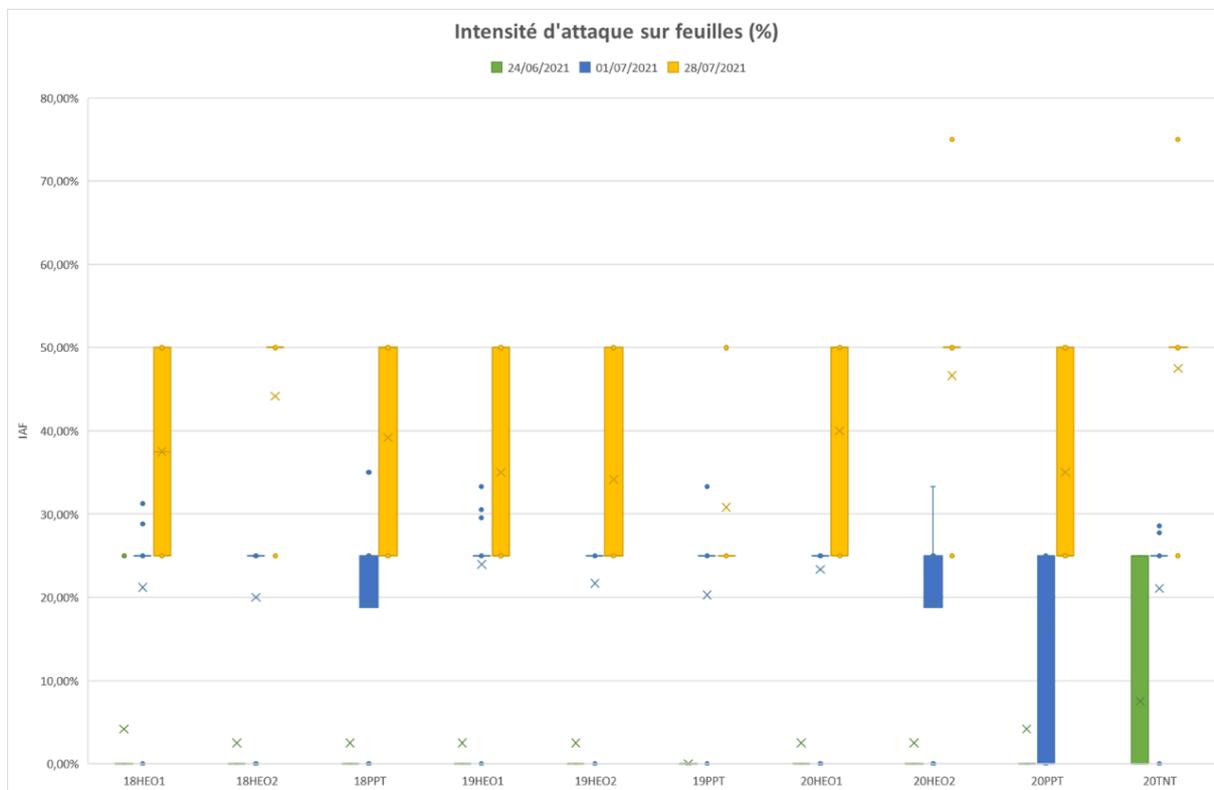


Figure 15 Résultats des intensités d'attaques sur feuilles de toutes les modalités confondues pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

3.3 RESULTATS DES DONNEES SUR GRAPPES

3.3.1 Par cépage

De même que pour l'analyse sur feuilles, on s'intéresse en premier lieu aux fréquences d'attaque sur grappes (figure 16) puis aux intensités d'attaque sur grappes (figure 17).

MERLOT : Au 1er comptage de FAG, le traitement en PPT est statistiquement moins touché que le TNT et la première modalité de HEO. La modalité 20HEO2 n'est statistiquement différente ni du TNT, ni de 20PPT. Le 2ème comptage présente plus ou moins le même profil avec comme seules vraies différences statistiques le TNT et 20PPT/20HEO2. Les groupes statistiques du 3ème comptage sont identiques à ceux du second. Seules les moyennes de FAG ont augmenté.

Pour les intensités d'attaque, le 1er comptage montre le même résultat que pour la FAG. De même pour le second comptage. Seule la modalité 20HEO1 n'est pas statistiquement différente du témoin non traité. Le 3ème comptage ne sort que 2 groupes. Le TNT contre les modalités traitées en HEO ou PPT.

CABERNETS : Au 1er comptage de FAG, seules les modalités 19HEO1 et 18HEO2 (bas de parcelle plus touché VS haut de parcelle) sont distinctes. Au 2ème comptage, toutes les modalités forment un unique groupe statistique malgré des valeurs étalées au sein de chaque modalité. De même pour le 3ème comptage.

Pour les IAG, le 1er comptage montre que 19HEO1 est la plus touchée et est statistiquement différente des traitements en huile essentielle sur les hauts de parcelle 18 et 19HEO2 ainsi que du traitement propriété 19PPT. Le 2ème comptage ne dévoile aucune différence statistique, mais des valeurs plus ou moins étendues en fonction des modalités. De même pour le 3ème comptage, malgré des variances moins élevées qu'au comptage précédent.

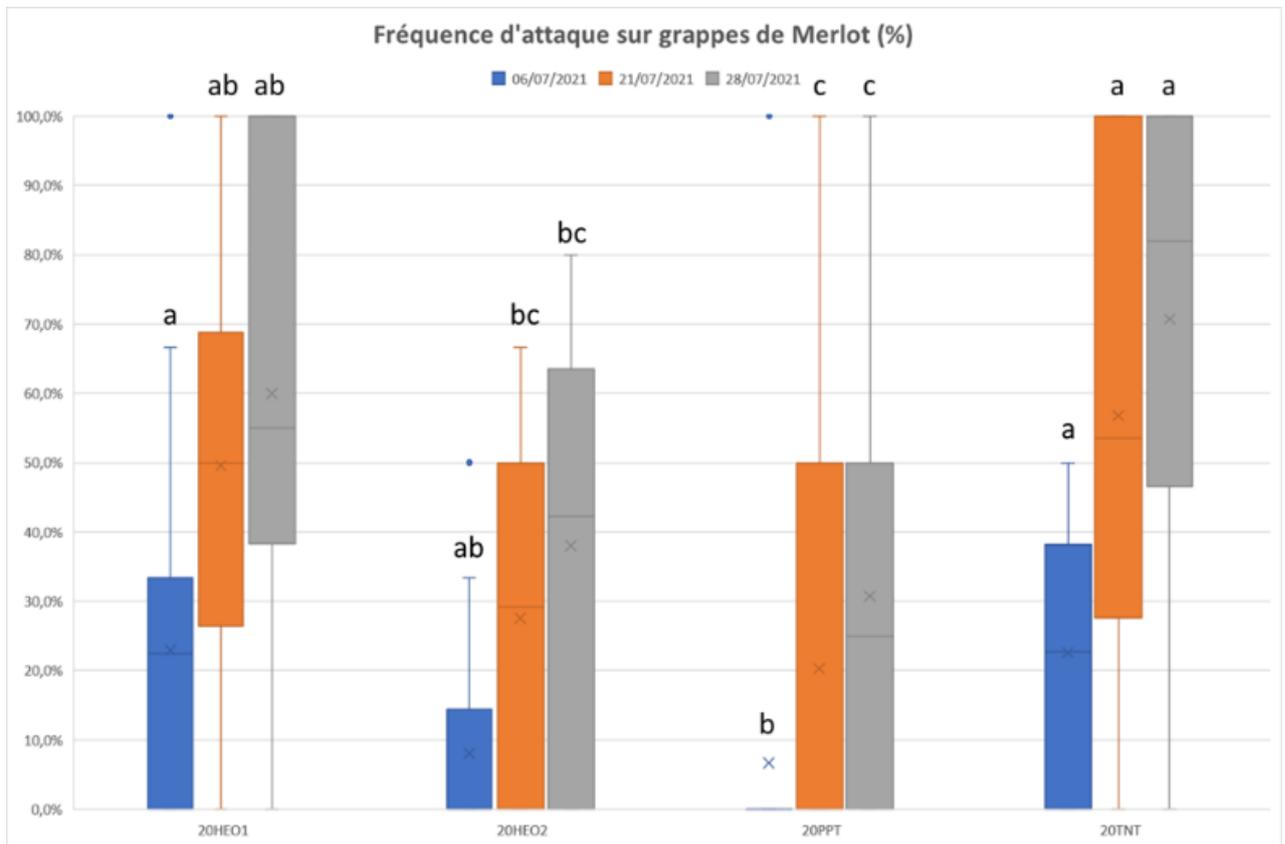


Figure 16 Résultats des fréquences d'attaques sur grappes des modalités plantées en merlot pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

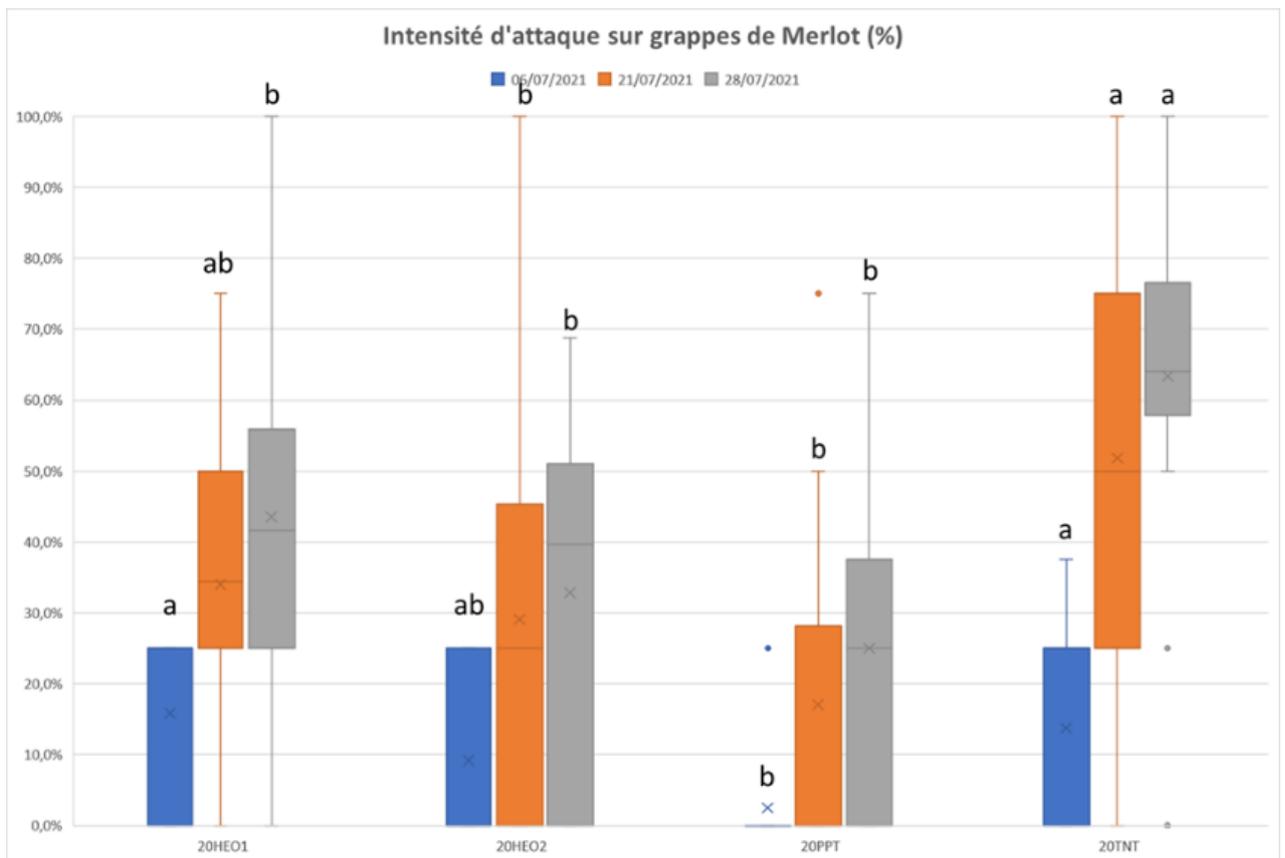


Figure 17 Résultats des intensités d'attaques sur grappes des modalités plantées en merlot pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

3.3.2 Entre cépages

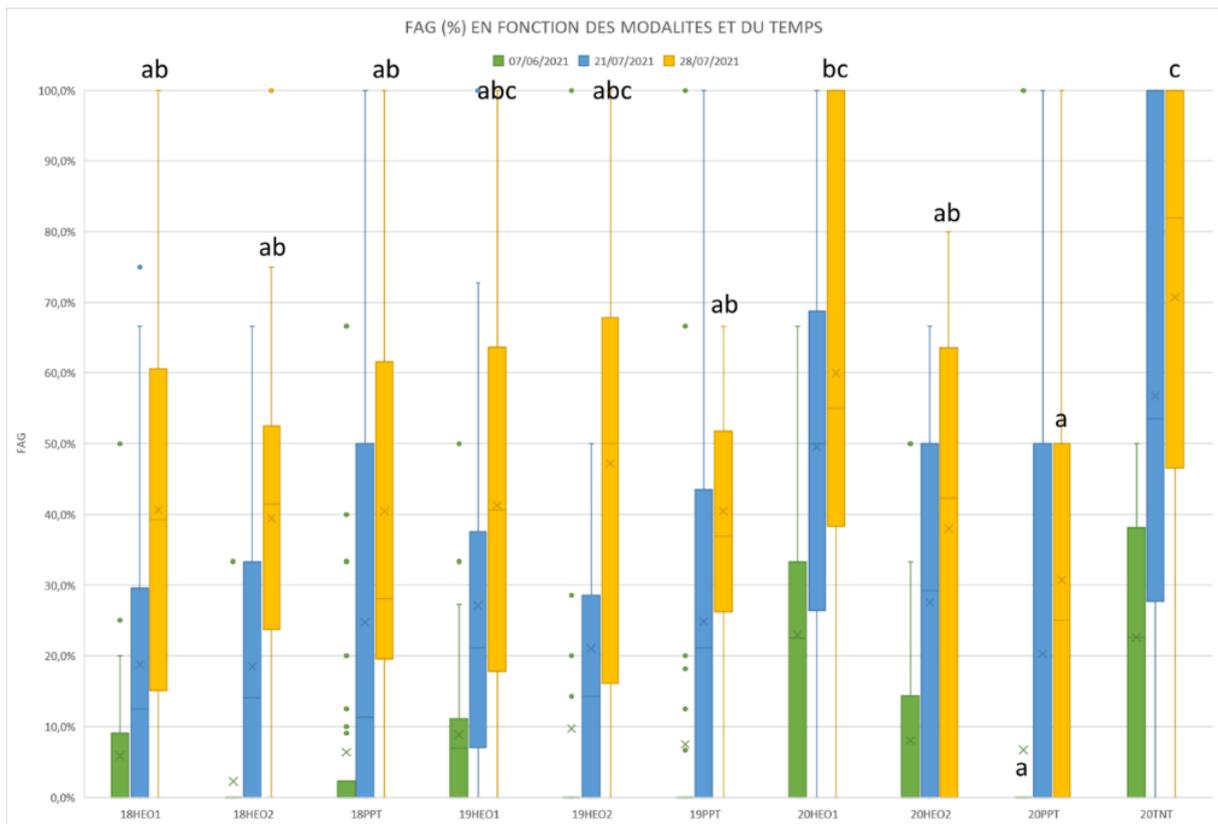


Figure 18 Résultats des fréquences d'attaques sur grappes de toutes les modalités confondues pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

La figure ci-dessus fait apparaître l'évolution des FAG sur chaque modalité en fonction du temps. Le premier comptage fait apparaître une différence entre les modalités témoin et 20HEO1, toutes les deux du merlot, et les modalités 18HEO2 et 20PPT, respectivement des modalités de Cabernet en traitement HEO et Merlot en traitement PPT. Le second comptage met en évidence que les 3 modalités en traitement PPT sont dans les moins touchées, contre les merlots en HEO pour les plus touchées. Les Cabernets en HEO forment les groupes intermédiaires, non différents statistiquement. Au dernier comptage, les modalités en PPT (sur merlot et cabernets) forment les groupes les moins touchés (groupes « a » et « ab »). Le témoin remplit son rôle et est seul pour former le groupe « c », plus touché. Les modalités en HEO sont intermédiaires, appartenant aux groupes « ab » ou « abc ».

Les résultats d'IAG sont présentés ci-après. Au premier comptage, les modalités en traitement PPT et la modalité 18HEO2 sont les moins intensément touchées en cas de grappes attaquées. Les modalités sur merlot 20TNT et 20HEO1 sont les plus atteintes. Le second comptage garde cette distribution, mais l'IAG du témoin dépasse celle de 20HEO1, ce qui démontre une efficacité du traitement HEO. Enfin, le dernier comptage met en lumière une différence notable entre les traitements HEO et PPT. En effet, les modalités en PPT sont toutes statistiquement différentes du témoin (groupes « a » et « ab » pour 18PPT), tandis que les modalités sur merlot en HEO ne sont pas distinctes du témoin (groupes « bc » et « abc »). Toutes les autres modalités sont dans le groupe intermédiaire « ab ».

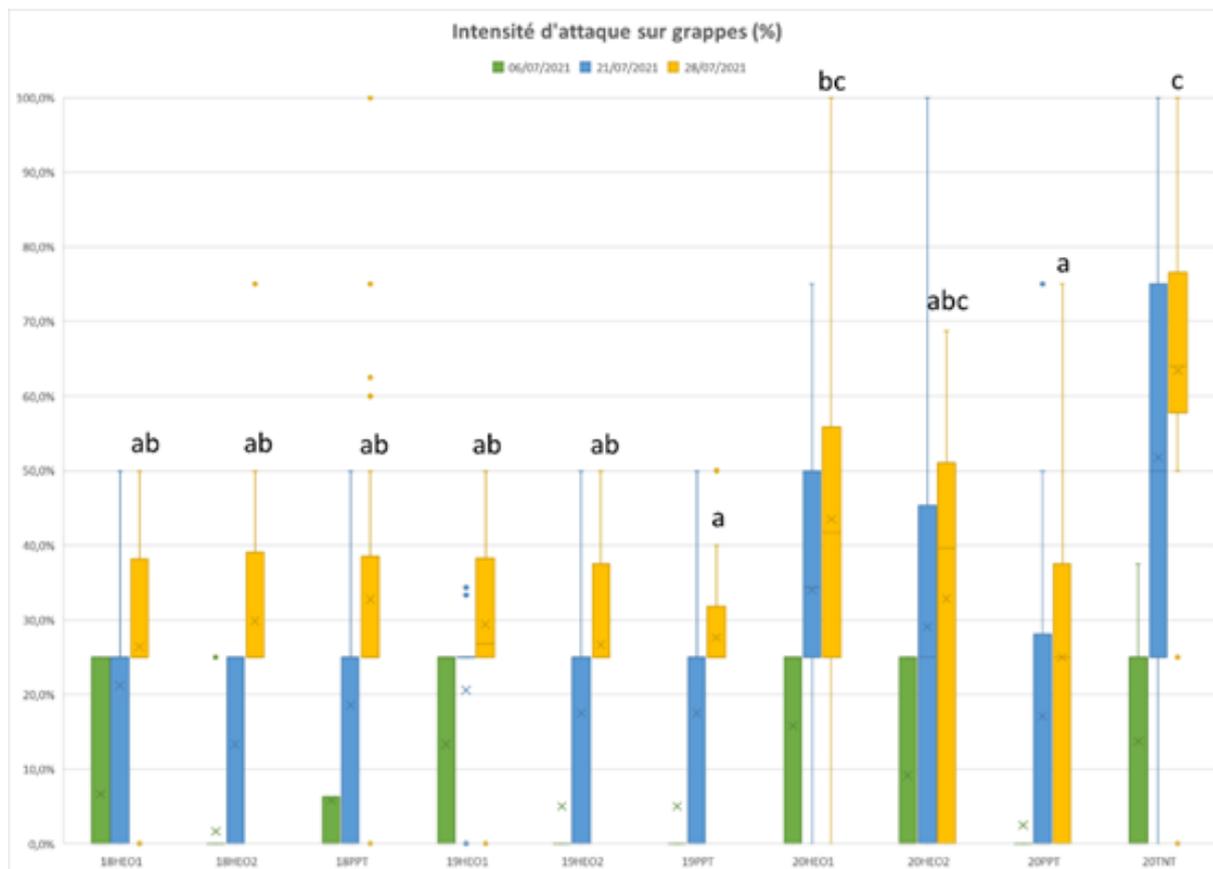


Figure 19 Résultats des intensités d'attaques sur grappes de toutes les modalités confondues pour les 3 comptages. Les lettres indiquées correspondent aux groupes statistiques significatifs à 95%.

3.4 RESULTATS DE LA CINÉTIQUE D'ATTAQUE

On utilise l'évolution du dégât en fonction du temps pour tracer la courbe « Disease Progress Curve », avec le dégât défini comme le produit de la fréquence d'attaque et de l'intensité d'attaque. Les courbes sont présentées en Annexe.

Les courbes d'évolution font apparaître différents comportements. En premier lieu, on observe clairement le décrochement rapide de la courbe du témoin (20TNT, sur merlot) et celle de la modalité 20HEO1 (modalité de merlot traité en HEO, enclavée entre le traitement PPT de la parcelle 20 et la modalité 19HEO2 donc géographiquement éloignée du TNT).

Le reste des modalités semble adopter un comportement similaire. Seules les modalités en HEO montrent des points d'inflexion plus prononcés que ceux des courbes des traitements en PPT. On rappellera que le dernier traitement avec utilisation d'huile essentielle a été pulvérisé le 15 juin, avant les premiers comptages sur feuilles et sur grappes. Le comportement plus linéaire des modalités sous traitement propriété, avec des pentes plus faibles que celles des modalités sous HEO tendent à montrer une meilleure efficacité des traitements sans huiles essentielles.

Les valeurs d'AUDPC présentées ensuite, traduisent la cinétique de contamination et de progression de la maladie. On observe que seules les modalités sur merlot 20TNT et 20HEO1 subissent des valeurs significativement supérieures aux autres modalités. Cependant, les moyennes des indicateurs observés sont dans la grande majorité des cas égales ou supérieures chez les modalités en huile essentielle que celles sans huile essentielle.

IV. ANALYSE DES RESULTATS

Cette dernière partie est consacrée à l'analyse des résultats présentés précédemment. L'auteur fera ensuite des recommandations pour l'amélioration des expérimentations futures et un dernier paragraphe sera consacré aux biais rencontrés lors de cette expérience.

Le millésime 2021 a été marqué par des événements météorologiques ayant une incidence sur les stades phénologiques. La période gélive d'avril a retardé le débourrement par rapport aux années précédentes. Ensuite, les pluies continues au printemps et les températures plus fraîches ont maintenu ce décalage temporel, avec notamment une floraison qui a mis un peu de temps à se terminer, mais avec une fertilité correcte.

Arrivé à mi-véraison, les dates de vendanges sont estimées à 60 jours. La mi-véraison a été atteinte dans la première moitié d'août. Cependant, la pression sanitaire et les conditions météorologiques changeantes ont précipité la récolte à fin septembre. Cette pression sanitaire a été responsable d'une perte de rendement, qui a été observée dans toute la région. Les épisodes pluvieux réguliers en juillet et août ont ralenti la maturation des baies et favorisé l'apparition du botrytis.

Après un mois d'Avril assez sec, le mois de Mai est arrivé avec beaucoup d'humidité et les premières tâches de mildiou sont apparues sur le vignoble. Celui-ci est apparu plus tardivement que pour les millésimes précédents (vers la mi-Mai en général). Malgré un départ lent, les signes de contamination se sont multipliés très vite après quelques jours de pluie le 25 juin. Les comptages hebdomadaires du suivi sanitaire au vignoble ont montré une progression constante des contaminations secondaires, malgré les traitements. Le millésime 2021 a donc été touché par une attaque particulièrement virulente de mildiou, et qu'il faudra prendre en compte dans cette analyse.

Suite aux résultats prometteurs sur l'année 2020 de l'utilisation de l'huile essentielle d'origan sur une petite parcelle expérimentale de merlot, Château Palmer a décidé de poursuivre l'expérimentation en augmentant la surface pour passer à une échelle « industrielle » avec l'utilisation de tracteurs, sur 3 parcelles plantées en Cabernet Sauvignon et Merlot. Les huiles essentielles sont une alternative naturelle aux traitements et ont prouvé leur pouvoir antifongique, antibactérien et antiviral *in vitro* (Rienth et al., 2019). L'auteur s'est appuyé sur l'expérience et les conseils d'Éric Petiot pour l'utilisation de ces huiles, notamment grâce à son livre « Soigner les Plantes par les huiles essentielles et les huiles végétales » publié en janvier 2019.

On rappellera que pour des raisons pratiques et sanitaires, un seul témoin non traité a pu être instauré par l'auteur, sur la parcelle de Merlot (parcelle 20). L'analyse de la fréquence d'attaque sur feuilles (FAF) sur les différentes modalités de traitements (20HEO 1 et 20HEO 2 pour les traitements à l'huile, 20PPT pour celui en traitement propriété et le témoin 20TNT) ne montre guère de différence sur les 3 comptages. De même, l'intensité d'attaque sur feuilles (IAG) ne semble pas se différencier statistiquement entre les différentes modalités et ce, pour les 3 comptages effectués. Le millésime exceptionnel d'un point de vue attaque de maladies cryptogamiques et les feuilles étant les premiers organes végétatifs à être touchés, cela ne semble pas aberrant. Cependant, en observant les valeurs médianes et moyennes de ces deux indicateurs, celles de la modalité en propriété est toujours inférieures aux autres et celles du témoin toujours les plus hautes. L'analyse de ces indicateurs sur les modalités en Cabernet (parcelles 18 et 19) montrent un comportement similaire avec des distinctions statistiques uniquement au niveau de l'IAF, avec notamment la modalité 19PPT qui est statistiquement moins touchées que les autres. Lorsque l'on compare les 2 cépages, on observe étonnamment des valeurs de pourcentages d'attaque et d'intensité voisines, malgré une sensibilité normalement accrue du Merlot au mildiou.

On s'intéresse maintenant à l'incidence du mildiou sur le rendement, autrement dit aux attaques sur grappes. On observe une évolution intéressante au niveau de la fréquence d'attaque. Le traitement en propriété est systématiquement différent du témoin. Cependant, les modalités en HEO se distinguent du témoin après le premier comptage. En termes d'intensité, la distinction avec le témoin est statistiquement plus marquée pour les modalités HEO. Elles appartiennent au même groupe que 20PPT. Il semble y avoir un effet « à retardement » sur les grappes. Les vignes protégées par l'huile essentielle montrent des signes de contamination plus tôt (FAG plus élevée aux premiers comptages), mais se font rattraper par la modalité en traitement propriété et ne subissent finalement pas d'attaques significativement plus forte que le traitement PPT. De même au sein des modalités de Cabernet Sauvignon, les FAG sont similaires sur les 3 comptages et les IAG ne montrent que très peu de différences statistiques entre traitement HEO et PPT.

L'analyse de l'intensité ne concerne que les grappes touchées par le mildiou. On s'intéresse maintenant au dégât, c'est-à-dire le produit de la fréquence par l'intensité, qui traduit l'influence réelle de *Plasmopara viticola* sur le rendement. Comme les résultats présentés dans les paragraphes précédents, la modalité témoin présente des dégâts significativement plus importants que les autres modalités dès le premier comptage. Seule la modalité 20HEO1, modalité de merlot traitée en HEO et enclavée entre le traitement PPT de la parcelle 20 et la modalité 19HEO2 donc géographiquement éloignée du TNT, présente un comportement similaire au témoin. Or, cette modalité présente un stress hydrique plus faible que les autres et est très vigoureuse. Elle est donc plus sensible au développement du mildiou. Le traitement à l'huile n'a pas été suffisant pour limiter suffisamment la croissance du pathogène. Cependant, toutes les autres modalités présentent une cinétique voisine. On a donc une certaine efficacité du traitement à l'huile essentielle de prouée.

Il est important de noter que l'efficacité des traitements aux huiles essentielles est très dépendante du type d'application et de son timing (Rienth et al., 2019). L'utilisation des tracteurs pour cette expérimentation a soulevé de nombreuses questions comme la préparation des produits, la bonne homogénéisation dans la cuve du pulvérisateur, les interactions entre les molécules actives des huiles avec le savon noir et les produits cupriques...

Il a été montré que la phase vapeur des huiles a été prouvée plus efficace in vivo que la phase liquide à cause d'une adhésion diminuée. L'utilisation du savon noir est donc primordiale par son rôle de surfactant et d'adjuvant pour améliorer la miscibilité des huiles dans la bouillie bordelaise. L'utilisation de ces différents produits nécessite un gros travail de préparation par les tractoristes pour chaque traitement, sans compter les odeurs puissantes et les produits dangereux car l'huile essentielle peut être irritante et cancérigène.

De nombreuses pistes d'amélioration dans l'utilisation des huiles essentielles comme alternatives naturelles au cuivre sont à l'étude. Notamment pour utiliser la phase gazeuse. Une des solutions à l'étude est l'installation de couverts de plantes aromatiques qui libéreront naturellement pendant la saison les molécules actives (phénols). Cela pose néanmoins des questions pratiques au niveau des itinéraires techniques par exemple pour les travaux du sol et la destruction des couverts. L'utilisation de tracteurs enjambeurs permettrait alors de mettre en place un couvert un rang sur deux par exemple. Une autre possibilité est d'emprunter à la confusion sexuelle les boîtiers autonomes pour pulvériser à intervalles réguliers et de façon continue sur la saison les huiles essentielles directement dans l'air environnant des vignes. Les problèmes liés à cette méthode sont plutôt de l'ordre logistique et économique, car 1 litre d'huile essentielle d'origan coûte environ 300 euros.

Un autre aspect intéressant soulevé par Éric Petiot est la réflexion sur le microclimat des feuilles et grappes lors de l'application des traitements, des huiles ou encre des tisanes. Lors de ces applications, ce microclimat devient plus humide et devient en théorie propice au développement des pathogène cryptogames comme le mildiou. C'est pourquoi, l'utilisation

d'une dose de cuivre plus faible associée à une huile essentielle qui tend à assécher le milieu peut permettre une meilleure gestion de cette humidité.

Certains points de la mise en place de l'expérimentation pourraient être développés un peu plus en profondeur, notamment au niveau des modalités de traitement. En effet, nous avons parlé précédemment du microclimat, il aurait été intéressant d'installer une modalité de traitement avec seulement 80% de la dose de cuivre du traitement propriété sans huile essentielle. De même, il aurait pu être judicieux de poursuivre l'utilisation d'huile essentielle jusqu'aux premiers signes sur feuilles de mildiou et non pas simplement jusqu'à l'encadrement de la floraison. Cela aurait sans doute pu permettre une meilleure action préventive de l'huile essentielle. Enfin, quand le TNT a finalement commencé à être traité, l'auteur aurait aimé pouvoir mettre en place une modalité de traitement du TNT avec de l'huile essentielle pour pouvoir comparer l'efficacité en curatif des 2 types de traitements. Seulement, un des objectifs de cette étude étant la mise à l'échelle industrielle d'un traitement aux huiles essentielle, et par conséquent l'utilisation de tracteurs devenant obligatoire, il a été trop compliqué logistiquement parlant de mettre ces modalités en place.

Concernant les biais de cette expérimentation, 3 aspects ressortent principalement, le principal étant le nombre de personnes nécessaire pour effectuer les comptages en temps et en heure. Malgré une mise en pratique précédée de nombreuses explications et mises au point, le facteur humain n'en reste pas supprimer. En effet, les vignes n'étant pas rognées mais tressées, des erreurs de comptage auraient pu apparaître. Le décalage phénologique de quelques jours entre les merlots et les cabernets sauvignon peuvent également être une source d'erreurs. Enfin, concernant le traitement statistique des données, les facteurs « stress hydrique » et « statut azoté » n'ont pu être directement intégré aux modèles statistiques (par exemple analyse par ANOVA à effet imbriqué) car les populations des différentes modalités ne suivaient pas de répartition normale.

CONCLUSION

Le millésime 2021 fut capricieux, avec notamment des périodes humides à répétition qui ont empêché d'avoir un stress hydrique aux moments souhaités et qui ont ralenti la maturation des raisins. De nombreuses contraintes à la vigne ont émergées tout au long de la saison avec d'abord la vague de gelée noire en avril, puis une humidité persistante de la fin du Printemps jusqu'aux vendanges, une pression sanitaire du mildiou et du botrytis forte et un retard phénologique par rapport aux millésimes précédents. L'oomycète *Plasmopara viticola* est apparu tardivement, avec les premières tâches sur jeunes feuilles début juin. Malgré ce départ lent, ce dernier s'est développé rapidement et de façon continue dès la fin juin. Les traitements n'ont pas réussi à complètement endiguer sa croissance sur le vignoble.

Ce cryptogame est une vraie plaie pour les vignobles en agriculture biologique et biodynamique car le seul moyen de lutte efficace connu et autorisé à ce jour reste les produits à base de cuivre. Or, il est de notoriété publique que ce métal lourd a un gros impact sur les sols et leurs faunes. L'objectif de cette étude est de vérifier l'utilisation d'huiles essentielles, et plus particulièrement celle d'origan, comme alternative à ces produits cupriques. Des essais ont démarré en 2020 sur une petite surface et la saison 2021 a marqué le développement de l'étude à une échelle plus industrielle avec l'utilisation de tracteurs-pulvérisateurs. Cette étude est intégrée dans une démarche globale de Château Palmer de respect de l'environnement et d'enrichissement de sa biodiversité.

Dans le but d'adapter leurs stratégies de traitement plus précisément et de renforcer la vigueur naturelle de leurs vignes, Château Palmer s'est tourné vers la biodynamie en 2013. Un des piliers lors de la saison de traitements est l'utilisation de tisanes, réfléchi en fonction des conditions météorologiques et de l'état des vignes. Les huiles essentielles sont donc apparues comme une alternative naturelle pour la réduction des doses de cuivre, ayant d'ailleurs été prouvées comme efficaces dans leur action antifongique en milieu *in vitro*.

L'huile essentielle a montré des résultats encourageant malgré un millésime très propice au développement du mildiou. Bien que ceux-ci aient été statistiquement un peu moins forts que ceux présentés par le traitement classique de la propriété avec seulement de la bouillie bordelaise à une dose un peu plus élevée, l'huile essentielle associée à une dose réduite de bouillie reste efficace. On peut penser que c'est une bonne alternative pour les millésimes plus chauds et/ou plus secs. Cependant, il faut garder en mémoire que les huiles essentielles ont une action préventive et peuvent conduire à la nécrose des tissus en cas d'utilisation abusive. Il est également important de réfléchir le moment d'application de ces huiles car ce sont des molécules instables, sensibles aux variations de températures et dégradées par la lumière. Enfin, l'huile a été utilisée ici sous phase liquide, mélangée aux traitements dans les cuves des tracteurs. Or il a été prouvé que sa phase vapeur aurait démontré une meilleure efficacité. De nombreuses voies d'amélioration sont à l'étude avec notamment la plantation de couverts de plantes aromatiques ou l'utilisation de petits pulvérisateurs autonomes placés à la vigne comme pour la confusion sexuelle.

Après cette expérience, la compréhension de l'influence des conditions climatiques comme l'humidité ou la température sur les huiles essentielles reste imparfaite. Une voie d'amélioration pour l'adaptation des stratégies de traitements est donc cet aspect de contrôle du microclimat des vignes et son impact sur les différents produits utilisés.

Enfin, il est primordial de garder en mémoire que ces expérimentations sont menées non pas pour résoudre simplement au cas par cas les problèmes rencontrés à la vigne, mais pour corriger sur le long terme tout déséquilibre observé. C'est ce qui encourage Château Palmer à poursuivre des expérimentations pour un meilleur respect de leurs vignes et de leur environnement, surtout lors de millésimes capricieux comme ont pu l'être les millésimes 2018 et 2021.

Références bibliographiques

- Adriano, D.C. (2005). Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. *Springer*, New York.
- Angioni, A., Barra, A., Coroneo, V., Dessi, S., & Cabras, P. (2006). Chemical composition, seasonal variability, and antifungal activity of *Lavandula stoechas* L. ssp. *Stoechas* essential oils from stem/leaves and flowers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 4364-4370.
- Ash, G. (2000). Downy mildew of grape. *The Plant Health Instructor*. DOI: 10.1094/PHI-I-2000-1112-01
- Aziz, A., Trotel-Aziz, P., Dhucq, L., Jeandet, P., Couderchet, M., & Vernet, G. (2006). Chitosan oligomers and copper sulfate induce grapevine defense reactions and resistance to gray mold and downy mildew. *Phytopathology* 96, 1188-1194.
- Baize, D. (1997). Teneurs Totales en Elements Traces Metalliques dans les Sols Francais. References et Strategies d'Interpretation. INRA Editions, Paris
- Baker, D.E., Senft, J.P. (1995). Copper. In: Alloway, B.J. (Ed.), *Heavy Metals in Soils*, 2nd edition Blackie Academic and Professional, Glasgow, pp. 177-205.
- Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils - A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46(2), 446-475.
<https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106>
- Baldacci E., & Refatti, E. (1956). La lotta contro le due maggiori ampelopatie: peronospora (*Plasmopara viticola*) e oidio (*Uncinula necator*) in relazione alla conoscenza dei periodi di incubazione e dei cicli biologici. *Annali della Facoltà di Agraria di Milano* 35 (V), 151-178.
- Bektas, Y., & Eulgem, T. (2015). Synthetic plant defense elicitors. *Frontiers in Plant Science*, 5:804.
- Blancard, D. (2016). Ephytia-Inra : Vigne - Biologie, epidemiologie. [En ligne].
<http://ephytia.inra.fr/fr/C/6967/Vigne-Biologie-epidemiologie>.
- Bolan, N., Adriano, D., Mani, S. & Khan, A. (2003). Adsorption, complexation, and phytoavailability of copper as influenced by organic manure. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22: 450 - 456.
- Buonassisi, D., Colombo, M., Migliaro, D., Dolzani, C., Peressotti, E., Mizzotti, C., Velasco, R., Masiero, S., Perazzolli, M., & Vezzulli, S. (2017). Breeding for grapevine downy mildew resistance: A review of “omics” approaches. *Euphytica*, 213(5), 103.
<https://doi.org/10.1007/s10681-017-1882-8>
- Caffi, T., Gilardi, G., Monchiero, M., & Rossi, V. (2013). Production and release of asexual sporangia in *Plasmopara viticola*. *Phytopathology* 103: 64-73.

CERTIS EUROPE. 2020. Produits fongicides.
<https://www.certiseurope.fr/produits/fongicides/>.

Ciaffi, M., Paolacci, A. R., Paolocci, M., Alicandri, E., Bigini, V., Badiani, M., & Muganu, M. (2019). Transcriptional regulation of stilbene synthases in grapevine germplasm differentially susceptible to downy mildew. *BMC Plant Biology*, 19(1), 404.

<https://doi.org/10.1186/s12870-019-2014-5>

Coll, P., Le Cadre, E., Blanchart, E., Hinsinger, P., & Villenave, C. (2011). Organic viticulture and soil quality: A long-term study in Southern France. *Appl Soil Ecol* 50:37-44.

Dagostin, S., Formolo, T., Giovannini, O., Pertot, I., & Schmitt, A. (2010). *Salvia officinalis* extract can protect grapevine against *Plasmopara viticola*. *Plant Disease* 94, 575-580.

Demeter. Viticulture et vinification sur un domaine Demeter 2020. 27/10/2020
<https://www.demeter.fr/wp-content/uploads/2020/06/FT-Demeter-2020-Viticulture-etvinification>.

Dercks, W., & Creasy, L.L. (1989). The significance of stilbene phytoalexins in the *Plasmopara viticola*- grapevine interaction. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 34, 189-202.

[https://doi.org/10.1016/0885-5765\(89\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0885-5765(89)90043-X)

Evans, L. J. (1989). Chemistry of metal retention by soils. *Environmental Science and Technology*, 23: 1046-1056.

Galet, P. (1999). *Precis de Pathologie Viticole*. 3eme edition. Edition Pierre Galet. 296 pages.

Gessler, C., Pertot, I., & Perazzolli, M. (2011). *Plasmopara viticola*: A review of knowledge on downy mildew of grapevine and effective disease management. *Phytopathologia Mediterranea*, 50(1), 44.

Gindro, K., Spring, J.L., Pezet, R., Richter, H., & Viret, O. (2006). Histological and biochemical criteria for objective and early selection of grapevine cultivars resistant to *Plasmopara viticola*. *Vitis*, 45, 191-196

Gindro, K., Alonso-Villaverde, V., Voinesco, F., Spring, J.L., Viret, O., & Dubuis, P.H. (2012). Susceptibility to downy mildew in grape clusters: New microscopical and biochemical insights. *Plant Physiology and Biochemistry*. 52, 140-146.

Gisi, U., & Sierotzki, H. (2008). Fungicide modes of action and resistance in downy mildews. (Special Issue: The downy mildews - genetics, molecular biology and control.). *European Journal of Plant Pathology* 122, 157- 167.

Gomes, E., & Coutos-Thevenot, P. (2009). Molecular Aspects of grapevine-pathogenic fungi interactions. In: Roubelakis-Angelakis KA, editor. *Grapevine Molecular Physiology & Biotechnology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 407-428.

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (1992). Trace Elements in Soils and Plants. *Pendias – CRC Press*, London, 342 pp.

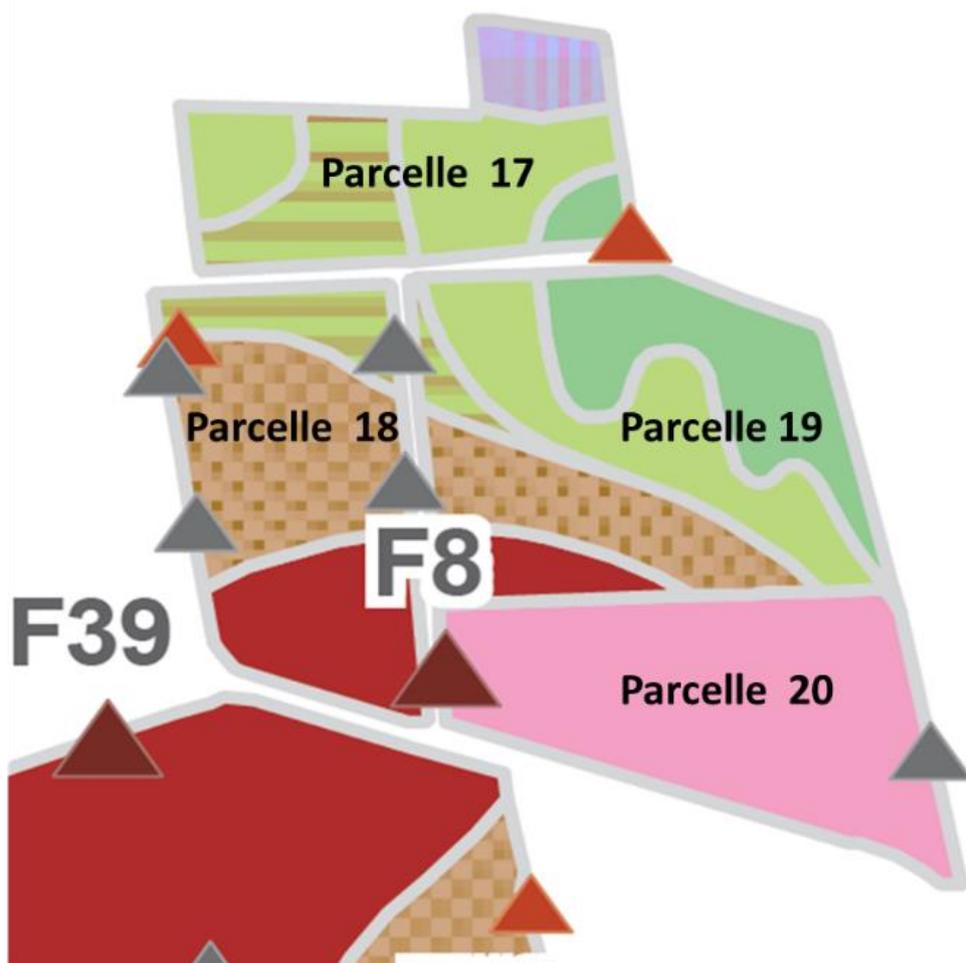
- Kennelly, M.M., Gadoury, D. M., Wilcox, W. F., Magarey, P. A., & Seem, R.C. (2007). Primary Infection, Lesion Productivity, and Survival of Sporangia in the Grapevine Downy Mildew Pathogen *Plasmopara viticola*. *Phytopathology* 97, 512-22.
- Llorens, N., Arola, L., Blade, C., & Mas, A. (2000). Effects of copper exposure upon nitrogen metabolism in tissue cultured *Vitis Vinifera*. *Plant Science*, 160: 159-163.
- Mackie, K.A., Muller, T., Zikeli, S., & Kandeler, E. (2013). Long-term copper application in an organic vineyard modifies spatial distribution of soil micro-organisms. *Soil Biol Biochem* 65:245-253.
- Mallet, A. C. T., Cardoso, M. G., Souza, P. E., Machado, S. M. F., Andrade, M. A., Nelson, D. L., Piccoli, R. H., & Pereira, C. G. (2014). Chemical characterization of the *Allium sativum* and *Origanum vulgare* essential oils and their inhibition effect on the growth of some food pathogens. *Revista Brasileira de Plantas Medicinai*s, 16(4), 804-811.
- Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants. *Cambridge Academic Press*, Cambridge, 889 pp.
- Martens, D. C., & Westerman, D. T. (1991). Fertilizer applications for correcting micronutrient deficiencies. In: Micronutrients in agriculture - *The Soil Science Society of America Book Series*, No. 4: 549-592.
- Petiot, E. (2019). Soigner les plantes par les huiles essentielles et les huiles végétales (Vol. 10). Editions de Terran.
- Pezet, R., Gindro, K., Viret, O., & Richter, H., (2004). Effects of resveratrol, viniferins and pterostilbene on *Plasmopara viticola* zoospore mobility and disease development. *Vitis*, 43, 145-148.
- Pieterse, C. M. J., Does, D. V. d., Zamioudis, C., Leon-Reyes, A., Wees, S.C.M.V. (2012). Hormonal modulation of plant immunity. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 28(1): 489-521
- Pimentel, D. (2005). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States'. *Environment, Development, Sustainability*, 7:229-252. doi:10.1007/s10668-005- 7314-2
- Pina-Vaz, C., Goncalves Rodrigues, A., Pinto, E., Costa-de-Oliveira, S., Tavares, C., Salgueiro, L., et al. (2004). Antifungal activity of *Thymus* oils and their major compounds. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 18(1): 73-78.
- Pool, R.M., Creasy, L.L., & Frackelton, A.S. (1981). Resveratrol and the viniferins, their application to screening for disease resistance in grape breeding programs. *Vitis*, 20, 136- 145.
- Probst, B., Schuler, C., & Joergensen, R.G. (2008). Vineyard soils under organic and conventional management—microbial biomass and activity indices and their relation to soil chemical properties. *Biol Fert Soils* 44:443-450.

- Rienth, M., Crovadore, J., Ghaffari, S., & Lefort, F. (2019). *Oregano essential oil vapour prevents Plasmopora viticola infection in grapevine (Vitis Vinifera) by triggering autoimmune metabolic pathways*
- Rossi, V., Caffi, T., & Gobbin, D. (2013). Contribution of molecular studies to botanical epidemiology and disease modelling: grapevine downy mildew as a case-study. *European Journal of Plant Pathology* 135, 641-54.
- Rumbolz J., Wirtz, S., Kassemeyer, H. H., Guggenheim, R., Schafer, E., & Buche, C. (2002). Sporulation of *Plasmopara viticola*: differentiation and light regulation. *Plant Biology* 4, 413-422.
- Santino, A., Taurino, M., De Domenico, S., Bonsegna, S., Poltronieri, P., Pastor, V., et al. (2013). Jasmonate signaling in plant development and defense response to multiple (a)biotic stresses. *Plant Cell Reports*, 32(7): 1085-1098.
- Schnee, S., Viret, O., & Gindro, K. (2008). Role of stilbenes in the resistance of grapevine to powdery mildew. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 72, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2008.07.002>
- Soylu, E.M., Kurt, Ş., & Soyly, S. (2010). In vitro and in vivo antifungal activities of the essential oils of various plants against tomato grey mould disease agent *Botrytis cinerea*. *International Journal of Food Microbiology*, 143(3): 183-189.
- Steiner R. (2005). Geisteswissenschaftliche Grundlagen zum Gedeihen der Landwirtschaft. Rudolf Steiner Verlag, Dornach.
- Toth, G., Hermann, T., Da Silva, M.R., & Montanarella, L. (2016a). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environmental International*. 88, 299-309.
- Toth, G., Hermann, T., Szatmari, G., & Pasztor, L. (2016b). Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of the Total Environment*. 565, 1054-1062.
- Van der Perk, M., Jetten, V., Heskes, E., Segers, M., & Wijntjens, I. (2004). Transport and retention of copper fungicides in vineyards. In: V. Golosov, V. Belyaev, and D.E. Walling (Editors), *Sediment transfer through the fluvial system* (Proceedings of a symposium held in Moscow, August 2004), IAHS 288: 437-443.
- Viret, O., & Gindro, K., (2014). Maladies Fongiques. Collection La Vigne. Volume 1. Edition Amtra. 255 pages.
- Viticulture: des traitements plus précis contre le mildiou (27/10/2020). La Nouvelle République. <https://www.lanouvellerepublique.fr/indre-et-loire/commune/saintnicolas-de-bourgueil/viticulture-des-traitements-plus-precis-contre-le-mildiou>
- Vogt G. (2007). The origins of organic farming. *In Organic Farming: An International History*.

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 - Carte pédologique des parcelles expérimentales (Château Palmer, 2020)	38
ANNEXE 2 - Résultats de l'analyse par chromatographie en phase gazeuse de l'huile essentielle d'origan (<i>Origanum compactum</i>) (Château Palmer, 2020)	39
ANNEXE 3 - Détail des produits à base de cuivre utilisés par Château Palmer	40
ANNEXE 4 - Echelle d'intensité du mildiou proposé par le Bulletin Santé Végétal (Chambre d'Agriculture de la Gironde, 2017)	40
ANNEXE 5 - Résumé des précipitations, dates et doses d'application des traitements et apparition du mildiou	41
ANNEXE 6 - Extrait de la base de données utilisée pour les analyses statistiques	41
ANNEXE 7 - Exemple de test statistique de Kruskal-Wallis suivi du test de comparaisons multiples de Dunn	41
ANNEXE 8 - Résultats des comptages de FAF et IAF sur les modalités de Cabernet Sauvignons	41
ANNEXE 9 - Résultats des comptages de FAG et IAG sur les modalités de Cabernet Sauvignons	41
ANNEXE 10 - Courbes d'évolution des dégâts sur grappes de chaque modalité	41
ANNEXE 11 - Script R de la fonction de calcul de l'AUDPC et les valeurs calculées pour chaque modalité	41

ANNEXE 1 - Carte pédologique des parcelles expérimentales (Château Palmer, 2020)



Sols issus ou liés à la terrasse de graves T4

- UC 1a – BRUNISOL graveleux issu de graves argilo-sableuses bariolées (2008 - F1; 2020 - F39,F42)
- UC 4 – LUVISOL sablo graveleux issu de graves argilo-sableuses bariolées (2020 - F12)
- UC 6 – BRUNISOL gravelo-sableux à tendance rédoxique issu de sables grossiers argileux (2008 - F36)

Sols issus du substratum géologique éocène

- UC 18a – PLANOSOL TYPIQUE sableux sur plancher d'argiles lourdes (2008 - F8)
- UC 18b – PLANOSOL DISTAL sablo graveleux sur plancher d'argiles lacustres (2014 P13 - F15)
- UC 19 – CALCISOL argileux issu de mames (2008 - F26)

ANNEXE 2 - Résultats de l'analyse par chromatographie en phase gazeuse de l'huile essentielle d'origan (*Origanum compactum*) (Château Palmer, 2020)

GOLGEMMA S.A.S



BULLETIN D'ANALYSE ANNEXE

Lot N° B71

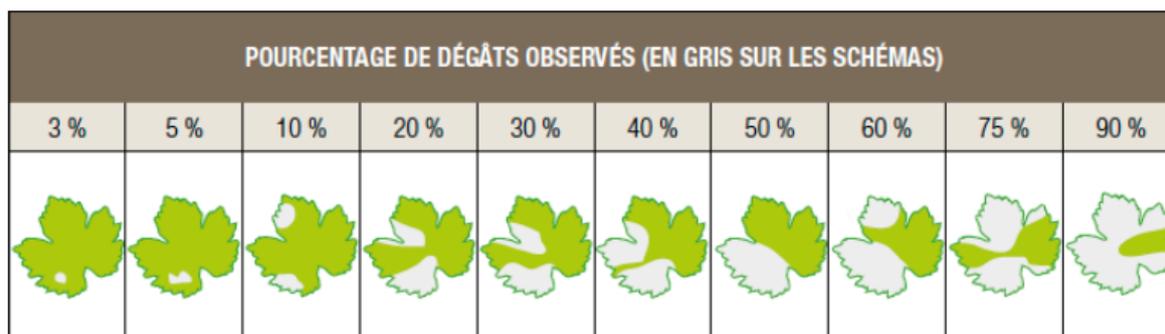
INTERPRETATION DU PROFIL CHROMATOGRAPHIQUE

Composants	Résultats (%)	Spécifications (%)
alpha pinene	0,51	
alpha thujene	1,60	
camphene	0,11	
β pinene	0,16	
δ-3-carene	0,10	
myrcene	2,19	
α phellandrene	0,29	
α terpinene	2,47	
<i>limonene</i>	0,32	
β phellandrene	0,30	
cineol 1-8		
γ terpinene	21,66	9,00 à 26,00
octanone-3	0,13	
para cymene	9,30	6,00 à 20,00
terpinolene	0,12	
para dimethylstyrene	0,17	
octen-1-ol3	0,26	
trans thujanol-4	0,11	
camphre	0,06	
<i>linalol</i>	1,77	
cis thujanol-4	0,10	
terpinen-4-ol	0,54	
β caryophyllene	2,14	
α humulene	0,12	
α terpineol	0,24	
borneol	0,19	
δ cadinene	0,08	
para cymen-8-ol	0,07	
thymol	15,53	8,00 à 28,00
carvacrol	38,83	21,00 à 53,00

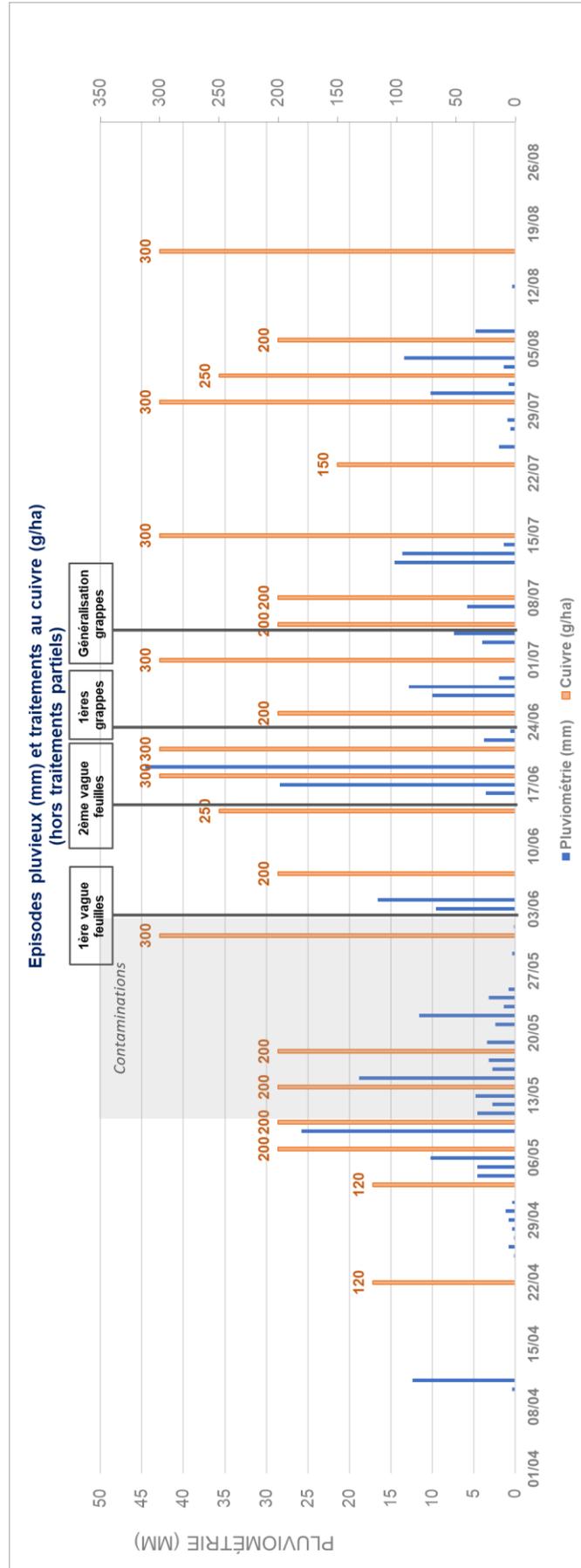
ANNEXE 3 - Détail des produits à base de cuivre utilisés par Château Palmer

Produit	Composition	Commentaire
Bouillie bordelaise, Ecal DG	Cuivre (II) Sulfate	Très bon anti-mildiou Relargage lent d'ions Cu^{2+} Nombre limité d'application par an
ChampFlo Ampli, Heliocuire	Hydroxyde de Cuivre	Le plus utilisé Relargage rapide d'ions Cu^{2+} Peu phytotoxique
Nordox 75 WG	Oxyde de Cuivre	Concentration forte en Cuivre Forte phytotoxicité

ANNEXE 4 - Echelle d'intensité du mildiou proposé par le Bulletin Santé Végétal (Chambre d'Agriculture de la Gironde, 2017)



ANNEXE 5 - Résumé des précipitations, dates et doses d'application des traitements et apparition du mildiou



ANNEXE 6 - Extrait de la base de données utilisée pour les analyses statistiques

Parcelle	Cepage	TypeDeSol	Traitement	Modalite	NumPlacett	NumPied	Potentiel	Ntester	NbGrappes_ Total	NbGrappes_ Niv1	NbGrappes_ Niv2	NbGrappes_ Niv3	NbGrappes_ Niv4	Mildiou	FAG	IAG_Bis	Dégât
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	1	-10,3	424	3	0	0	2	0	2	66,7%	75%	50,0%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	2	-10,3	424	4	0	1	3	0	4	100,0%	69%	68,8%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	3	-10,3	424	2	0	2	0	0	2	100,0%	50%	50,0%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	4	-10,3	424	3	1	2	0	0	3	100,0%	42%	41,7%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	5	-10,3	424	3	0	2	0	0	2	66,7%	50%	33,3%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	6	-10,3	424	4	1	3	0	0	4	100,0%	44%	43,8%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	7	-10,3	424	4	2	2	0	0	4	100,0%	38%	37,5%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	8	-10,3	424	3	2	0	0	0	2	66,7%	25%	16,7%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	9	-10,3	424	1	0	0	0	0	0	0,0%	0%	0,0%
20	Mt	UC1_a	HE01	20HE01	1	10	-10,3	424	5	0	2	1	0	3	60,0%	58%	35,0%
20	Mt	UC4	HE01	20HE01	2	1	-9,9	420	6	2	0	3	0	5	83,3%	55%	45,8%
20	Mt	UC5	HE01	20HE01	2	2	-9,9	420	3	0	0	0	1	1	33,3%	100%	33,3%
20	Mt	UC6	HE01	20HE01	2	3	-9,9	420	5	2	0	1	0	3	60,0%	42%	25,0%
20	Mt	UC7	HE01	20HE01	2	4	-9,9	420	3	1	0	0	1	2	66,7%	63%	41,7%
20	Mt	UC8	HE01	20HE01	2	5	-9,9	420	6	1	0	2	0	3	50,0%	58%	29,2%
20	Mt	UC9	HE01	20HE01	2	6	-9,9	420	10	1	2	0	0	3	30,0%	42%	12,5%
20	Mt	UC10	HE01	20HE01	2	7	-9,9	420	10	1	1	1	0	3	30,0%	50%	15,0%
20	Mt	UC11	HE01	20HE01	2	8	-9,9	420	6	1	1	0	0	2	33,3%	38%	12,5%
20	Mt	UC12	HE01	20HE01	2	9	-9,9	420	4	0	1	0	1	2	50,0%	75%	37,5%
20	Mt	UC13	HE01	20HE01	2	10	-9,9	420	3	0	0	0	0	0	0,0%	0%	0,0%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	1	-9,2	384	2	1	0	0	0	1	50,0%	25%	12,5%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	2	-9,2	384	5	0	2	0	0	2	40,0%	50%	20,0%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	3	-9,2	384	7	1	2	0	0	3	42,9%	42%	17,9%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	4	-9,2	384	2	1	0	0	0	1	50,0%	25%	12,5%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	5	-9,2	384	4	0	2	0	0	2	50,0%	50%	25,0%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	6	-9,2	384	3	2	0	1	0	3	100,0%	42%	41,7%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	7	-9,2	384	4	2	0	0	0	2	50,0%	25%	12,5%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	8	-9,2	384	1	1	0	0	0	1	100,0%	25%	25,0%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	9	-9,2	384	5	1	0	0	0	1	20,0%	25%	5,0%
20	Mt	UC18_a	HE01	20HE01	3	10	-9,2	384	2	2	0	0	0	2	100,0%	25%	25,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	1	-11,4	437	1	0	0	0	0	0	0,0%	0%	0,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	2	-11,4	437	5	1	1	0	0	2	40,0%	38%	15,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	3	-11,4	437	2	1	1	0	0	2	100,0%	38%	37,5%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	4	-11,4	437	2	1	0	0	0	1	50,0%	25%	12,5%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	5	-11,4	437	2	1	1	0	0	2	100,0%	38%	37,5%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	6	-11,4	437	10	0	0	0	0	0	0,0%	0%	0,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	7	-11,4	437	2	1	0	0	0	1	50,0%	25%	12,5%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	8	-11,4	437	3	0	0	2	0	2	66,7%	75%	50,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	9	-11,4	437	4	1	1	0	0	2	50,0%	38%	18,8%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	1	10	-11,4	437	3	0	0	0	0	0	0,0%	0%	0,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	1	-10,7	391	4	2	0	0	0	2	50,0%	25%	12,5%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	2	-10,7	391	3	1	0	0	0	1	33,3%	25%	8,3%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	3	-10,7	391	4	0	0	1	0	1	25,0%	75%	18,8%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	4	-10,7	391	5	2	0	0	0	2	40,0%	25%	10,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	5	-10,7	391	7	0	1	0	0	1	14,3%	50%	7,1%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	6	-10,7	391	1	0	0	0	0	0	0,0%	0%	0,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	7	-10,7	391	3	1	0	0	0	1	33,3%	25%	8,3%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	8	-10,7	391	2	0	0	0	0	0	0,0%	0%	0,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	9	-10,7	391	2	0	1	0	0	1	50,0%	50%	25,0%
20	Mt	UC6	PPT	20PPT	2	10	-10,7	391	1	0	1	0	0	1	100,0%	50%	50,0%

ANNEXE 7 - Exemple de test statistique de Kruskal-Wallis suivi du test de comparaisons multiples de Dunn

Test de Kruskal-Wallis / Test bilatéral (IAG) :	
K (Valeur obs)	34,890
K (Valeur crit)	7,815
DDL	3
p-value (unil)	<0,0001
alpha	0,050

Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.

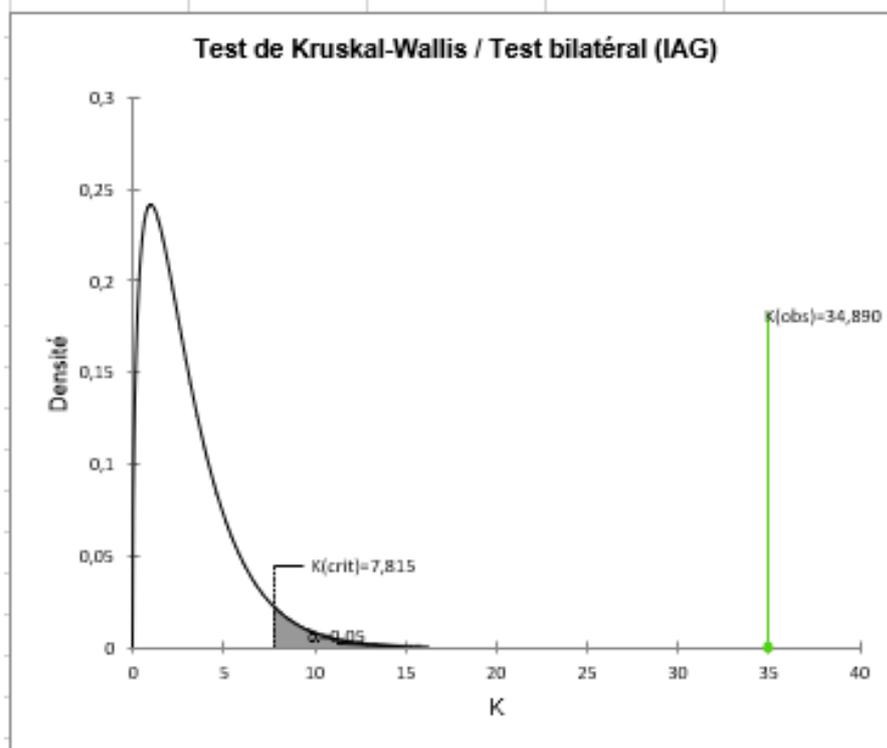
Interprétation du test :

H_0 : Les échantillons proviennent de la même population.

H_a : Les échantillons proviennent de populations différentes.

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse

Des ex-aequo ont été détectés et les corrections appropriées ont été appliquées.



Comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Dunn / Test bilatéral :

Echantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes
20TNT	30	2686,000	89,533	A
20HEO1	30	1858,500	61,950	B
20HEO2	30	1538,500	51,283	B
20PPT	30	1177,000	39,233	B

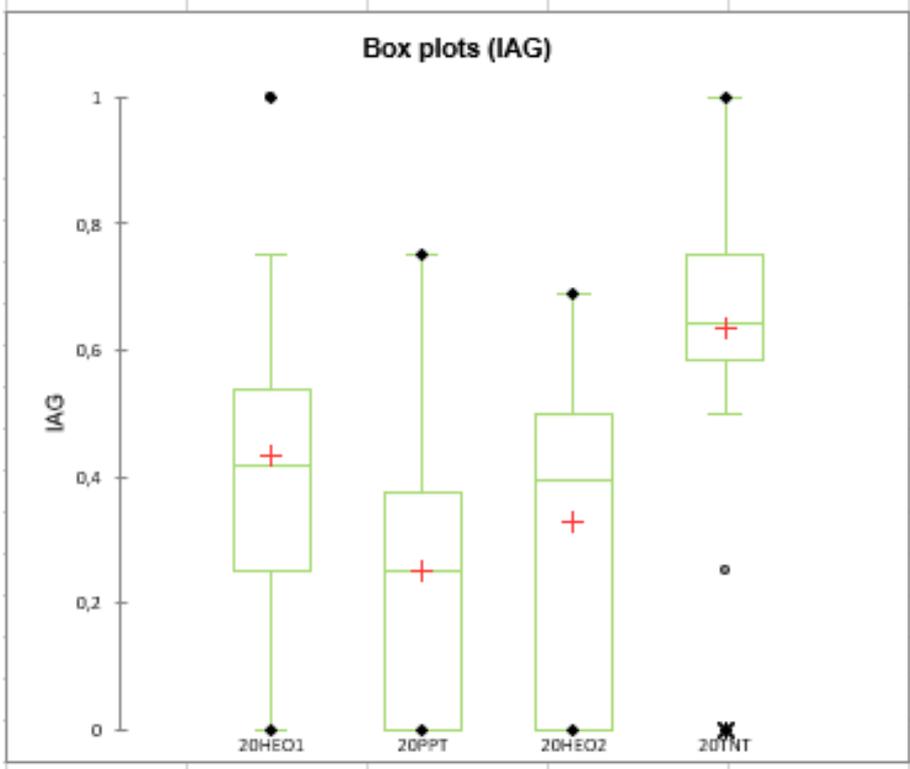
Comparaisons par paires (IAG) :

Différences :				
	2OHEO1	2OPPT	2OHEO2	20TNT
2OHEO1	0	22,717	10,667	-27,583
2OPPT	-22,717	0	-12,050	-50,300
2OHEO2	-10,667	12,050	0	-38,250
20TNT	27,583	50,300	38,250	0

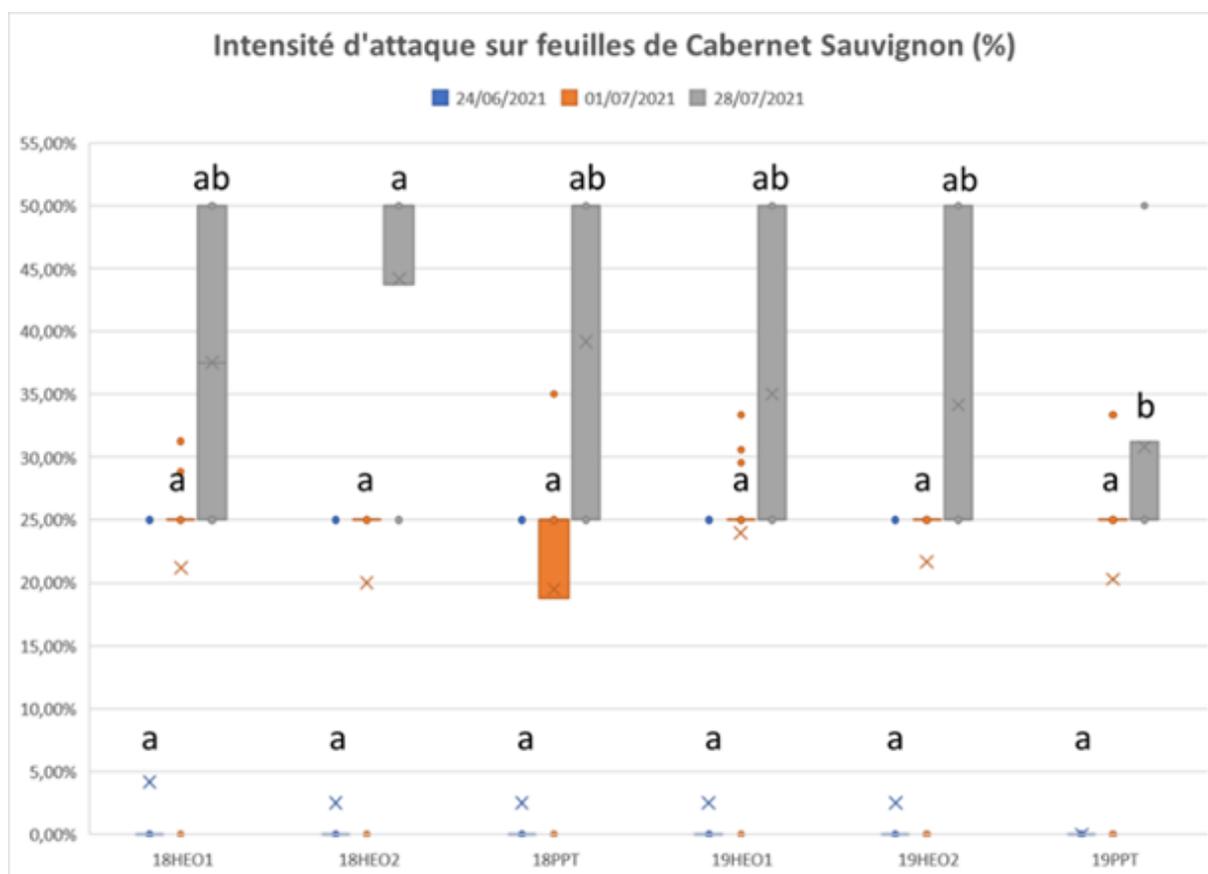
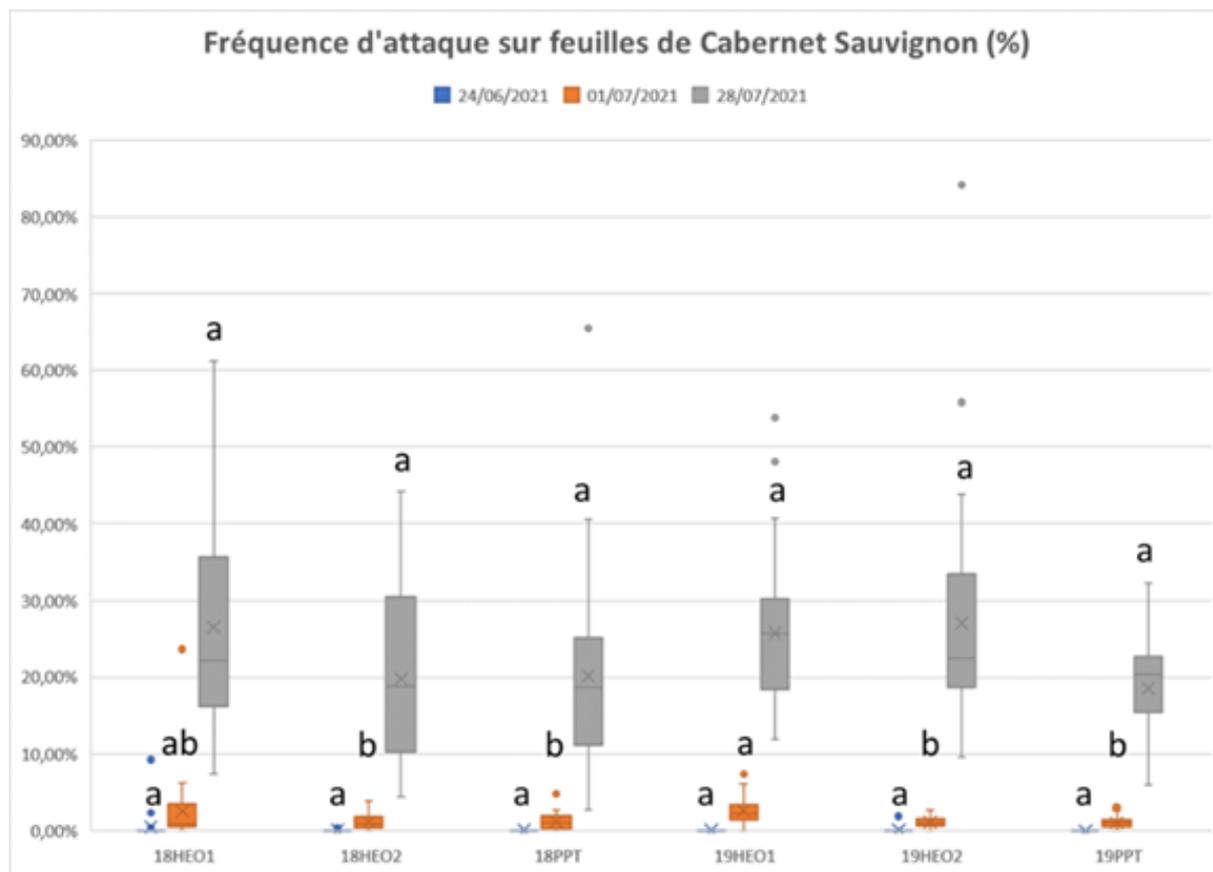
p-values :				
	2OHEO1	2OPPT	2OHEO2	20TNT
2OHEO1	1	0,011	0,231	0,002
2OPPT	0,011	1	0,176	<0,0001
2OHEO2	0,231	0,176	1	<0,0001
20TNT	0,002	<0,0001	<0,0001	1

Niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,0083

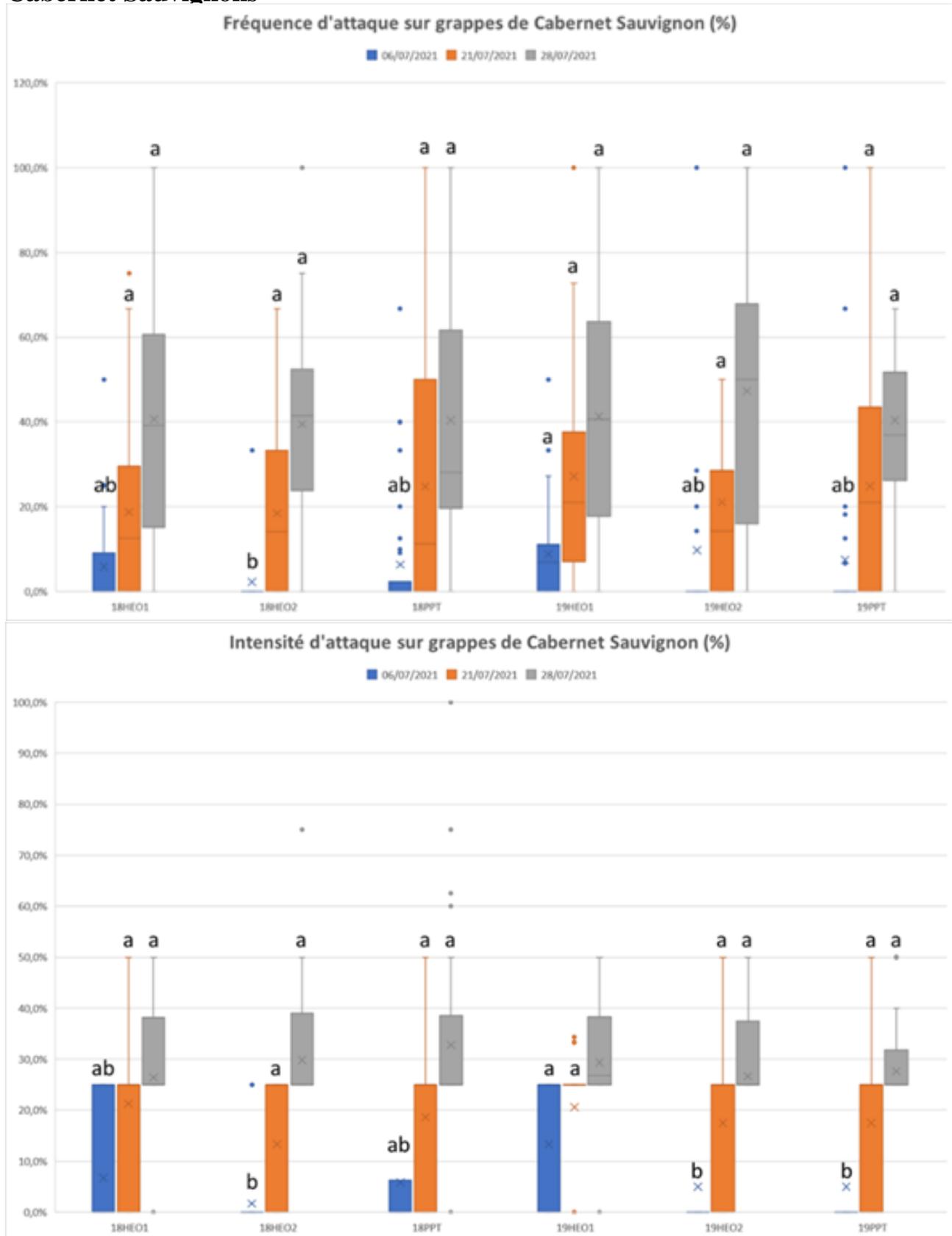
Différences significatives :				
	2OHEO1	2OPPT	2OHEO2	20TNT
2OHEO1	Non	Non	Non	Oui
2OPPT	Non	Non	Non	Oui
2OHEO2	Non	Non	Non	Oui
20TNT	Oui	Oui	Oui	Non



ANNEXE 8 - Résultats des comptages de FAF et IAF sur les modalités de Cabernet Sauvignons

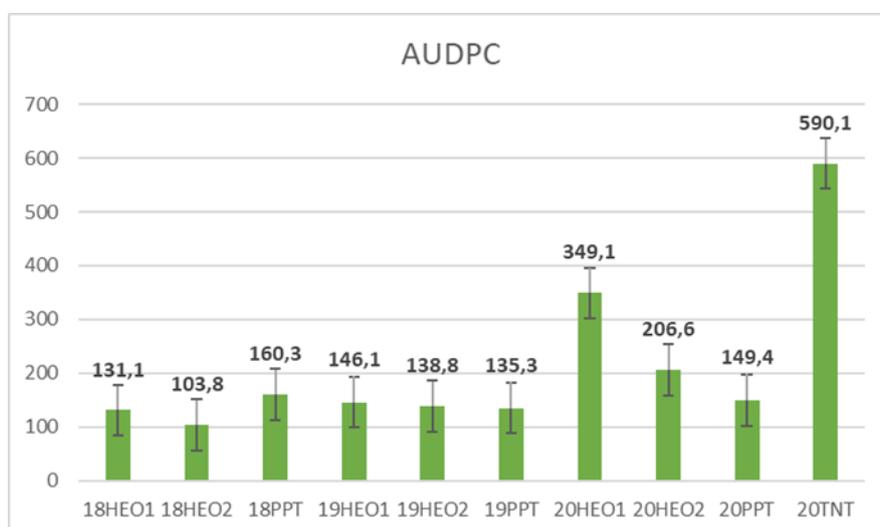


ANNEXE 9 - Résultats des comptages de FAG et IAG sur les modalités de Cabernet Sauvignons



ANNEXE 11 - Script R de la fonction de calcul de l'AUDPC et les valeurs calculées pour chaque modalité

```
Function: audpc_function (.GlobalEnv)
1 ▾ function(disease.severity,time.period){
2
3     #n is the length of time.period, or
4     # the total number of sample dates
5     n <- length(time.period)
6
7     #meanvec is the vector (matrix with one dimension)
8     #that will contain the mean percent infection
9     #it is initialized containing -1 for all entries
10    #this sort of initialization is sometimes useful
11    # for debugging
12    meanvec <- matrix(-1,(n-1))
13
14    #intvec is the vector that will contain the length of
15    # time between sampling dates
16    intvec <- matrix(-1,(n-1))
17
18    #the loop goes from the first to the penultimate entry
19    #the left curly bracket indicates the beginning of
20    # commands in the loop
21 ▾ for(i in 1:(n-1)){
22
23        #the ith entry in meanvec is replaced with the
24        # mean percent infection
25        #between sample time i and sample time i+1
26        meanvec[i] <- mean(c(disease.severity[i],
27                            disease.severity[i+1]))
28
29        #the ith entry in intvec is replaced with the length
30        # of the time interval between time i and time i+1
31        intvec[i] <- time.period[i+1] - time.period[i]
32
33        #the right curly bracket ends the loop
34    }
35
36    #the two vectors are multiplied together
37    # one entry at a time
38    infprod <- meanvec * intvec
39
40    #the sum of the entries in the resulting vector
41    # gives the AUDPC
42    sum(infprod)
43
44    #the right curly bracket ends the function
45 }
46
```



ABSTRACT

Title : Alternative treatment against *Plasmopara viticola* in biodynamic viticulture: Oregano essential oil

The objective of the study presented in this thesis is to assess the efficiency of oregano essential oil to reduce the doses of copper used in the treatments against the oomycete *Plasmopara viticola*. This experiment took place in the vineyard of Château Palmer, 3rd Grand Cru Classé of the Margaux AOC. It follows a study launched in 2019. This year, one of the aspects was the transition to an "industrial" scale, i.e. on a larger surface, requiring the use of tractors for treatments.

Regarding the weather conditions of the 2021 vintage, they were wet during spring, with average temperatures around 17°C. The combination of a steady humidity and mild temperatures created a suitable environment for the development and growth of downy mildew. It showed its first signs of appearance mid-May, which is late compared to previous vintages, but its growth was constant until harvest. The black frost wave did not spare the Margaux AOC, but fortunately the experimental plots were not affected. From a phenological point of view, the vintage was a little late compared to the previous ones because of this frosty period and the regular humidity and lack of sufficiently high temperatures during the vegetative period.

Three plots were selected to conduct this experiment, in an area planted with Merlot and Cabernet Sauvignon. The treatment modalities of the study were three: an untreated control, the traditional treatment of the property and a treatment combining copper and oregano essential oil in preventive application until flowering. Essential oils are known for their antifungal, antibacterial and antiviral actions.

This alternative could slow down the abusive use of copper-based products in organic and biodynamic agriculture, and lead to a more sustainable and responsible viticulture for its soils. The results are all the more interesting as the 2021 vintage is well suited for the study of downy mildew. Many paths of improvement have emerged from this experimentation, especially the method of application of the oils and their timing, the understanding of the interactions between the essential oil, the plant and the pathogen... It is this search for a balance with its environment that inspires Château Palmer to pursue experimentations year after year to find sustainable solutions to the disorders observed on the vine.

Key words

Oomycete, *Plasmopara viticola*, downy mildew, essential oil, biodynamics, copper, AOC Margaux, Médoc, *Origanum compactum*, oregano

RESUME

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de vérifier l'efficacité de l'huile essentielle d'origan pour diminuer les doses de cuivres utilisées dans la lutte contre l'oomycète *Plasmopara viticola*. Cette expérimentation s'est déroulée dans le vignoble de Château Palmer, 3^{ème} Grand Cru Classé de l'AOC Margaux. Elle fait suite à une étude lancée en 2019. Cette année, un des aspects était le passage à une échelle dite « industrielle », c'est-à-dire sur une surface plus étendue, nécessitant l'utilisation de tracteurs pulvérisateurs pour les traitements.

Concernant les conditions climatiques du millésime 2021, celles-ci furent humides pendant le Printemps, avec des températures moyennes avoisinant les 17°C. L'association d'une humidité régulière avec des températures douces a créé un climat favorable au développement et à la croissance du mildiou. Celui-ci a montré ses premiers signes d'apparition à la mi-Mai, ce qui est tardif par rapport aux millésimes précédents, mais sa croissance a été continue jusqu'aux vendanges. La vague de gelée noire n'a pas épargné l'AOC Margaux, mais les parcelles expérimentales n'ont heureusement pas été touchées. D'un point de vue phénologique, le millésime a été un peu plus tardif que les précédents à cause de cette période gélive et de l'humidité régulière et l'absence de températures suffisamment hautes pendant la période végétative.

Trois parcelles ont été sélectionnées pour mener cette expérimentation, dans un ilot planté en Merlot et Cabernet Sauvignon. Les modalités de traitements de l'étude étaient au nombre de trois : un témoin non traité, le traitement traditionnel de la propriété et un traitement associant cuivre et huile essentielle d'origan en application préventive jusqu'à la floraison. Les huiles essentielles sont connues pour leurs actions antifongiques, antibactériennes et antivirales.

Cette alternative pourrait ralentir l'usage abusif des produits cupriques en agriculture biologique et biodynamique, et mener à une viticulture plus durable et responsable de ses sols. Les résultats sont d'autant plus intéressants que le millésime 2021 se prête bien à l'étude du mildiou. De nombreuses voies d'amélioration ont émergé de cette expérimentation, notamment la méthode d'application des huiles et son timing, la compréhension des interactions entre l'huile essentielle, la plante et le pathogène... C'est cette recherche d'un équilibre avec son environnement qui motive tous les ans Château Palmer à poursuivre des expérimentations pour trouver des solutions durables aux déséquilibres observés à la vigne.

Mots clés

Oomycète, *Plasmopara viticola*, mildiou, huile essentielle, biodynamie, cuivre, AOC Margaux, Médoc, origan, *Origanum compactum*

Pour citer ce document : MARCEL, Malo, 2021. Traitement alternatif contre *Plasmopara viticola* en viticulture biodynamique : Huile essentielle d'origan. Mémoire d'Ingénieur Agronome, option Viticulture-Œnologie, Institut Agro | Montpellier SupAgro, 56 p.

Institut Agro | Montpellier SupAgro, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier cedex 02.
<https://www.montpellier-supagro.fr/>