



HAL
open science

Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux

Jean-Louis Moreac

► **To cite this version:**

Jean-Louis Moreac. Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux. Life Sciences [q-bio]. 2020. hal-04145271

HAL Id: hal-04145271

<https://hal.inrae.fr/hal-04145271>

Submitted on 29 Jun 2023

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



UNIVERSITÉ DE NANTES



**Master 2 Mention Biologie Végétale (BV)
Parcours : Gestion de la Santé des Plantes**

Année universitaire 2019-2020

Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux.

Par : Jean-Louis MORÉAC



Soutenu à Angers le : 10 septembre 2020

Maîtres de stage : Marc FERMAUD et Xavier BURGUN

Mémoire de Fin d'Études



UNIVERSITÉ DE NANTES



Master 2 Mention Biologie Végétale (BV) Parcours : Gestion de la Santé des Plantes

Année universitaire 2019-2020

Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux.

Par : Jean-Louis MORÉAC



Soutenu à Angers le : 10 septembre 2020

Maîtres de stage : Marc FERMAUD et Xavier BURGUN

Moréac Jean-Louis | Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux.

AUTORISATION DE DIFFUSION EN LIGNE

I ÉTUDIANT(E)

N   tudiant : 18004608 Email : jeanlouis.moreac56@gmail.com

Je soussigné(e) Jean-Louis MOREAC être l'auteur du document intitulé

Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne.
préparé sous la direction de Marc FERRAUD

et soutenu le 10/03/2020

Je certifie la conformité de la version électronique déposée avec l'exemplaire imprimé remis au jury, certifie que les documents non libres de droits figurant dans mon mémoire seront signalés par mes soins et pourront être retirés de la version qui sera diffusée en ligne par le Service Commun de la Documentation de l'Université d'Angers. Agissant en l'absence de toute contrainte, et sachant que je dispose à tout moment d'un droit de retrait de mes travaux, j'autorise, sans limitation de temps, l'Université d'Angers à les diffuser sur internet dans les conditions suivantes :

- diffusion immédiate du document en texte intégral
- diffusion différée du document en texte intégral ; date de mise en ligne : 01/01/2022
- n'autorise pas sa diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers

  Angers, le 10/03/2020

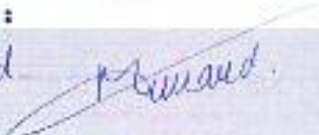
Signature :



II MAÎTRE DE STAGE

- autorise la diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers voir ci-dessus
- n'autorise pas la diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers

Nom et signature du maître de stage :

Marc Ferraud 

III JURY DE SOUTENANCE

- autorise la diffusion immédiate du document en texte intégral
- OU
- autorise la diffusion différée du document en texte intégral ; à compter du : [] [] []
- en libre-accès OU en accès restreint
- sous réserve de corrections

OU

- n'autorise pas sa diffusion dans le cadre du protocole de l'Université d'Angers

  Angers, le

Signature :

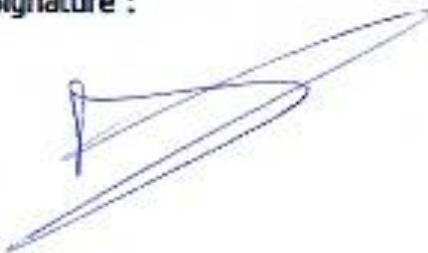




ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné (e) Jean-Louis MORÉAC,
déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un
document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation
des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer
toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signature :



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser mes missions. Notons que ce stage a été marqué par des conditions de travail particulières, avec une très large part en télétravail et dédiée à l'analyses de données, du fait de la crise sanitaire "COVID19".

Tout d'abord, je tiens à remercier très vivement mon maître de stage, Marc FERMAUD. Je le remercie pour sa disponibilité en toutes circonstances, sa pédagogie et sa transmission de savoirs, aussi bien en termes de viticulture que de phytopathologie et/ou, plus largement, de culture scientifique.

Un grand merci à Jean ROUDET pour son expérience, son appui technique durant les phases de terrain, ainsi que ses "bons plans" pour visiter la région bordelaise.

Je remercie également Xavier BURGUN pour sa connaissance du terrain et de viticulture et pathologie, et son aide précieuse dans le traitement des données.

Merci à toute l'équipe de l'UMR SAVE ainsi qu'à mes compagnons de stage pour votre bonne humeur quotidienne.

Enfin, je remercie Monsieur Romain BERRUYER, mon tuteur de stage au sein de l'Université d'Angers, pour son accompagnement tout au long de ce stage, marqué par.

Table des matières

GLOSSAIRE	1
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	1
LISTE DES ANNEXES	1
LISTE DES TABLEAUX.....	1
LISTE DES ILLUSTRATIONS	1
INTRODUCTION	1
1. Le secteur de la viticulture	1
1.1. Le secteur viticole français.....	1
1.2. Le contexte sociétal et réglementaire	1
1.3. Les difficultés du vignoble et ses enjeux	2
2. Ecophysiologie et développement de la	3
2.1. Le cycle de développement	3
2.2. La vigueur végétative	3
2.3. Vigueur reproductive, élaboration du rendement, ses composantes et les facteurs limitants	3
3. Les bioagresseurs de la vigne et les indicateurs multipests.....	4
3.1. Les maladies annuelles	4
3.1.1. L'oïdium.....	4
3.1.2. Le mildiou	5
3.1.3. Impact sur le rendement et la qualité	5
3.1.4. Impact à long terme.....	6
3.2. Les maladies du bois (MdBs)	6
3.2.1. Les origines	6
3.2.2. L'eutypiose	6
3.2.3. Le syndrome BDA-Esca	7
3.2.3.1. L'esca.....	7
3.2.3.2. Chancres à <i>Botryosphaeriaceae</i>	7
3.2.3.3. Le syndrome BDA-Esca	8
3.2.4. Les facteurs influençant les symptômes	8
4. Les indicateurs multipests AIDB et AIDB+ : lien aux pertes de RDT.....	9
4.1. L'AIDB.....	9
4.2. L'AIDB+	9
5. Le Plan National Dépérissement du Vignoble PNDV	10
5.1. Présentation du PNDV	10
5.2. Le projet TraDéVi.....	10
5.3. Intérêts et objectifs de l'étude.....	10
MATRÉRIEL ET MÉTHODES	11
1. Les parcelles	11
1.1. Le réseau TraDéVi.....	11
1.2. Le choix des parcelles du réseau	11
1.3. Zone d'étude et plan d'échantillonnage	11
2. Notations des maladies du bois et des jeunes ceps improductifs ou faiblement productifs	11
2.1. Les maladies annuelles	11
2.2. Les maladies du bois	12
3. Indicateurs, indices et formules	12
3.1. Les indicateurs AIDB et AIDB +	12
3.2. Les indices NDVI.....	12
3.3. Les rendements.....	13
3.3.1. Le rendement théorique	13
3.3.2. Le rendement réel.....	13
3.3.3. Le taux de réalisation du rendement (YAR)	14
4. Les analyses statistiques	14

RÉSULTATS.....	14
1. Relations entre indices de vigueur et indices de dépérissement.....	14
1.1. Bordeaux	14
1.1.1. Indice NDVI global de tous les ceps de la placette	15
1.1.2. Indice NDVI des ceps normaux de la placette	15
1.1.3. Différence entre l'indice NDVI des ceps normaux et l'indice NDVI global.....	15
1.2. Cognac	15
2. Les indices AIDB et AIDB+ en 2019	16
3. Relations entre les indices de vigueur NDVI et la pression multi-pathogène AIDB +	17
3.1. Bordeaux	17
3.2. Cognac	17
4. Relations entre la réalisation du rendement YAR et les indices de vigueur NDVI	18
4.1. Bordeaux	18
4.2. Cognac	18
5. Relations entre la réalisation du rendement YAR et la pression multi-pathogène AIDB+....	19
5.1. Bordeaux	19
5.2. Cognac	19
6. Relations multiples entre l'ensemble des variables de la base de données	19
DISCUSSION	20
1. Relations entre indices de vigueur et indices de dépérissement.....	20
2. La complexité des mesures NDVI à l'échelle du cep.....	21
3. La complexité de l'indicateur "Complant"	21
4. Relations entre les indices de vigueur NDVI et la pression multi-pathogène AIDB+	21
5. Le calcul du Yield Achievement Rate (YAR).....	22
6. Relations entre la réalisation du rendement YAR et les indices de vigueur NDVI	22
7. Relations entre la réalisation du rendement YAR et la pression multi-pathogène AIDB+.....	23
PERSPECTIVES	24
1. Mise en place de 3 nouveaux indicateurs de la nuisibilité des maladies du bois.....	24
2. Étude pluriannuelles	24
3. Rectification du dispositif expérimental	24
CONCLUSION.....	25
BIBLIOGRAPHIE.....	26

Glossaire

Epamprage : Un pampre est un rameau non fructifère qui pousse sur la souche ou sur le porte-greffe. L'épamprage consiste à éliminer ces repousses (IFV). Cette technique permet de limiter le démarrage des épidémies de mildiou ainsi que l'entassement de la végétation (ephytia).

Rognage : Le rognage est une pratique culturale qui consiste à couper l'extrémité des rameaux de la vigne. Cette pratique permet de limiter le volume végétatif exposé aux maladies (moins d'entassement de végétation) et d'éviter que la vigne ne retombe (ephytia).

Coulure : Abscission et chute/avortement de fleurs durant le développement des inflorescences (nouaison).

Millerandage : Le millerandage a pour origine une fécondation imparfaite de la fleur qui donne des petites baies. On peut alors observer sur une même grappe des tailles et des maturités de baie très hétérogènes.

Complant : Un Complant est un cep replanté après la mort d'un cep. Ce cep est non productif ou simplement moins productif durant les 3 à 8 premières années (communication personnelle Elodie Fouquet, juin 2020).

Nouaison : La nouaison est une étape du cycle végétatif qui a lieu après la fécondation. La nouaison correspond à la transformation de l'ovaire en fruit.

Amadou : Partie spongieuse du bois infecté par les champignons. Le cœur du bois de couleur clair et très friable.

Liste des abréviations

A : Cep absent

ACP : Analyse en composantes principales

AIDB : Assessment Indicator of Damage in grape Bunches

BDA : Black dead arm

CNIV : Comité National des Interprofessions des Vins

CP : Complant

Eut : Eutypiose

Es : Esca

ha : hectare

IFT : Indicateur de fréquence de traitement

IFV : Institut français de la vigne et du vin

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

ISVV : Institut des Sciences de la Vigne et du Vin

kg : kilogramme

LARVF : La revue du vin de France

LARVF : La revue du vin de France

M : Cep mort

MdB : Maladie du bois

M/2 : Cep avec un bras mort

N : Cep normal

nb : Nombre

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

PNDV : Plan National Dépérissement du vignoble

REF : Référence

RDT : Rendement

SAU : Surface agricole utile

S_{ES}% : Shriveling ratio %

SW : Sud-Ouest

TNT : Témoin

Tx : Taux

TraDéVi: Trajectoires de dépérissement des vignobles

YAR : Yield Achievement Rate

Liste des illustrations

Figure 1 : Évolutions des rendements des espèces entre 1900 et 2016	1
Figure 2 : Présentation des facteurs influençant le dépérissement	1
Figure 3 : Anatomie du cep et du rameau de vigne.	1
Figure 4 : Cycle annuel de développement de la vigne	3
Figure 5 : Principaux symptômes de l'oïdium	4
Figure 6 : Cycle de l'oïdium	4
Figure 7 : Principaux symptômes du Mildiou	5
Figure 8 : Cycle biologique de <i>Plasmopara viticola</i>	5
Figure 9 : Symptômes foliaires de l'eutypiose.....	6
Figure 10 : Necrose brune et dure en position sectorielle caractéristique de l'eutypiose	6
Figure 11 : Forme lente de l'esca.....	7
Figure 12 : Forme apoplectique de l'esca.....	7
Figure 13 : Symptômes de l'esca sur fruits	7
Figure 14 : Nécroses sectorielles, centrales et mixtes associées à l'esca	8
Figure 15 : Nécrose longitudinale (« bande brune ») sous l'écorce d'un cep atteint par l'esca	8
Figure 16 : Photographie d'un sarment inoculé artificiellement par une espèce de <i>Botryosphaeriaceae</i> présentant des picnides.....	8
Figure 17 : Nécrose sectorielle liée au chancre à <i>Botryosphaeriaceae</i>	9
Figure 18 : Forme apoplectique et forme lente d'ESCA-BDA sur cépage noir.	9
Figure 19 : Les 4 grands axes du Plan National Dépérissement du Vignoble.....	10
Figure 20 : Disposition du réseau de parcelles du projet TraDéVi	11
Figure 21 : Disposition des parcelles de Cognac.....	11
Figure 22 : Disposition des parcelles de Bordeaux	12
Figure 23 : Placettes de 30 emplacements consécutifs identifiés par rapport à 1 cep.....	12
Figure 24 : Plan d'une parcelle d'étude.....	13
Figure 25 : Appareil Greenseeker portable à long canne	14
Figure 26 : Principe de mesure de l'indice NDVI	14
Figure 27 : Indice NDVI total en fonction du pourcentage d'AM.....	15
Figure 28 : Indice NDVI total en fonction du pourcentage d'CP-AM.....	15
Figure 29 : Indice NDVI des ceps normaux en fonction du pourcentage d'AM.....	15
Figure 30 : Indice NDVI des ceps normaux en fonction du pourcentage d'CP-AM.....	15
Figure 31 : Indice NDVI _{passage3-passage1} en fonction du pourcentage d'AM	15
Figure 32 : Indice NDVI _{passage3-passage1} en fonction du pourcentage d'CP-AM	15
Figure 33 : Évolution de la somme des degrés jours (en base 0°C) en 2019 à St-Laurent de la Prée	16
Figure 34 : Indice NDVI en fonction de la date de mesure	16
Figure 35 : Indicateurs AIDB et AIDB+ en fonction des parcelles.	16

Figure 36 : Indicateur NDVI total de la placette en fonction de l'indicateur ADIB+	17
Figure 37 : Indicateur AIDB+ en fonction de la perte de vigueur liée au dépérissement	17
Figure 38 : Indice NDVI total de la placette en fonction de l'indicateur ADIB+	17
Figure 39 : Indicateur AIDB+ en fonction de la perte de vigueur liée au dépérissement	18
Figure 40 : Taux de réalisation du rendement en fonction de l'indice NDVI total de la placette	18
Figure 41 : Taux de réalisation du rendement en fonction de la perte de vigueur aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs	18
Figure 42 : Taux de réalisation du rendement en fonction de l'indice NDVI total de la placette	18
Figure 43 : Taux de réalisation du rendement en fonction de la perte de vigueur liée au dépérissement à Bordeaux	18
Figure 44 : Taux de réalisation du rendement en fonction de la perte de vigueur liée au dépérissement à Cognac	18
Figure 45 : Taux de réalisation du rendement des parcelles de Bordeaux en fonction de l'AIDB+	19
Figure 46 : Taux de réalisation du rendement des parcelles de Cognac en fonction de l'AIDB+	19
Figure 47 : ACP TraDeVi, représentation des axes 1 et 2.....	20
Figure 48 : ACP TraDeVi, représentation des axes 2 et 3.....	20
Figure 49 : Distribution des parcelles et des placettes selon les axes 1 et 2	21
Figure 50 : Représentation de la juxtaposition des ceps.....	21

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des parcelles de Cognac ainsi que les stratégies de traitements associées.....	10
Tableau 2 : Présentation des parcelles de Bordeaux ainsi que les stratégies de traitements associées.	11
Tableau 3 : Typologie et nomenclature des ceps étudiés.....	11
Tableau 4 : Mesures des maladies annuelles au cours de l'année	11
Tableau 5 : Mesures des maladies du bois au cours de l'année.	12

Liste des annexes

ANNEXE I : Méthodes de lutte contre le mildiou.

ANNEXE II : Méthodes de lutte contre les maladies du bois.

ANNEXE III : Présentation des maladies du bois.

ANNEXE IV : Équation de l'indicateur multi-pathogène AIDB +.

ANNEXE V : Relations entre les indicateurs de dépérissement et les indices NDVI à Cognac.

ANNEXE VI : Formules des indicateurs AIDD, AIDA et AIDM.

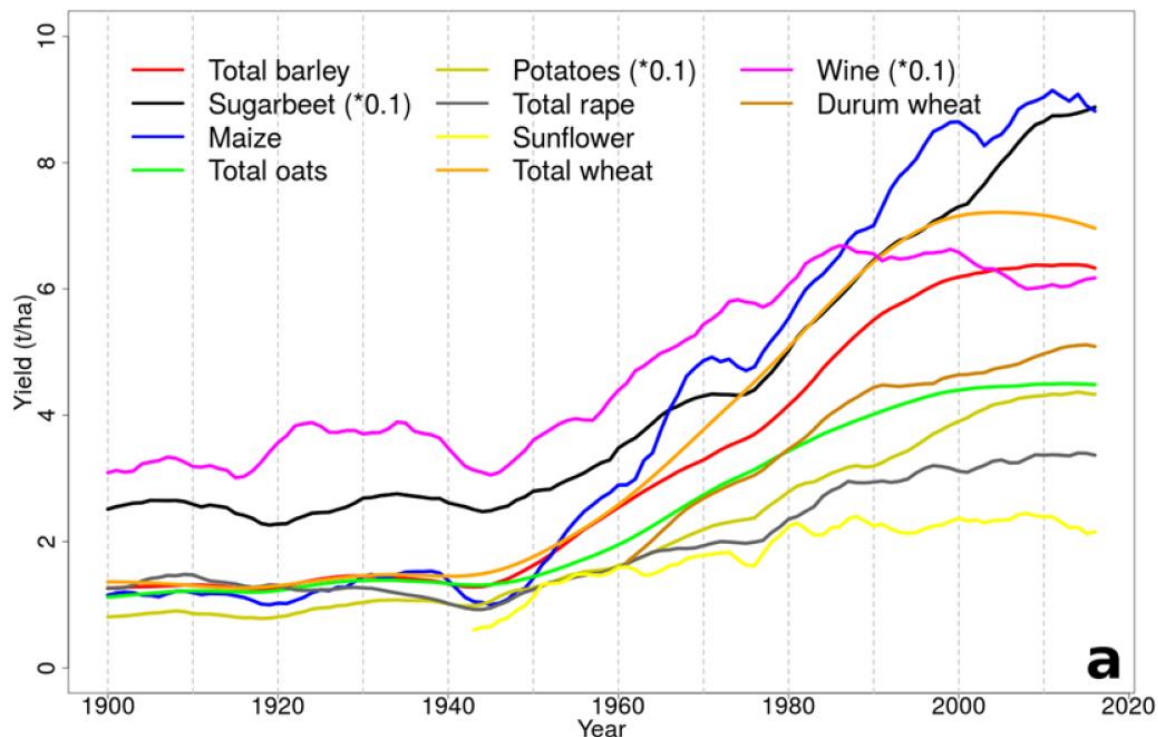


Figure 1 : Évolutions des rendements des espèces entre 1900 et 2016 (Schauberger *et al.*, 2018)

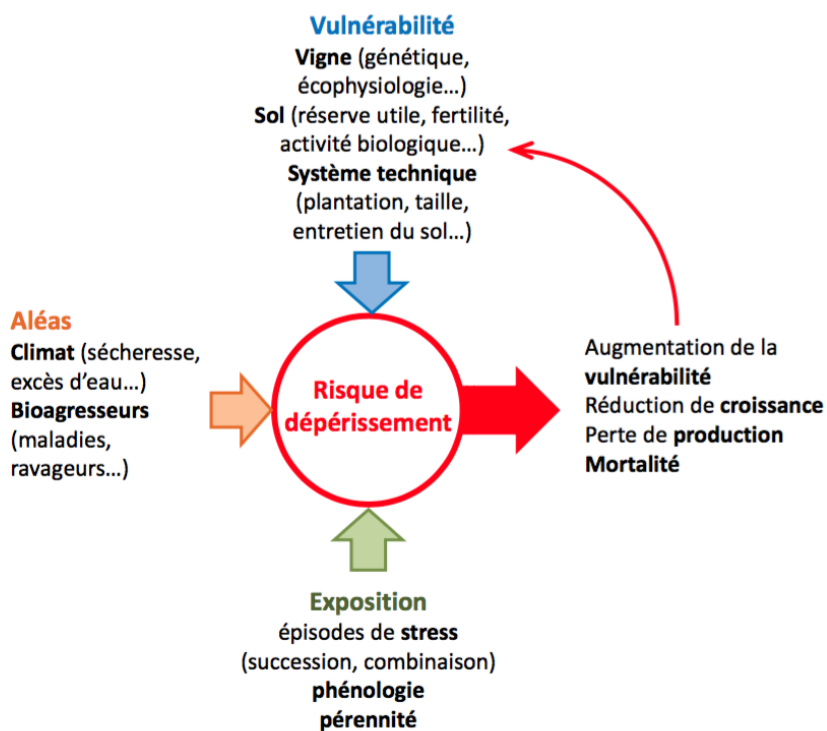


Figure 2 : Présentation des facteurs influençant le dépérissement (Breda & Peiffer., 2014).

INTRODUCTION

1. Le secteur de la viticulture

1.1. Le secteur viticole français

La viticulture est une filière incontournable de l'agriculture française. Répartis dans 66 départements, les 10 bassins viticoles français s'étendent sur 750 000 ha (CNIV, 2019). La filière représente 258 000 emplois directs (viticulteurs, négociants, cavistes...) auxquels il faut ajouter pas moins de 300 000 emplois indirects : entreprises de services et logistique, tonnelier, chaudronnier, etc... (Vin & Société, 2018).

En 2019, la France a produit 4,2 milliards de litres de vin, soit 17 % de la production mondiale. Il s'agit du deuxième producteur mondial de vin derrière l'Italie en volume (Organisation Internationale du Vin, 2019). La production de vin représente 15 % de la production agricole française en terme de valeur ce qui fait de la viticulture le premier secteur agricole français.

1.2. Le contexte sociétal et réglementaire

La viticulture fait partie des activités agricoles fortement consommatrices de pesticides. En France, la viticulture représente environ 3% de la surface agricole utile (SAU) et consomme environ 14% (en valeur) des pesticides (Butault *et al*, 2010), parmi lesquels une majorité, soit 83%, de fongicides (Ministère de l'agriculture, 2016). Cette pratique ne répond pas aux exigences sanitaires et environnementales d'aujourd'hui, car les pesticides sont fortement suspectés, même à faibles doses, d'avoir des effets très diversifiés et négatifs sur la santé. La pression sociétale augmente et incite à la réduction d'utilisation des molécules de synthèse.

Encadré par des politiques publiques de plus en plus exigeantes, le secteur agricole tente de maintenir la compétitivité des systèmes en termes de production, de rentabilité et de qualité des produits, tout en limitant ses impacts sur l'environnement et la santé humaine. Pour cela, le plan Ecophyto I, initié en 2008, avait pour objectif de réduire de moitié l'utilisation de produits phytopharmaceutiques dans un délai de dix ans. Ce plan n'ayant cependant pas eu d'impact significatif sur l'usage de pesticides (Hossard *et al.*, 2016), un nouveau plan d'action a été initié, Ecophyto 2+, en 2015, puis renforcé en 2018, afin de réduire de 50 % l'usage des pesticides à horizon 2025 (Ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire, 2018). Il prévoit notamment (1) l'accélération du retrait des substances les plus à risque, (2) le renforcement des connaissances relatives aux impacts des pesticides sur la santé humaine et sur l'environnement, (3) le soutien de la recherche et iv) du développement d'alternatives aux produits phytosanitaires et leur mise en œuvre par les agriculteurs. La filière viticole s'est également engagée à réduire de 50 % l'usage de produits phytosanitaires d'ici 2025 (Ministère de l'Agriculture, 2018). Un label « Haute Valeur Environnementale » a été mis en place par le ministère de l'Agriculture, en collaboration avec les interprofessions et les instituts techniques. Ce label, devrait théoriquement concerner la moitié des exploitations françaises d'ici 2025 (ISVV, 2019).

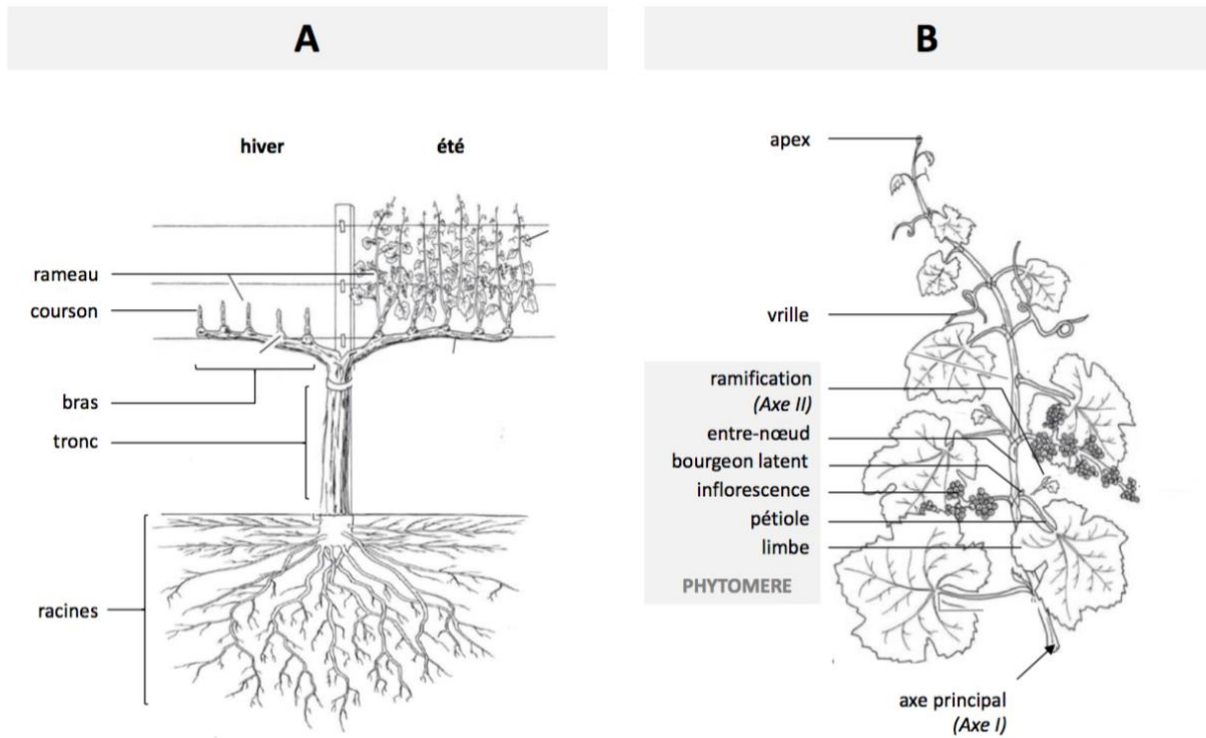


Figure 3.: Anatomie du cep (A) et du rameau (B) de vigne. (Guilpart d'après Hellman, 2003)

1.3. Les difficultés du vignoble et ses enjeux

Les régions viticoles françaises font face à plusieurs difficultés. Avec 40% de sa production vendue à l'export, soit 13 milliards d'euros en 2019, la France est 1er pays exportateur de vin en valeur. Cependant, depuis octobre 2019, une baisse de l'export a été observée avec l'application de la « taxe Trump », une surtaxe de 25 % imposée par les États-Unis sur les vins, notamment français (Direction Générale des Douanes, 2019). Le Brexit en février 2020, avec sa perspective de très longues négociations complexes dans les années à venir, réduit aussi les perspectives sur le marché britannique (LARVF, 2020). Plus récemment encore, la crise du COVID-19 a plongé la profession viticole française dans la crise économique, par une crise majeure de la demande, en France comme à l'étranger en 2020, au moins, et peut-être aussi plus structurellement encore (LARVF, 2020).

Cependant, ces phénomènes récents se sont surajoutés à une baisse de production moyenne estimée à 5% par an depuis plusieurs années (Riou *et al.*, 2016; Schauburger *et al.*, 2018) (figure 1) : phénomène dit de "dépérissement". Ce fléau impacte fortement la productivité du vignoble français et qui se traduit par « une baisse pluriannuelle subie de la productivité du cep et/ou sa mort prématurée, brutale ou progressive liée à une multiplicité de facteurs » (Plan National Dépérissement du vignoble : PNDV). Parmi les facteurs influençant le dépérissement (figure 2), on peut citer (Bertsch *et al.*, 2013 ; Hofstetter *et al.*, 2017) :

- Les **maladies du bois**.
- Les **viroses**, notamment le Court- Noué (Claverie *et al.*, 2016).
- Les **stress hydriques** qui favorisent les dysfonctionnements vasculaires pouvant provoquer la mort de la plante (Choat *et al.*, 2018).
- Les **facteurs pédoclimatiques** (précipitations, réserve en eau des sols).
- Les **pratiques culturales** (systèmes de taille, entretien des sols).
- Les **caractères variétaux**, avec des disparités de sensibilité en fonction des cépages et du porte-greffe.
- Les interactions multiples possibles et souvent mal connues entre tous ces facteurs

Les vignobles atteints par le dépérissement sont donc affaiblis, vieillissant et donnent des rendements moindres. Concernant le seul facteur important des maladies du bois, près de 13% du vignoble français était touché par ces maladies (Drouet, 2012). Ce constat est illustré par la disparition en 10 ans de 19% de la surface des vignes mères de greffon ainsi qu'une perte annuelle de rendement de 4,6 hL/ha (FranceAgriMer, 2018). La perte économique est estimée en France à 2 milliards d'euros de chiffre d'affaire en 2020 si les tendances de baisse de rendement se confirment (Mahé, 2019).

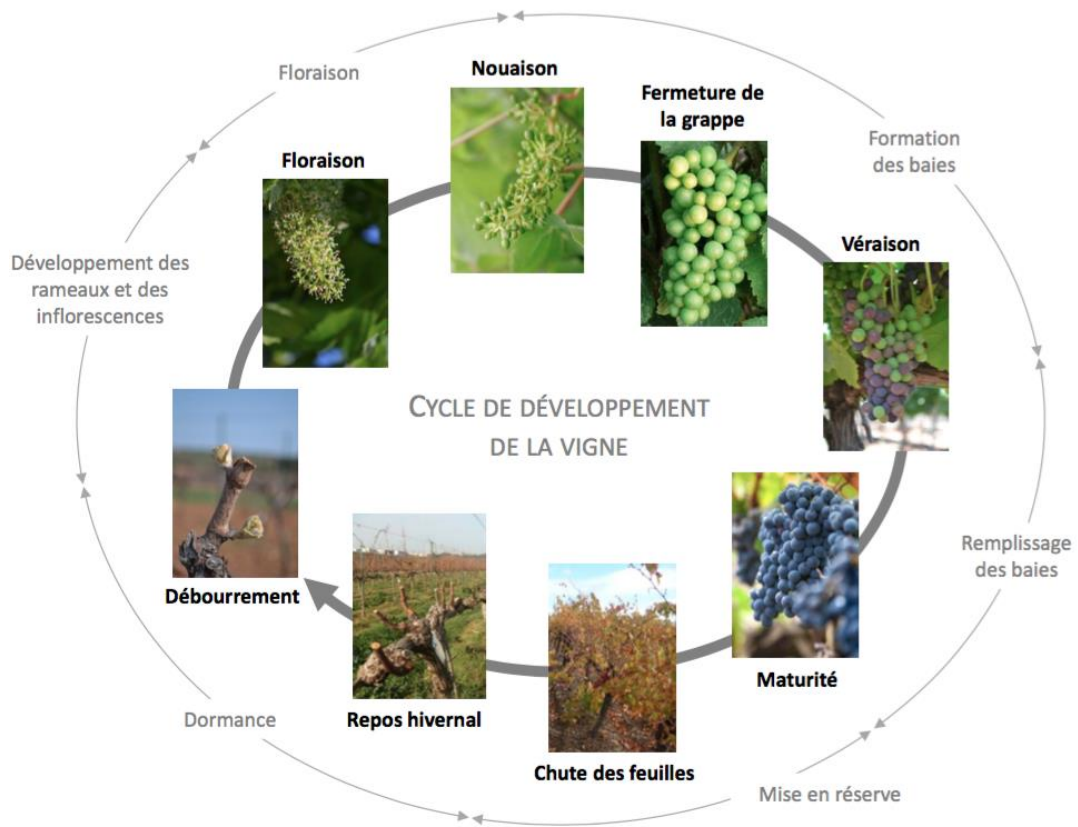


Figure 4.: Cycle annuel de développement de la vigne : principaux stades phénologiques de la vigne (le cercle extérieur représente les 6 principaux processus physiologiques au cours du cycle de la vigne d'après Guilpart (2014)).

2. Ecophysiologie et développement de la vigne

2.1. Le cycle de développement

La vigne a un cycle annuel s'étendant de mars à novembre dans l'hémisphère nord. Chaque saison, la vigne présente une végétation, composée de rameaux et de feuilles qui assurent la croissance et la survie des parties pérennes de la souche : c'est le **cycle végétatif** qui débute avec les pleurs, précédant le débourrement et finit à l'automne avec la chute des feuilles. Suit ensuite le repos hivernal ou dormance (Galet, 2000). Parallèlement le **cycle reproducteur** comprend la formation et le développement des inflorescences, leur fécondation, la croissance des grappes, des baies et des graines (figure 3 et 4).

2.2. La vigueur végétative

La vigueur végétative caractérise de manière générale l'état de croissance de la vigne. Cette vigueur, dépend principalement des interactions entre le milieu physique, le matériel végétal et les pratiques culturales. Ces facteurs conditionnent les ressources radiatives, hydriques et minérales ainsi que leurs accès (Coulon, 2014). Une vigueur végétative excessive entraîne des retards des différents stades phénologiques de la vigne et notamment la maturation (Delas, 2000). Elle induit également un entassement du feuillage et crée un microclimat peu aéré et peu lumineux au niveau des grappes propice au *Botrytis* (Fermaud *et al.*, 2001, Pellegrino *et al.*, 2005).

2.3. Vigueur reproductrice, élaboration du rendement, ses composantes et les facteurs limitants

La vigueur reproductrice de la vigne correspond en sa capacité à produire du raisin. Le rendement de la vigne peut s'exprimer comme le produit de plusieurs composantes : le nombre de grappes par hectare, le nombre de baies par grappe et le poids moyen des baies (Li, 2017 ; Guilpart, 2014).

$$\text{Rendement (t/ha)} = \text{nb de grappes/ha} \times \text{nb de baies/grappe} \times \text{poids moyen d'une baie}$$

$$\text{Avec : } \frac{\text{nb de grappes}}{\text{ha}} = \frac{\text{nb de ceps}}{\text{ha}} \times \frac{\text{nb de rameaux fructifères}}{\text{cep}} \times \frac{\text{nb de grappes}}{\text{rameau fructifère}}$$

$$\text{Et : } \frac{\text{nb de baies}}{\text{grappe}} = \text{Tx nouaison} \times \frac{\text{nb de fleurs}}{\text{inflorescence}}$$

Le nombre de grappes : Le nombre de grappes est déterminé par le nombre d'inflorescences. Ce nombre d'inflorescence est lui-même déterminé par le nombre de bourgeons laissés à la taille pendant l'hiver (Rives, 2000). Cependant, une partie des inflorescences peut être perdue suite à des accidents et/ou des maladies au cours de la saison.

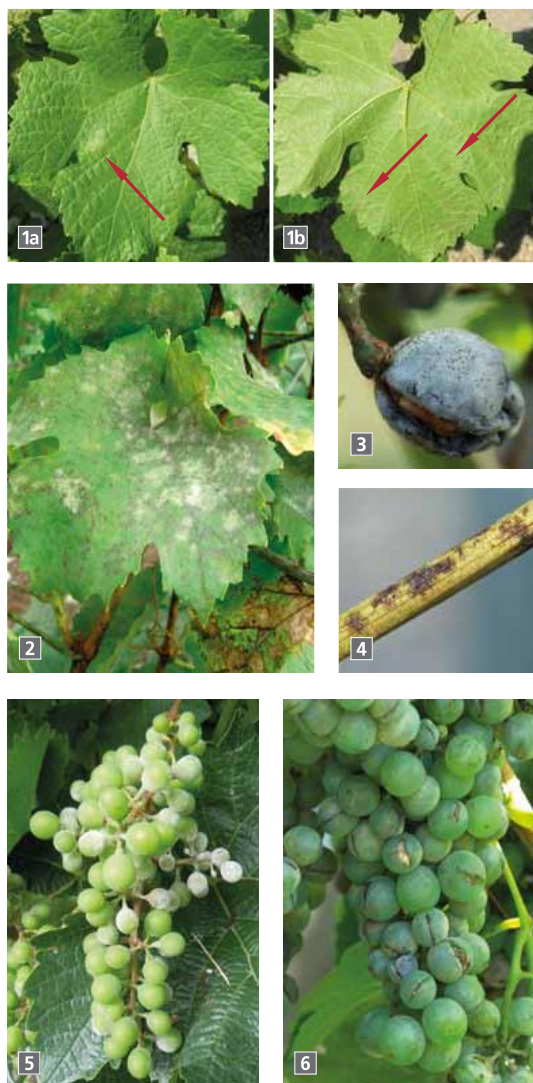


Figure 5 : Principaux symptômes de l'oïdium (Photos : Olivier Viret, Agroscope, 2014).

1a : la face supérieure des feuilles porte de légères décolorations qui ressemblent au stade initial des taches d'huile du mildiou.

1b : A la face inférieure de ces taches, les cellules infectées deviennent gris-brunâtre sous le mycélium grisâtre du champignon.

2 : Les nécroses foliaires se couvrent d'un feutrage blanc-grisâtre.

3 : A la fin de l'été, petits corps globuleux jaunâtres puis brun-noir, ponctuent de façon irrégulière tous les organes atteints.

4 : Ces organes de survie durant l'hiver, les cléistothèces, déclencheront les premières infections l'année suivante. Les rameaux infectés portent de petites taches blanc-gris qui s'étendent et forment de larges plages brunâtres.

5 : Les inflorescences sont recouvertes d'un duvet grisâtre, avortent et tombent.

6 : L'épiderme des baies est déstructuré par le champignon et perd sa plasticité : lorsque la pulpe augmente, les baies éclatent.

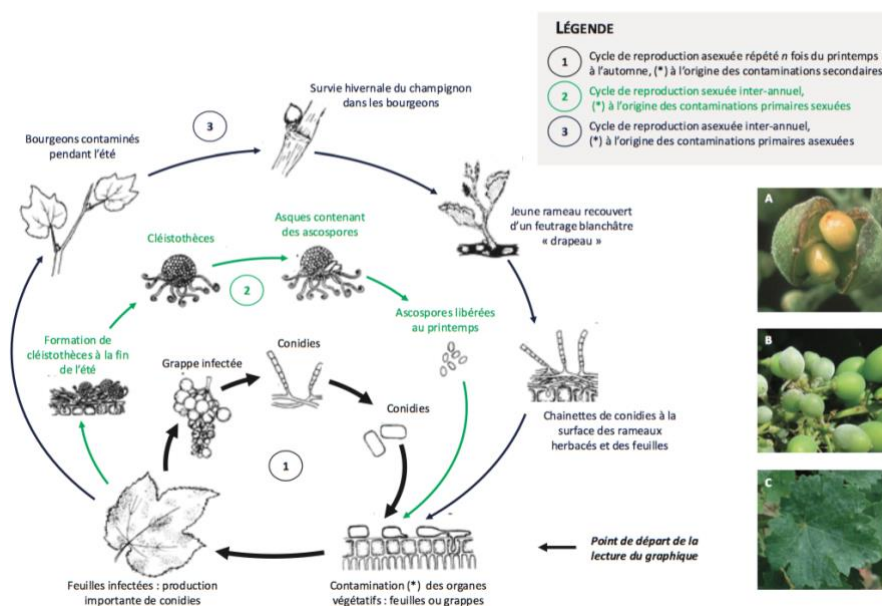


Figure 6 : Cycle de l'oïdium. (Guilpart d'après Pearson et Goheen., 1988).

Le nombre de baies par grappe : Le nombre potentiel de baies par inflorescence est affectés par les conditions environnementales, notamment la température de l'air (Williams *et al.*, 1985), et la vigueur de la vigne (Testic, 2001) au moment de la nouaison. Un déséquilibre entre les parties végétatives et reproductives à cette période peut produire une compétition trophique ou hormonale entraînant la coulure (Carbonneau et Ollat, 1991).

Le remplissage : Quand le nombre de baies par grappe est défini, le processus de remplissage des baies détermine le rendement final. La taille potentielle de la baie est principalement un facteur génétique, mais peut être affectée par d'autres facteurs comme le nombre de baies par grappe (Ollat *et al.*, 2002), la nutrition carbonée (Kaps., 1992), la température (Hale et Buttrose 1974), la lumière (Smart et Sinclair., 1976) et l'alimentation hydrique (Ojeda *et al.*, 2001).

Ainsi, chaque composante s'élabore à un moment précis du cycle de la vigne, en lien aux processus physiologiques qui les déterminent. De plus, ces composantes ne sont pas indépendantes et souvent influencées par l'étape précédente, donnant lieu à des phénomènes de compensation (Keller, 2010). Aujourd'hui, on considère que les variations du rendement sont expliquées à 60% par les variations du nombre de grappes, 30% par les variations du nombre de baies et 10% par celles de la masse moyenne d'une baie (Clingeffer, 2010; Guilpart, 2014).

3. Les bioagresseurs de la vigne et les indicateurs multipests

Les stress biotiques peuvent fortement compromettre les rendements et la qualité des vins (Calonnec *et al.*, 2004; Mérot *et al.*, 2020). Ce chapitre présente les principales maladies rencontrées dans le vignoble français.

3.1. Les maladies annuelles

3.1.1. L'oïdium

Erysiphe necator, est un parasite obligatoire de la vigne (Qiu *et al.*, 2015), ascomycète. Il peut infecter tous les organes herbacés de son hôte (A. Calonnec, communication personnelle, juin 2020) et sa présence sur les organes infectés se reconnaît visuellement à un feutrage blanc poussiéreux (conidies) (Bois, 2017).

Les feuilles fortement affectées entrent généralement en sénescence avec des taches nécrotiques et chute prématurée (figure 5) (Gadoury *et al.*, 2012). L'oïdium présente deux formes de conservation hivernale : (i) du mycélium hivernant dans des bourgeons infectés (cycle de reproduction asexuée), et (ii) les cléistothèces sur l'écorce des ceps (cycle de reproduction sexuée) (figure 6). À la sortie de l'hiver et selon les conditions climatiques, ces deux formes sont à l'origine des contaminations primaires qui sont suivies par des cycles successifs de reproduction asexuée. L'épidémie progresse alors par contaminations secondaires qui sont à l'origine de multiplications explosives (Gadoury *et al.*, 2012).

Moréac Jean-Louis | Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux.



Figure 7 : Principaux symptômes du Mildiou (Photos : Olivier Viret, Agroscope, 2014).

1 : Les premiers symptômes foliaires sont des décolorations jaunâtres circulaires, en « taches d'huile ».

2 : Par temps chaud et humide, il se forme à la face inférieure des taches d'huile un duvet blanc constitué des sporanges du mildiou. Les feuilles fortement atteintes brunissent et tombent prématurément.

3 : Les inflorescences colonisées jaunissent, se recroquevillent, brunissent et sèchent.

4 : Rot gris : les jeunes baies sont recouvertes de sporanges.

5 : Plus tard, les pédoncules des grappes présentent des brunissements étendus et les baies sont atteintes de rot brun (couleur violacée, puis brune et dessèchement).

6 : Les attaques tardives du feuillage provoquent des ponctuations semblables à des « mosaïques » en point de tapisserie (« mildiou-mosaïque »).

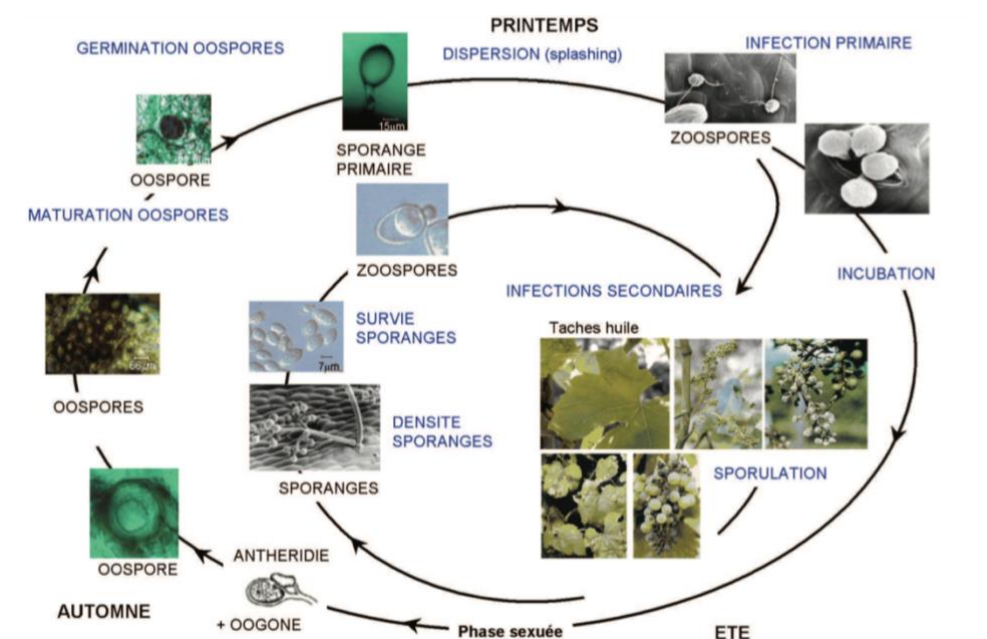


Figure 8 : Cycle biologique de *Plasmopara viticola* (Guilpart d'après Olivier Viret, ACW).

3.1.2. Le mildiou

Plasmopara viticola est dû à une micro-algue, oomycète, biotrophe, originaire d'Amérique du Nord. Il se développe sur tous les organes herbacés de la vigne, particulièrement ceux en pleine croissance à forte teneur en eau (Galet, 1977). En début de saison, y apparaissent des nécroses ressemblant à des taches d'huile, puis en forme de mosaïque en fin de saison. Sur grappes, on retrouve la présence d'un feutrage blanc sur les baies. On distingue les symptômes de **rot gris** particulièrement développés sur les très jeunes grappes, lors de printemps pluvieux, du **rot brun** sur les grappes plus âgées en été, à partir du stade fermeture de grappe (figure 7).

Le mildiou, se conserve en hiver sous forme d'oospores dans les feuilles mortes tombées à terre. Au printemps, ces oospores germent dès que les conditions d'humidité sont favorables et que la température atteint 11°C, aboutissant à des macroconidies qui émettent de nombreuses spores. Ces dernières, provoquent la contamination primaire avec, ensuite, une phase de propagation explosive de la maladie (Gessler *et al.*, 2011) (figure 8).

3.1.3. Impact sur le rendement et la qualité

L'oïdium peut entraîner des pertes importantes de rendement. Une infection précoce des fleurs peut conduire à une mauvaise fructification. Quand les baies sont attaquées, en début du cycle, elles vont rester de taille réduite, voire se flétrir ou tomber, alors que les infections tardives endommagent le péricarpe et causent des fissures lors de la maturation (Keller, 2010). Les dégâts de l'oïdium sur des vignobles non traités peuvent varier de 45% à 97% (Constant, sudvinbio, 2013). L'oïdium peut également avoir des conséquences négatives sur la qualité du vin (Lopez *et al.*, 2017; Calonnec *et al.*, 2004).

Le mildiou peut impacter le volume de la récolte d'une manière considérable. Sur organes herbacés, il provoque l'altération du feuillage et entraîne sa chute précoce ; les grappes, moins bien nourries, sont alors moins développées. Il entraîne surtout, directement, un dessèchement des inflorescences et des grappes qui peut avoir un très fort impact sur le rendement final. En 1915, alors que la main-d'œuvre et les produits de lutte commencent à manquer, le mildiou causa la destruction de 70 % du rendement en France (Gessler, 2011). Aujourd'hui, avec des méthodes de lutte efficace (ANNEXE I), le mildiou est toujours préjudiciable. Par exemple, dans les vignobles australiens, les pertes cumulées depuis l'établissement de la maladie en 1998 sont estimées à 140 millions de dollars australiens (Taylor et Cook, 2018). En France, suite à un printemps pluvieux, l'année 2018 a été qualifiée comme « historique » par certains viticulteurs, avec une pression mildiou jamais vu depuis 50 ans. (J. Roudet, communication personnelle, juin 2020). Le mildiou peut également avoir un impact qualitatif sur le vin. Les moûts issus de vendanges mildiousées sont moins riches en sucre et plus acides (Jermini *et al.*, 2010).



Figure 9 : Symptômes foliaires de l'eutypiose (Jean-Louis Moréac, Château Luchey, juin 2020)



Figure 10 : Necrose brune et dure en position sectorielle caractéristique de l'eutypiose (IFV)

3.1.4. Impact à long terme

Les conséquences de l'oïdium sur le plus long terme peuvent être un affaiblissement des ceps suite à des attaques répétées, une perte de vigueur et des bois mal aoutés, plus sensibles aux gelées avec une faible résistance des bourgeons aux températures basses (Pool *et al.*, 1984).

Selon Racaz et Verge "le mildiou peut compromettre non seulement la récolte, mais encore l'avenir de la vigne". Et selon Jermini (2010), le mildiou cause en effet une baisse de sa production de glucides qui entraîne une compensation de la vigne en mobilisant les glucides de ses réserves (racines, tronc) pour alimenter les grappes. Ainsi, le mildiou est un facteur de stress pour la vigne. La chute des feuilles entraîne également un affaiblissement général des sarments avec mauvaise lignification (aoûttement) des jeunes rameaux avant l'hiver. La composition chimique des rameaux est donc fortement perturbée, car ils ne possèdent pas suffisamment de réserves amylacées (même constatation a été également faite pour le système racinaire). Finalement, la nuisibilité de l'oïdium et du mildiou s'établissent à 3 niveaux que sont la qualité et la quantité de la production de l'année considérée, et l'affaiblissement de la plante l'année suivante (Dubos, 2002).

3.2. Les maladies du bois (MdBs)

3.2.1. Les origines

Les maladies du bois correspondent à différentes maladies fongiques qui s'attaquent aux organes pérennes de la vigne (tronc et bras). Ces maladies sont associées à un cortège de champignons qui entraînent l'affaiblissement, et à terme la mort du cep. Les principales maladies du bois (MdBs) impliquées dans le dépérissement sont : l'esca et le Black Dead Arm (BDA), maladies associées en un seul syndrome « Esca-BDA » (Lecomte *et al.*, 2012), l'eutypiose, le pourridié, la maladie du pied noir, le diaporthe et la verticilliose. Les quatre dernières, moins importantes sur l'ensemble du territoire national, sont traitées en annexe III.

3.2.2. L'eutypiose

L'eutypiose est une maladie de dépérissement causée par le développement dans le bois du champignon *Eutypa lata* (Trouillas *et al.*, 2010). L'incidence et la sévérité de la maladie varient fortement en fonction des régions, de l'âge des ceps et du cépage. En moyenne, la fréquence par parcelle de ceps exprimant des symptômes oscille entre 3 et 4 % (D. Blancard, Ephytia, 2017). Les symptômes foliaires se caractérisent par un rabougrissement des rameaux à petites feuilles chlorotiques, crispées et déchiquetées (Sosnowski *et al.*, 2007) (figure 9). On peut également observer parfois des nécroses sur le limbe, ainsi qu'un dessèchement des inflorescences et/ou des grappes millerandées. Dans le bois, l'eutypiose se traduit par la présence d'une nécrose brune et dure en position sectorielle accompagnée de pourriture blanche (Rolshausen *et al.*, 2008) (figure 10).



Figure 11 : Forme lente de l'esca (photo IFV et Jean-Louis Moréac).



Figure 12 : Forme apoplectique de l'esca (photo IFV).



Figure 13 : Symptômes de l'esca sur fruits (photo Blanchar, INRAE).

3.2.3. Le syndrome BDA-Esca

3.2.3.1. L'esca

L'esca est une maladie causée par plusieurs champignons appartenant à la famille des ascomycètes et basidiomycètes (Larignon et Dubos, 1997) incluant notamment : *Phaemoniella chlamydospora*, *Phaeoacremonium minimum* et *Fomitiporia mediterranea* (Gramaje *et al.*, 2018). Leur dissémination se fait généralement de façon aérienne et la pénétration/infection s'effectue par les plaies de taille où les spores peuvent être véhiculés par la sève. Certains champignons, tel que *P. chlamydospora* ou *P. minimum*, peuvent produire divers métabolites toxiques de faibles poids moléculaires (Bertsch *et al.*, 2013) qui pourraient être à l'origine des symptômes (Calzarano *et al.*, 2017).

L'esca est une maladie décrite comme un syndrome complexe (Lecomte *et al.*, 2012; Calzarano *et al.*, 2017), avec une phase endophytique, dans le bois, où les champignons colonisent **asymptomatiquement** leurs hôtes pour former des infections latentes. Ils peuvent cependant, ensuite, dans des conditions encore mal connues, devenir plus envahissants et induire des symptômes foliaires alternant avec des phases (années) de rémissions asymptomatiques au niveau foliaire (Sakalidis *et al.*, 2011; Lecomte *et al.*, 2012). Les symptômes foliaires de l'esca, visibles uniquement chez les plantes adultes (de dix ans ou plus), débutent en été dès les premières chaleurs : juin en conditions du SW de la France, et s'aggravent durant toute la période végétative (Lecomte *et al.*, 2012). Les symptômes prennent deux formes : (1) l'une à évolution lente, avec affaiblissement progressif des ceps et reconnaissable par une tigrure des feuilles (figure 11) ; (2) la forme **apoplexique** se traduisant par un dessèchement et une mort brutale des ceps en quelques jours en saison, notamment en fin de saison (Mugnai *et al.*, 1999; Lecomte *et al.*, 2012) (figure 12). Les symptômes sur fruits se traduisent toujours par un retard de maturation, et souvent par leur flétrissement (Dubos et Larignon, 1987) (figure 13). Dans le bois, une pourriture blanche appelée amadou est caractéristique de l'esca. Les nécroses dans le bois, sont en position centrale ou sectorielle (Larignon, 2016) (figure 14). Un autre type de lésion existe au-dessous de l'écorce et se remarque par une altération longitudinale et superficielle, de couleur jaune-orangée, lorsqu'elle est récente (figure 15) (Lecomte *et al.*, 2012).

3.2.3.2. Chancres à *Botryosphaeriaceae*

Le Black Dead Arm (BDA) est associé à l'esca, pour former le syndrome BDA-Esca (Lecomte *et al.*, 2012). L'acception récente est plutôt de parler de « Chancres à *Botryosphaeriaceae* » (au lieu de Black dead arm, BDA) en associant ces chancres à plusieurs espèces de champignon de la famille des *Botryosphaeriaceae* qui sont capables de coloniser de nombreux végétaux ligneux. Parmi les espèces les plus fréquentes figurent : *Diplodia seriata*, *Botryosphaeria obtusa*, *Diplodia mutila* et *Neofusicoccum parvum*. Les sources d'inoculum sont localisées soit sur le cep, soit sur les bois de taille laissés au sol. Les spores sont disséminées de façon aérienne pendant la période végétative de la vigne et l'infection se produit via les plaies de taille (Urbez-Torres, 2011).



Figure 14.: Nécroses sectorielles (A), centrales (B) et mixtes (C) associées à l'esca (Lecomte, 2013).



Figure 15.: Nécrose longitudinale (« bande brune ») sous l'écorce d'un cep atteint par l'esca (Ephytia, INRAE).



Figure 16.: Photographie d'un sarment inoculé artificiellement par une espèce de *Botryosphaeriaceae* présentant des picnides (Carlucci, 2015).

Au niveau de la symptomatologie, les chancre à *Botryosphaeriaceae* ont longtemps été confondus avec l'esca, car les symptômes sont très similaires (Luque *et al.*, 2009). Les symptômes sont visibles dès le débourrement par des bourgeons noirs ou morts (Urbez Torres, 2011). Des nécroses noires peuvent apparaître sur les entre-nœuds proches de la base du sarment de l'année, le sarment devient alors cassant (Van Niekerk *et al.*, 2006) (figure 16). Les feuilles peuvent être atteintes de chlorose et la pousse végétative ralentie (Lecomte *et al.* 2012, Carlucci *et al.* 2015). Les inflorescences et les grappes peuvent se flétrir, se dessécher et tomber avant la récolte. L'aoutement des sarments de l'année est souvent incomplet, les rameaux mal aoutés prennent une couleur blanchâtre et à l'automne des pycnides noires à leur surface peuvent être observées (Philips, 1998 ; Carlucci *et al.*, 2015). On peut également observer des nécroses sectorielles (Castillo *et al.* 2001) de couleur foncée ainsi que des décolorations du bois le long des vaisseaux, parfois accompagnées de chancre (Urbez Torres, 2011) (figure 17).

3.2.3.3. Le syndrome BDA-Esca

De nombreux chercheurs dans le monde, considèrent très aléatoire de diagnostiquer l'esca ou les chancre à *Botryosphaeriaceae* sur la base des symptômes foliaires (Viret et Gindro, 2014) (figure 18). La forme apoplectique est, elle, non spécifique, non plus. De plus, alors que le postulat de Koch a été établi pour l'eutypiose, il ne l'a été qu'à une occasion pour l'esca (Sparapano *et al.* 2001) et jamais pour les dépérissements à *Botryosphaeriaceae*. L'observation simultanée des deux symptomatologies sur les mêmes ceps et souvent sur les mêmes feuilles a conduit progressivement les notateurs à ne plus dissocier ces deux faciès et à regrouper tous les symptômes en une classe, appelée « **BDA-esca** » (Fussler *et al.*, 2008; Lecomte *et al.*, 2012).

3.2.3.4. Les facteurs influençant les symptômes

Les facteurs influençant ces maladies sont nombreux et encore mal-connus malgré de lourds efforts de recherche. Les symptômes s'expriment très différemment selon l'état physiologique des plantes, le sol, l'année (variabilité des symptômes d'une année sur l'autre, dont rémission), le cépage le porte-greffe et l'âge des ceps (Pandey *et al.*, 2015). Les facteurs pédoclimatiques connus pour favoriser les maladies sont les sols à forte capacité de rétention hydrique et les fortes variations climatiques (Fischer, 2012; Surico *et al.*, 2006). Ces variations climatiques provoquent une trop forte évapotranspiration du feuillage, qui n'est plus compensée par un afflux en eau suffisant (faible flux de sève). L'expression de l'esca semble aussi être influencée par l'état hydrique de la plante durant ses phases de croissance, par sa vigueur, le rapport carbone/azote de ses tissus (Berger *et al.*, 2007), et l'état de son système vasculaire (Andreini *et al.*, 2009). Des études réalisées par Agroscope, révèlent que des ceps présentant de légers symptômes d'esca, souffrent déjà de défaillances hydriques importantes par rapport à des plantes asymptomatiques; défaillances dues au développement des champignons dans les vaisseaux et à la sécrétion de gommages et de gels par la plante (Morton, 1995).



Figure 17 : Nécrose sectorielle liée au chancre à *Botryosphaeriaceae* (Lecomte, INRA).



Figure 18 : Forme apoplectique (A) et forme lente d' ESCA-BDA sur cépage noir (B). Photo de symptômes foliaires sur cépage noir (C) et sur cepage blanc (D) (Bénétreau., 2014).

L'itinéraire technique en pépinière influence aussi la qualité de robustesse d'un plant lors de son implantation au vignoble. Lors de la plantation, une absence de rotation, une mauvaise préparation du sol, une date de plantation tardive ou un arrosage insuffisant, contribuent au développement des champignons. Après la plantation, la surproduction, la qualité de la taille, la mécanisation et les systèmes de conduite simplifiés peuvent être impliqués dans l'expression de ces maladies du bois. Une fois la culture implantée, la mise en place d'une stratégie de lutte est primordiale afin de retarder l'apparition et la propagation de ces maladies (ANNEXE II).

4. Les indicateurs multipests AIDB et AIDB+ : lien aux pertes de RDT

4.1. L'AIDB

L'Indicateur d'Evaluation des Dégâts sur Grappes, « AIDB » pour « Assessment Indicator of Damage in grape Bunches », a été élaboré afin de disposer d'un indicateur d'évaluation synthétique adapté à la gestion et à l'évaluation du risque parasitaire global (Fermaud *et al.*, 2016). Cet indicateur intègre les attaques cumulées dues aux principaux bio-agresseurs sur les grappes de vigne : le mildiou, l'oïdium, la pourriture grise et les tordeuses de la grappe. Alors que les indicateurs précédents ont toujours été construits sur une base mono-pest (pathogène par pathogène), les objectifs sont de mieux évaluer l'efficacité des luttés contre les bio-agresseurs, ainsi que d'estimer les **pertes de rendements éventuelles imputables à l'ensemble du cortège parasitaire**.

$$\text{AIDB}(\%) = 100 - (A \times B)$$

Avec, **A (%)** = [100 – (DMF% + GMF%)]

Et, **B (%)** = {1 – [(DMB% + PM% + GMB% + TM%)/100]}

Ou, **A** correspond à la sévérité de mildiou (DMF) et de Botrytis (GMF) à la floraison et **B** correspond i) la sévérité du mildiou (DMB) et de l'oïdium (PM) au stade pré-véraison, et ii) à la sévérité du Botrytis (GMB) ainsi que des dégâts de tordeuses (TM) à la vendange.

4.2. L'AIDB +

L'AIDB, ne prend pas en compte les maladies qui s'expriment sur un long terme telles que les maladies du bois ou la perte de rendement liée aux ceps complantés « CPs » (souvent suite à des problèmes de MdBs). L'équation de l'AIDB a été retravaillée amenant à l'AIDB+. En plus des maladies cryptogamiques initiales, l'AIDB+, pour mieux analyser les pertes de rendement, intègre les pertes de charge dues aux ceps morts, atteints de maladies du bois ou remplacés (CPs). Ont été ajoutées les maladies suivantes : le BDA-Esca, l'Eutypiose, le Black rot et la pourriture acide (Sour rot). L'AIDB+, s'avère donc être un outil de diagnostic très utile pour mieux caractériser, diagnostiquer, analyser et comparer, l'impact du cortège des bioagresseurs sur le dépérissement au vignoble. L'équation de l'AIDB+ sera développée dans la partie matériel et méthodes.



Figure 19 : Les 4 grands axes du Plan National Dépérissement du Vignoble.

5. Le Plan National Dépérissement du Vignoble PNDV

5.1. Présentation du PNDV

Lancé en 2016, le Plan National Dépérissement du Vignoble a permis de lancer des travaux pluriannuels s'articulant autour de quatre axes complémentaires et indépendant (figure 19) :

- La **formation et l'accompagnement** des acteurs au niveau collectif ou individuel.
- L'**amélioration de l'approvisionnement en matériel végétal**, quantitativement, afin de répondre à la demande liée à l'arrachage et à la complantation, comme qualitativement, afin de disposer de cépages adaptés aux enjeux épidémiologiques et du changement climatique.
- La **mise en place d'un observatoire du vignoble** pour anticiper les crises et identifié les actions correctrices.
- Le **lancement d'un plan de recherche** à l'échelle nationale.

5.2. Le projet TraDéVi

Le projet TraDéVi pour "**Trajectoires de Dépérissement des Vignobles**", s'inscrit dans le PNDV et propose une approche systémique et transversale du dépérissement du vignoble, aux échelles du cep, de la parcelle et de l'exploitation viticole. Il vise à identifier les facteurs biotiques, abiotiques et techniques contribuant au dépérissement des ceps, afin de reconstruire des trajectoires de croissance et détecter des événements susceptibles d'avoir favorisé ou déclenché le dépérissement. Il caractérise également les processus écophysologiques, les conditions de structure et d'état biologique du sol et **les effets du cortège de bioagresseurs qui peuvent contribuer indirectement à l'affaiblissement des ceps et/ou, directement, à la baisse de productivité.**

Le projet TraDéVi permet notamment la construction d'indicateurs d'état sanitaire ou physiologique de la plante et d'état physique ou biologique du sol qui seront utilisés pour un diagnostic sur des exploitations viticoles, où les paramètres techniques, organisationnels et économiques seront également évalués notamment par enquête.

5.3. Intérêts et objectifs de l'étude

Les objectifs de cette étude sont :

- (1) de mettre en avant et analyser les relations multiples, et souvent complexes, entre la pression multi-pathogènes, la vigueur et le rendement chez la vigne,
- (2) d'observer / analyser dans quelle mesure le phénomène de dépérissement du vignoble impacte t'il le rendement ?
- (3) enfin, mais surtout de se demander si des indicateurs, tels que l'indicateur multi-pathogènes AIDB+ et/ou un indicateur de vigueur tel le NDVI, peuvent représenter ("capter"), voire permettre de quantifier ce phénomène de dépérissement de façon fiable et reproductible. (La possibilité ultérieure d'en faire des outils/indicateurs diffusables est également envisagée.)

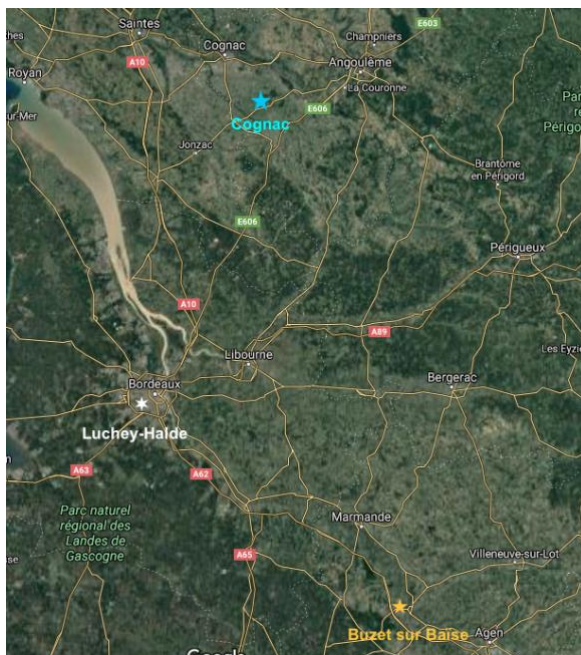


Figure 20 : Disposition du réseau de parcelles du projet TraDÉVi.



Figure 21 : Disposition des parcelles de Cognac.

Tableau 1 : Présentation des parcelles de Cognac ainsi que les stratégies de traitements associées.

Parcelle	Stratégie de traitements
Eraville	Agriculture Biologique
Juillac-le-Coq	Conventionnel, Biocontrôle et TNT
Saint-Même-les-Carrières	Conventionnel et TNT
Segonzac chez Collet	Conventionnel
Saint-Fort sur le Né	Conventionnel

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Les parcelles d'étude

1.1. Le réseau TraDeVi

Le réseau de parcelles du projet TraDeVi s'étend sur 2 principales zones d'étude (figure 20) :

- le vignoble océanique (Bordelais + Cognac)
- le vignoble méditerranéen (Occitanie)

Ce mémoire porte sur l'étude des résultats du vignoble océanique. Au total, huit parcelles seront étudiées, dont cinq situées sur le vignoble de Cognac et quatre dans le vignoble bordelais : Château Luchey-Halde (Bordeaux Sciences Agro).

1.2. Le choix des parcelles du réseau

Les parcelles suivies ont été admises comme étant dépérissantes. C'est-à-dire, qu'elles présentent **une baisse chronique anormale de rendement** (non associée au vieillissement des ceps, ou, associée pour partie seulement à une maladie de type maladies du bois) ou une **mortalité excessive non attribuable aux seules maladies du bois**. Ces parcelles sont présentées figures 21, 22 et tableaux 1, 2.

1.3. Zone d'étude et plan d'échantillonnage

Au sein de chaque parcelle d'étude, une analyse d'hétérogénéité parcellaire a été effectuée afin d'identifier les grandes zones considérées comme homogènes dans chaque parcelle. Parmi ces zones, il a été choisi de travailler sur la zone la plus dépérissante (surface minimum de 0.5ha). Par la suite, 3 rangs ont été choisis, assez éloignés les uns des autres, pris au hasard dans la zone d'étude, en évitant des zones de la parcelle très atypiques et/ou très exceptionnelles (ex. rang d'extrême bordure, mouillère très localisée...). Sur chacun de ces rangs "R", un cep a été identifié au hasard de manière à ce que les 3 ceps quadrillent la parcelle (figure 23 et 24). Chaque cep sélectionné délimite une placette de 30 emplacements consécutifs. Ces placettes constituent les zones de prélèvement et de suivi.

2. Notations des maladies du bois et des jeunes ceps improductifs ou faiblement productifs

Lors de la floraison, de la véraison ainsi qu'à la vendange, les symptômes sur ceps sont évalués visuellement. L'évaluation a lieu sur chacune des 3 placettes.

2.1. Les maladies annuelles

L'évaluation des maladies annuelles (mildiou, oïdium, Botrytis, tordeuse) est réalisée à 3 reprises au cours de l'année, à la floraison, la pré-véraison et à la récolte (tableau 4). Les mesures sont dites « grappe-centrées » car elles sont réalisées sur 30 inflorescences ou 30 grappes, selon le

Moréac Jean-Louis | Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux.

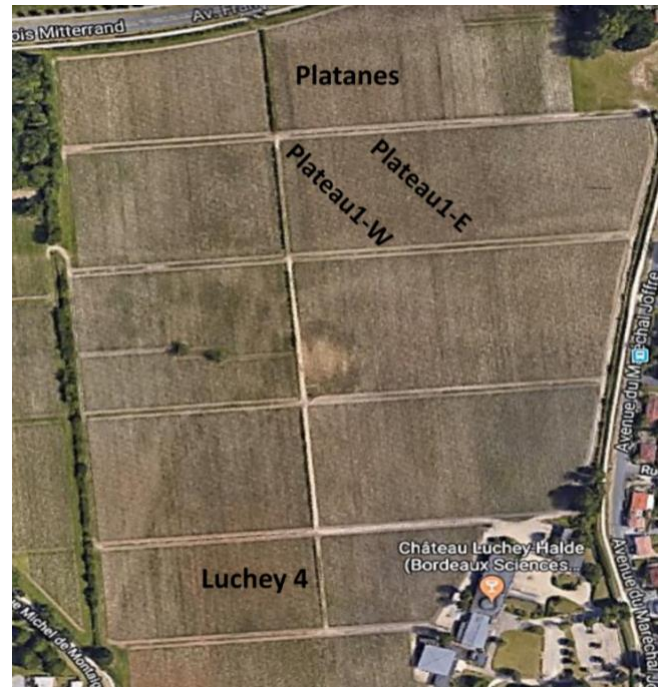
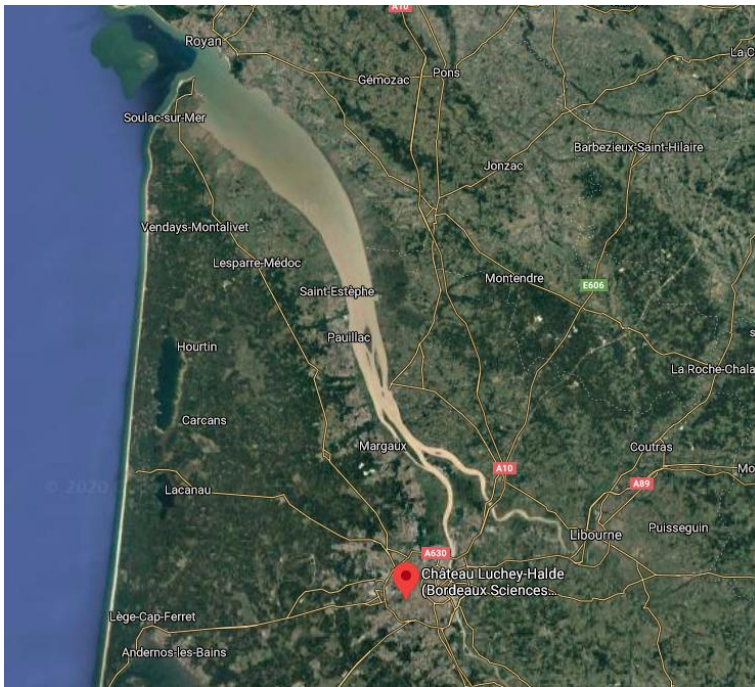


Figure 22 : Disposition des parcelles de Bordeaux.

Tableau 2 : Présentation des parcelles de Bordeaux ainsi que les stratégies de traitements associées.

Parcelle	Sous-catégorie	Stratégie de traitement
Luchey 4	0	Conventionnel
Platane	0	Conventionnel
Plateau 1	Plateau 1 Est (Non dépérissante)	Conventionnel
	Plateau 1 Ouest (Dépérissante)	Conventionnel

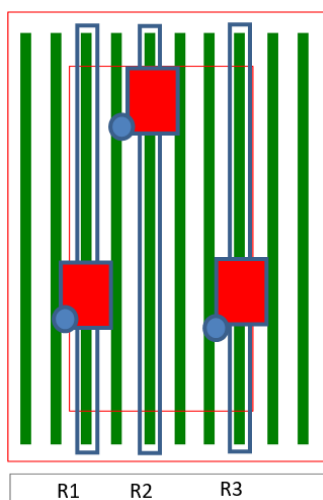


Figure 23 : Placettes de 30 emplacements consécutifs identifiés par rapport à 1 cep.

stade de mesure. Les 30 inflorescences ou grappes sont mesurées en les échantillonnant au hasard espacées les unes des autres sur la longueur de chaque placette à raison de 15 d'un côté du rang et 15 de l'autre côté. L'évaluation de la sévérité des maladies est estimée en pourcentage de l'inflorescence ou de la grappe touchée.

2.2. Les maladies du bois

L'évaluation des maladies du bois est réalisée également à 3 reprises au cours de l'année, à la floraison, à la pré-véraison et à la récolte. Sur chaque placette, chaque cep est noté individuellement selon le tableau 5. Les notations portent notamment sur :

- Les nombre de ceps par catégorie et par placette.
- La charge des ceps, qui correspond au nombre de grappes et grappillons sur un cep. La charge est évaluée à raison de 5 ceps « normaux » et tous les ceps malades (Esca, Eut, CP, M/2) à la véraison et à la récolte.
- Le poids de grappes, qui est mesuré par pesée à raison de 5 ceps « normaux » et tous les ceps malades (Esca, Eut, CP, M/2) à la récolte.
- Le taux de flétrissement des grappes ("SES%" = shriveling ratio %) sur les ceps atteints du syndrome BDA-Esca. Ce taux de flétrissement des grappes est évalué en pourcentage de pertes sur l'ensemble des grappes du cep, en intégrant les grappes même très flétries. Lorsque cette évaluation n'a pas été réalisée visuellement lors de la récolte, l'estimation du taux de flétrissement est réalisée grâce à la formule :

$$SES\% = 100 - \left(100 \times \frac{\text{Masse moyenne des grappes "Es"}}{\text{Masse moyenne des grappes "N"}} \right)$$

3. Indicateurs, indices et formules

3.1. Les indicateurs AIDB et AIDB +

A partir des différentes mesures de maladies précédemment évoquées, les indicateurs AIDB et AIDB+ peuvent être mesurés. La formule de l'AIDB a précédemment été présentée en introduction (cf partie c.1). L'indicateur multi-pathogène AIDB+ est une évolution de l'indicateur AIDB qui intègre en plus des maladies annuelles, les maladies de dépérissement. (ANNEXE IV).

3.2. Les indices NDVI

La vigueur végétative de la vigne a été estimée en utilisant l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obtenu à partir de mesures au sol (piéton) avec un Greenseeker (N-Tech Industries, Ukiah, USA ; et Oklahoma State University, Stillwater, USA). Cet indice permet de visualiser la porosité du feuillage et de quantifier l'hétérogénéité de vigueur d'une parcelle de vigne. La mesure a été décrite par Drissi et al. (2009) et a donné un indice variant de 0 à 1.

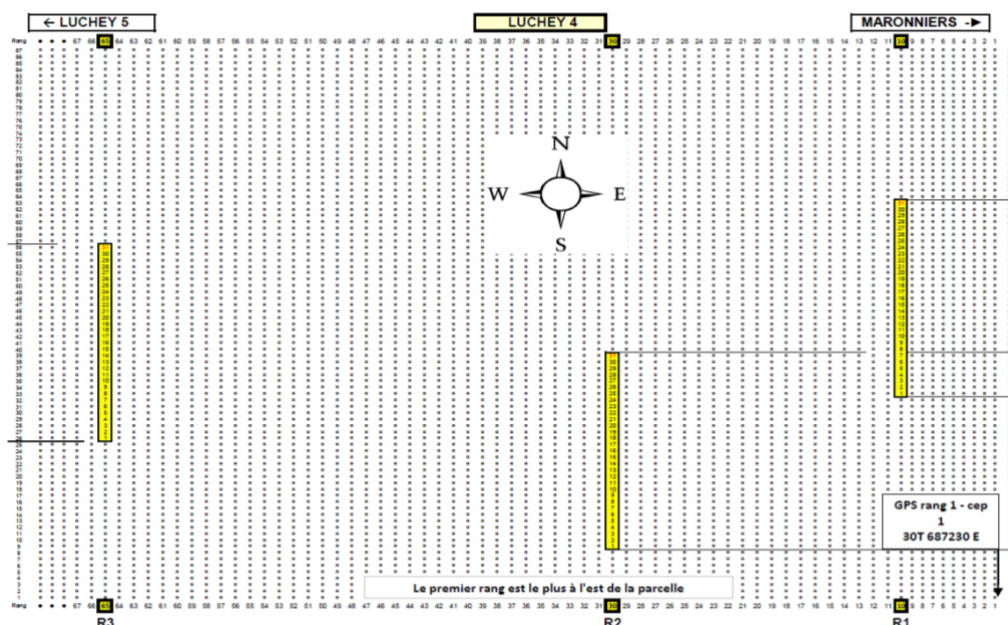


Figure 24 : Plan d'une parcelle d'étude (ici Luchey 4).

Tableau 3 : Typologie et nomenclature des ceps étudiés

Typologie des ceps	Caractéristique	Qualification
Morts	Cep encore présent, mais ne présentant pas de signe de vie (absence de débourrement)	M
Absents	Emplacement vide	A
Un bras mort	Cep présentant un côté mort	M/2
BDA-Esca	Cep atteint du syndrome BDA-Esca présentant des symptômes l'année en cours.	Es
Eutypiose	Cep atteint d'Eutypiose présentant des symptômes l'année en cours	Eu
Complants peu productifs	Jeune plant, greffé, marcotte, de production limitée à nulle.	CP
Ceps normaux	Cep vivant ne présentant pas de symptômes d'Eutypiose et d'Esca-BDA	N

Tableau 4 : Mesures des maladies annuelles au cours de l'année

Stades	Maladies	Qualifications
Floraison	Mildiou (rot gris)	DMF
	Botrytis	GMF
	Tordeuses G1	TMF
Pré-véraison	Mildiou (rot brun)	DMB
	Oïdium	PMB
	Black rot	BR
Récolte	Tordeuses G2 + G3	TMB
	Botrytis	GMB
	Pourriture acide	SR

valeurs élevées correspondent à la vigueur végétative et à la densité foliaire maximales dans la végétation. L'indice NDVI a été mesuré à la floraison, la véraison et la vendange grâce à un appareil Greenseeker piéton (figure 25). Le long des placettes identifiées, trois modalités de passages ont été mesurées (du même côté du rang le long des 30 emplacements de ceps) :

- **NDVipass1-total** : Premier passage où toute la placette de 30 emplacements est mesurée sans arrêt (incluant absents, complants, ceps symptomatiques Es, Eu).
- **NDVipass2-vivants** : Deuxième passage où l'on suspend les mesures au passage des ceps manquants et morts (mesure incluant, complants, ceps symptomatiques Es, Eu).
- **NDVipass3-normaux** : Troisième passage où, seules les zones à ceps « normaux » sont mesurées (en évitant manquants, complants, ceps symptomatiques, Eu).

Le Greenseeker est placé entre 80 et 120 cm de la végétation. Le faisceau de lumière est orienté vers le feuillage, le Greenseeker étant placé à mi-hauteur du feuillage afin d'obtenir une vue globale de la porosité dans la partie médiane du rideau de végétation. Le porteur de l'appareil avance en marchant à une vitesse constante pour avoir une prise de données régulière. Une seconde personne située de l'autre côté du rang, porte un panneau blanc (figure 26).

3.3. Les rendements

3.3.1. Le rendement théorique

Chaque année, le viticulteur se fixe un objectif de rendement en fonction de ces pratiques culturales. Cette information doit être collectée auprès du viticulteur par entretien. Cependant, en cas de manque d'information, un calcul de rendement théorique peut être réalisé :

$$\begin{aligned} \text{Rendement théorique (kg/placette)} \\ = 30 \times \text{Nb de rameaux fructifères} \times 2 \times \text{Masse moyenne d'une grappe} \end{aligned}$$

avec :

- **Nb de rameaux fructifères** = Moyenne du nombre de rameaux fructifères des ceps normaux. Le nombre de rameaux fructifères, est mesuré sur 5 ceps normaux par placette.
- **30** = Nombre de cep dans une placette.
- **2** = Nombre de grappes théoriques par rameau fructifère, dans une parcelle de vigueur faible à moyenne sur Cabernet Sauvignon.
- **Masse moyenne d'une grappe** = Masse moyenne d'une grappe d'un cep normal.

3.3.2. Le rendement réel

Le rendement réel d'un cep ou d'une placette est calculé selon l'équation suivante :

Tableau 5 : Mesures des maladies du bois au cours de l'année.

Stades	Maladies	Qualifications	Mesures
Floraison	Eutypiose	Eu	- Nombre de ceps - Sévérité
Pré-véraison	Absent	A	- Nombre de ceps
	Mort	M	
	Complant	CP	- Nombre de ceps - Charge des ceps
	BDA-Esca	Es	- Nombre de ceps - Charge des ceps
	Eutypiose	Eu	- Nombre de ceps - Charge des ceps
	Normal	N	- Nombre de ceps - Charge des ceps
Récolte	Absent	A	- Nombre de ceps
	Mort	M	
	Complant	CP	- Nombre de ceps - Charge des ceps
	BDA-Esca	Es	- Nombre de ceps - Sévérité - Charge des ceps - $S_{ES\%}$ - Feuillage atteint (%)
	Eutypiose	Eu	- Nombre de ceps - Sévérité - Charge des ceps - Feuillage atteint (%)
	Normal	N	- Nombre de ceps - Charge des ceps



Figure 25 : Appareil Greenseeker portatif à long canne (Jean-Louis Moréac, Château Couhins, juin 2020)

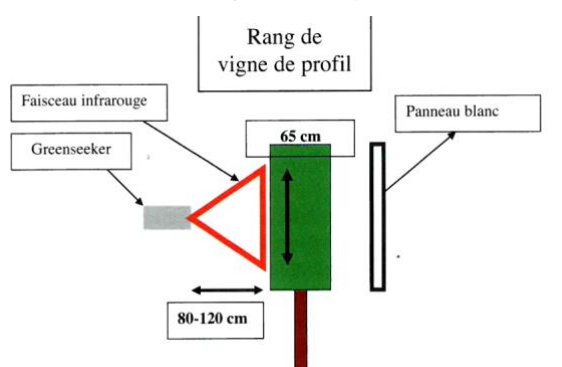


Figure 26 : Principe de mesure de l'indice NDVI (Fermaud et Roudet, 2015).

$$\text{Rendement (kg/cep)} = 1/100 \times [(\text{Poids moyen Esca} \times \text{Fréquence Esca}) + (\text{Poids moyen Eut} \times \text{Fréquence Eut}) + (\text{Poids moyen CP} \times \text{Fréquence CP}) + (\text{Poids moyen } M/2 \times \text{Fréquence } M/2) + (\text{Poids moyen N} \times \text{Fréquence N})]$$

et :

$$\text{Rendement (kg/placette)} = \text{Rendement (kg/cep)} \times 30 \text{ ceps}$$

avec :

Poids moyen x (kg/cep) = Poids moyen des grappes et grappillons des ceps de la catégorie X dans la placette.

Fréquence x (%) = Fréquence des ceps de la catégorie X dans la placette.

3.3.3. Le taux de réalisation du rendement (YAR)

Le taux de réalisation du rendement (« YAR » pour Yield Achievement Rate) correspond au pourcentage du rendement théorique réalisé par le rendement réel :

$$\text{YAR (\%)} = \frac{\text{Rendement réel}}{\text{Rendement théorique}} \times 100$$

4. Les analyses statistiques

Suite aux différentes phases de récupération des bases de données par les partenaires du projet TRADEVI, une mise en forme des données sous Excel a été réalisée. Par la suite, les différentes variables précédemment nommées à l'échelle de la placette ont été calculées. A l'aide du logiciel R studio, des analyses descriptives ont été réalisées via des analyses en composantes principales afin de comprendre les éventuelles corrélations entre les variables et les notions de distances entre les individus. Afin de confirmer les corrélations entre les différentes variables, des tests d'association entre deux variables quantitatives ont été réalisées via des tests de corrélation de Pearson (test paramétrique) et Spearman (test non-paramétrique). Le logiciel R version 4.0.2 (<https://cran.r-project.org/base/R-4.0.2-win.exe>) est utilisé pour toutes les analyses statistiques.

RÉSULTATS

1. Relations entre indices de vigueur et indices de dépérissement

Les indicateurs de dépérissement sont mis en relation avec les différentes mesures de NDVI. Ces évaluations ont lieu à l'échelle de la placette.

1.1. Bordeaux

Les indices NDVI des parcelles de Bordeaux, ont été mesurés aux stades véraison et vendange.

Moréac Jean-Louis | Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux.

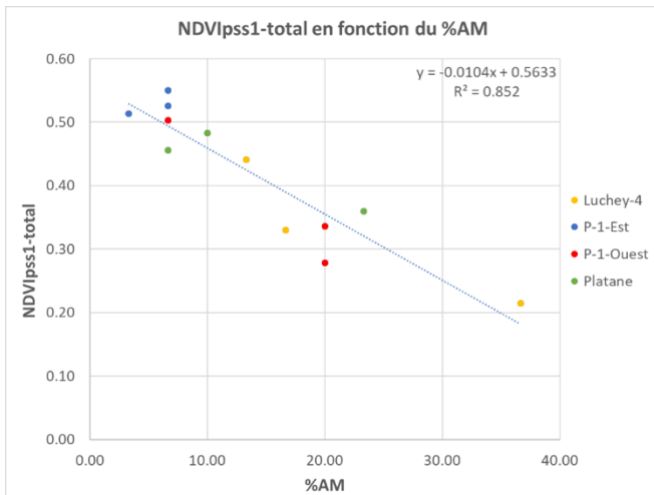


Figure 27: Indice NDVI total en fonction du pourcentage d'AM. Pour cette figure et pour toutes les figures suivantes, 3 points de couleur correspondent aux 3 placettes de la parcelle de cette même couleur.

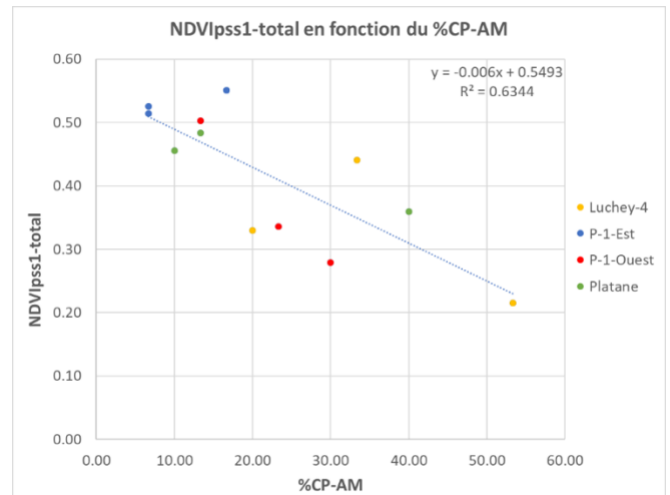


Figure 28: Indice NDVI total en fonction du pourcentage d'CP-AM.

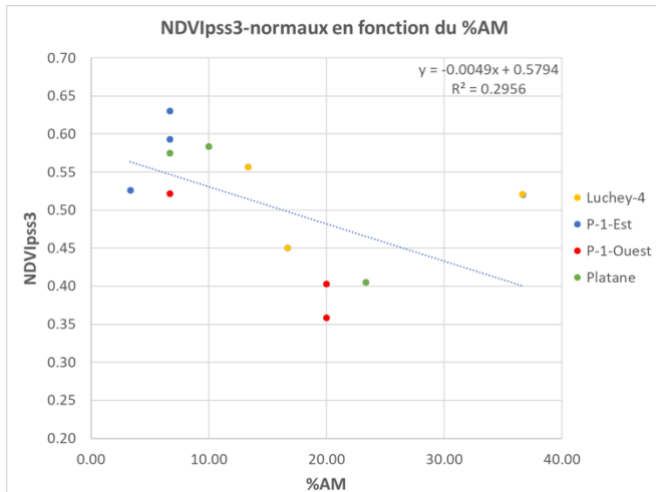


Figure 29: Indice NDVI des ceps normaux en fonction du pourcentage d'AM.

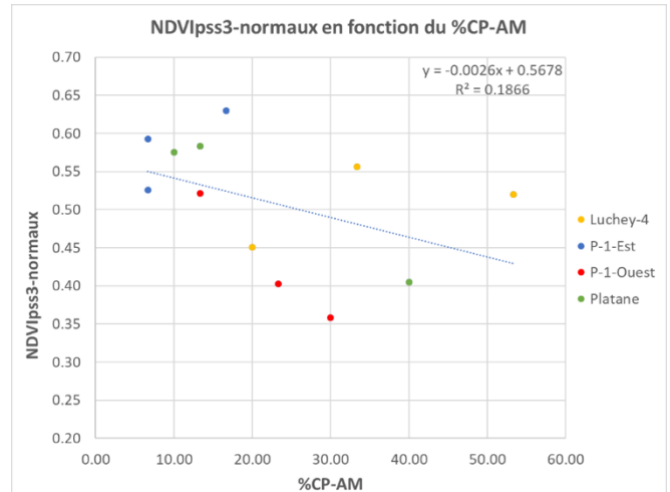


Figure 30: Indice NDVI des ceps normaux en fonction du pourcentage d'CP-AM.

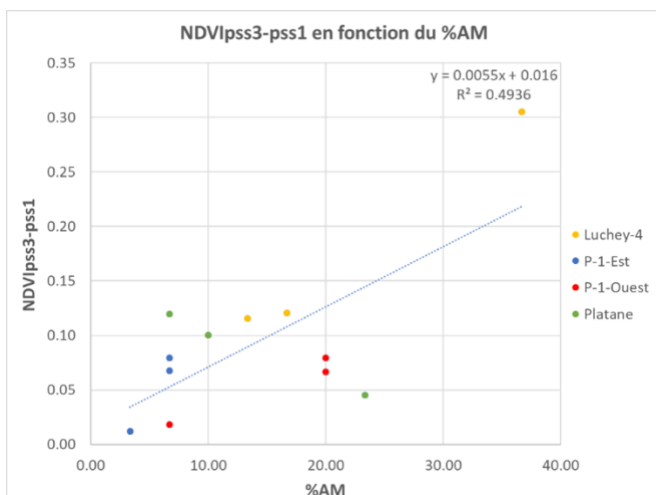


Figure 31: Indice NDVipassage3-passage1 en fonction du pourcentage d'AM.

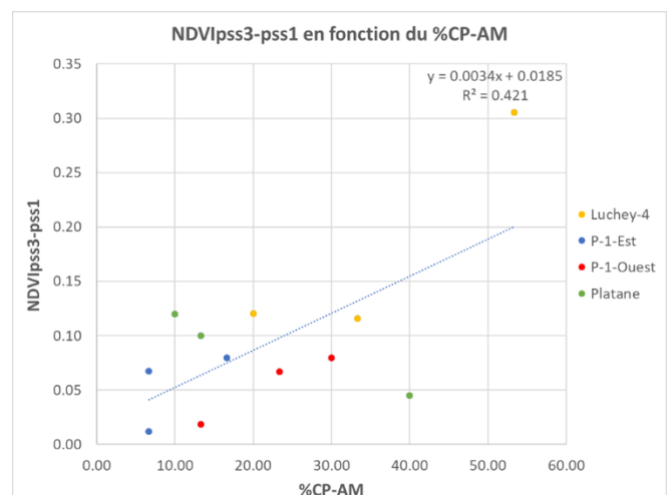


Figure 32: Indice NDVipassage3-passage1 en fonction du pourcentage d'CP-AM.

1.1.1. Indice NDVI global de tous les ceps de la placette

La figure 27 présente une relation négative entre le pourcentage de ceps absents et morts (AM) et l'indice NDVI de la placette. Cette relation est très significative avec une p-value <0.00001 . L'indice NDVI du passage 1 représente la vigueur totale de la placette. Une augmentation de 10% d'absents/morts entraîne une baisse de 0.1 de l'indice NDVI total de la placette.

La figure 28 présente une corrélation négative entre le pourcentage de ceps absents, morts, intégrant aussi les complants (CP-AM) avec la vigueur totale de la placette. Cette corrélation est également significative (p-value = 0.0019). Au vu du R^2 des équations, on peut noter que l'indice NDVI global est mieux corrélé à l'indice de dépérissement AM plutôt que l'indice CP-AM.

1.1.2. Indice NDVI des ceps normaux de la placette

Le passage 30 du GreenSeeker permet de mesurer l'indice NDVI uniquement des ceps normaux. Les figures 29 et 30 montrent une relation négative entre les indicateurs de dépérissement et l'indice NDVI des ceps normaux. Cependant, ces corrélations ne sont pas significatives au seuil de signification $\alpha=0,05$. Les p-value sont de 0.068 pour le %AM et de 0.16 pour le %CP-AM. Par conséquent, on peut seulement évoquer une tendance à la baisse de la vigueur des ceps normaux avec l'augmentation des indicateurs de dépérissement.

1.1.3. Différence entre l'indice NDVI des ceps normaux et l'indice NDVI global

Au sein d'un vignoble, la perte de vigueur liée au dépérissement est imputable aux ceps morts, absents, aux complants, ainsi qu'aux ceps symptomatiques des maladies du bois (BDA-Esca et Eutypiose). Ces ceps présentent une absence ou faible végétation qui fait baisser la vigueur globale de la parcelle. La soustraction de l'indice NDVI des ceps normaux moins l'indice NDVI global, permet de capter la perte de vigueur liée au dépérissement. On observe via les figures 31 et 32, qu'une augmentation de l'indice de dépérissement entraîne une augmentation de la perte de vigueur liée au dépérissement. Cette corrélation est significative avec une p-value de 0.01083 pour le %AM et de 0.02245 pour le %CP-AM. Cependant, on peut remarquer que cette tendance n'est pas suivie pour les placettes de Platane.

Également, le nuage de points ne forme pas une ellipse autour de la droite de régression. En fait un seul point tire la relation (point indiqué par une flèche rouge). Ces deux faits nous amènent à nous poser des questions sur la réelle significativité de cette relation.

1.2. Cognac

Les mesures de l'indice NDVI pour les parcelles de Cognac ont été réalisées à la floraison car passer ce stade, l'indice NDVI est saturé. En effet, les données NDVI de Cognac acquises à la véraison et à la récolte sont toutes au niveau du seuil de saturation du GreenSeeker estimé à 0,80 (Panitrur-De la Fuente *et al*, 2020).

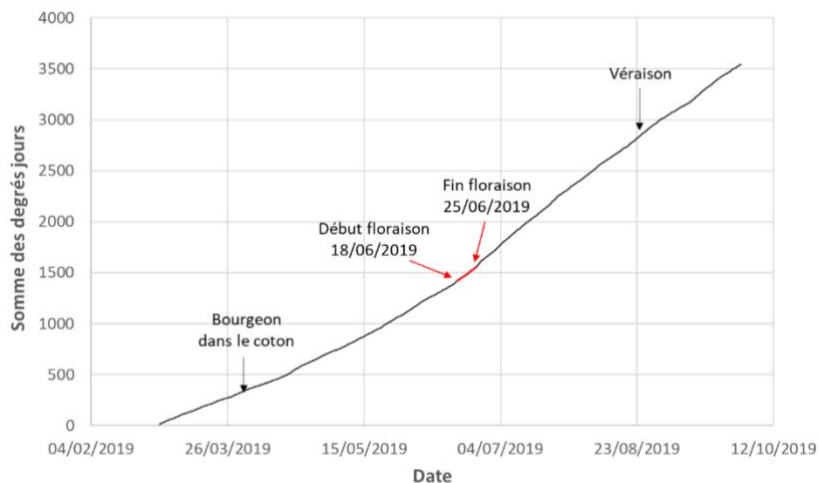


Figure 33 : Évolution de la somme des degrés jours (en base 0°C) en 2019 à St-Laurent de la Prée (Données météo : Station météo INRAE de St-Laurent de la prée; Stades phénologiques : Bulletins de Santé du Végétal 2019).

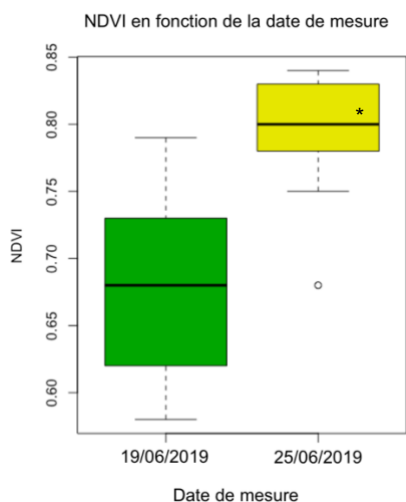


Figure 34 : Indice NDVI en fonction de la date de mesure.

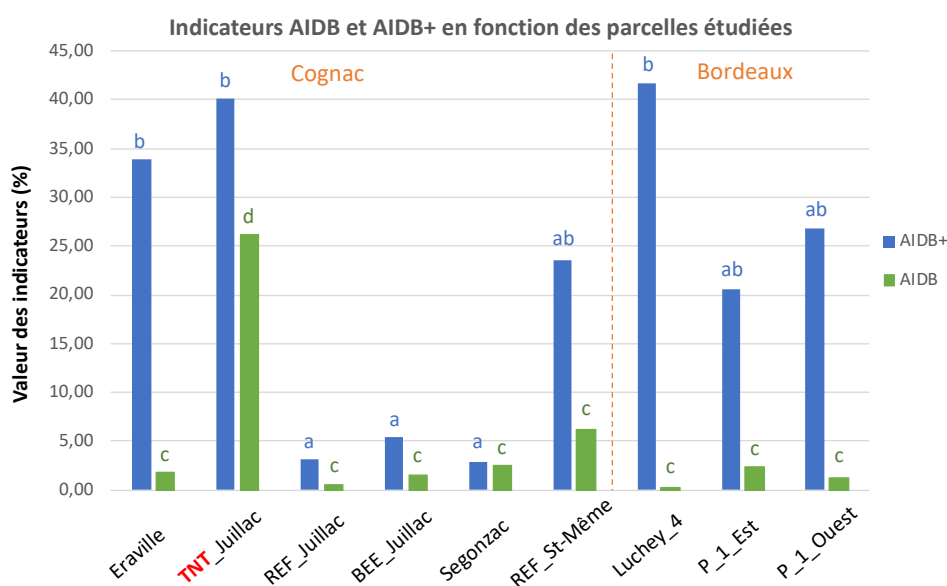


Figure 35 : Indicateurs AIDB et AIDB+ en fonction des parcelles. Test de comparaison de moyennes de Tukey réalisé par indicateur au seuil des 5%.

On observe à Cognac que les indices de dépérissement ne sont pas aussi bien corrélés aux mesures NDVI qu'à Bordeaux (ANNEXE V). En effet, on n'observe pas de corrélation significative entre les indices de dépérissement (%AM et %CP-AM) et les mesures de l'indice NDVI global (passage 1) et l'indice NDVI des ceps normaux (passage 3). On observe tout de même une tendance à la baisse de l'indice NDVI global (passage 1) lorsque que le taux d'AM ou de CP-AM augmente. De plus, le pourcentage CP-AM est corrélé positivement avec le NDVI passage 3– passage 1. Cette corrélation est significative au niveau de signification $\alpha = 0,1$ avec une p-value de 0.068.

L'absence ou la faible significativité des relations entre la vigueur et les indices de dépérissement, peut être due à plusieurs phénomènes. Tout d'abord, certaines parcelles sont plus vigoureuses : **Juillac et Saint-Même sont des parcelles historiquement plus vigoureuses** que les autres parcelles (Saint-Fort, Segonzac et Eraville qui est en agriculture biologique avec une fertilisation moins riche). Justement, **ces es parcelles de Juillac et Saint-Même ont été mesurées 6 jours après les autres parcelles**. Ce décalage de 6 jours dans la mesure a eu lieu lors d'une période où la vigne connaît un fort développement végétatif. L'accumulation de degrés-jours "DJ" a été calculée en base 0 °C à partir du 1^{er} mars (figure 33, station météo INRAE de St-Laurent de la prée). Les mesures du 19/06/2019 correspondent à 1234 degrés jours en début de floraison, alors que celles réalisées le 25/06/2019 correspondent à 1379 degrés jours en fin floraison. **La différence entre les deux dates de mesures, de 145 degrés jours, vient donc amplifier la différence de vigueur initiale entre les parcelles**. Par conséquent, on observe une différence significative (p-value = 0,00057) entre le NDVI moyen des parcelles de Juillac et Saint-Même (0,80) et le NDVI moyen des autres parcelles (0,68) (figure 34).

2. Les indices AIDB et AIDB+ en 2019

Sur l'ensemble des parcelles de l'étude, l'AIDB oscille entre 0.2 et 26,2% et l'AIDB+ oscille entre 3,9 et 41,2%. La figure 35 montre que les données d'AIDB et d'AIDB+ sont très variables en fonction des parcelles considérées.

La différence entre AIDB et AIDB+ montre la part jouée par les maladies du bois, les ceps manquants, morts et les jeunes complants. En effet, la formule de l'AIDB est centrée sur les maladies annuelles, mildiou, oïdium, tordeuse, Botrytis, alors que l'indice AIDB+ inclut en plus ces maladies de dépérissement et leurs conséquences (ceps manquants, morts et les jeunes complants). L'année 2019 a été une année avec une faible pression des maladies annuelles pour ces parcelles le plus souvent traitées. Toutes les parcelles ayant reçu une protection présentent un AIDB inférieur à 7%. En revanche, une seule parcelle témoin (TNT-Juillac) sans traitement présente un AIDB très fort de plus de 25%.

Pour l'AIDB+, on observe une très grande hétérogénéité entre les parcelles, avec des parcelles à AIDB+ supérieurs à 20% (Eraville, TNT_Juillac, REF_St-Même, Luchey_4, P_1_Est,

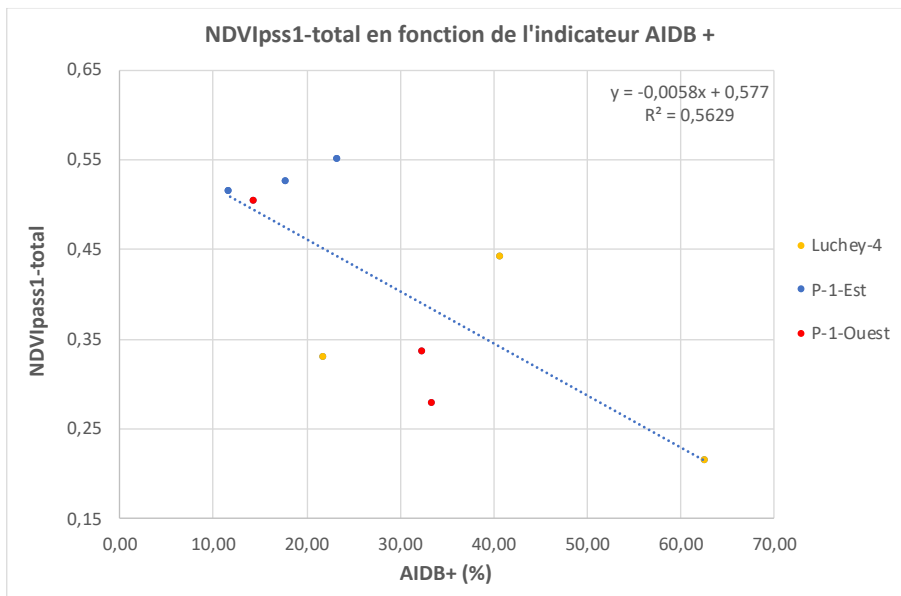


Figure 36 : Indicateur NDVI total de la placette en fonction de l'indicateur ADIB+.

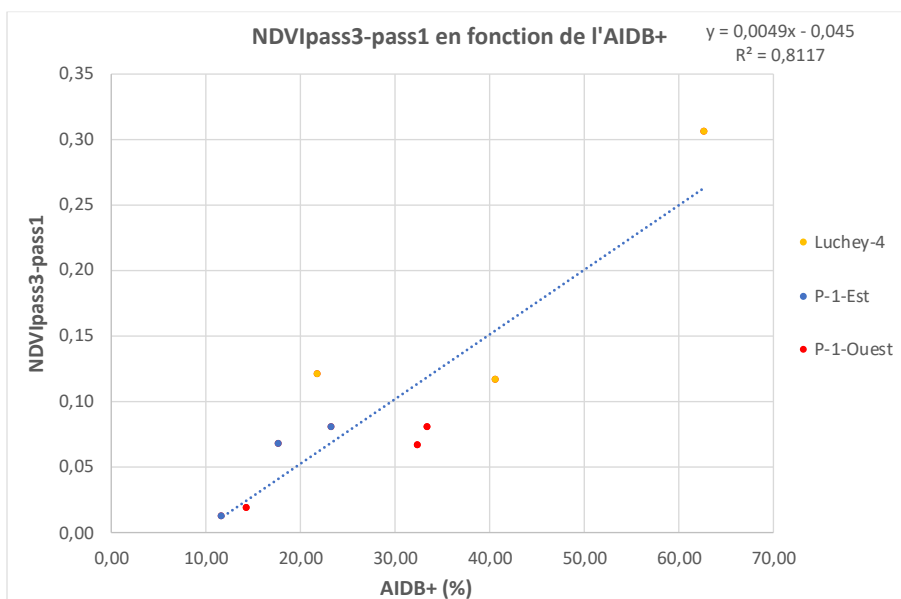


Figure 37 : Indicateur AIDB+ en fonction de la perte de vigueur liée au dépérissement.

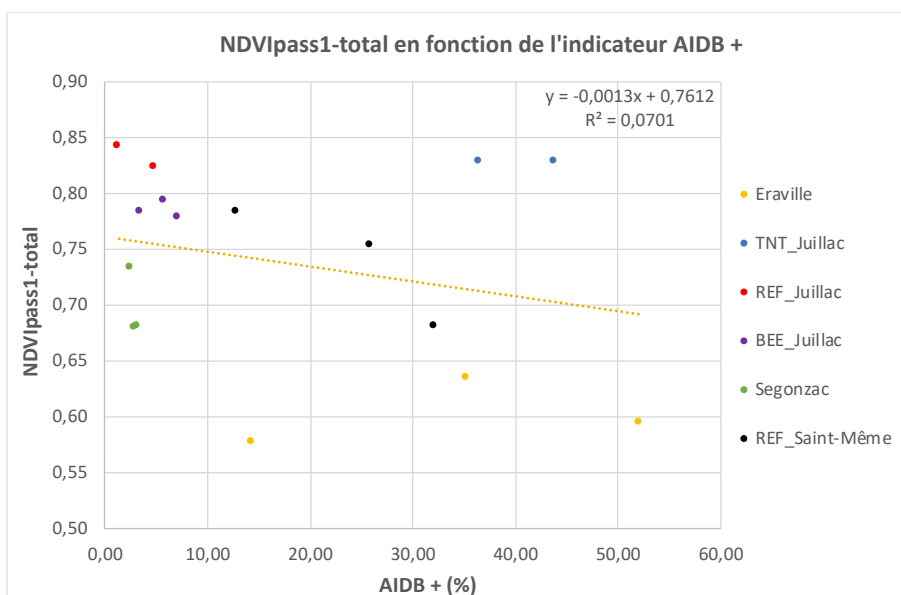


Figure 38 : Indice NDVI total de la placette en fonction de l'indicateur ADIB+.

P_1_Ouest). A l'opposé, 3 parcelles sont sous les 6% (REF-Juillac, BEE-Juillac, Segonzac). Pour la parcelle Juillac, on remarque une variabilité intra-parcellaire, cette variabilité d'AIDB+ est en grande partie expliquée par les maladies annuelles développées dans la parcelle témoin (AIDB de 26%) et qui entrent dans le calcul de l'AIDB+.

Nous pouvons également noter que la présence du Black Rot est absente à Bordeaux et relativement faible dans les parcelles traitées de Cognac. Par conséquent, nous pouvons admettre que l'indicateur AIDB+ en 2019 est principalement influencé par les maladies de dépérissement (BDA-Esca en majorité).

3. Relations entre les indices de vigueur NDVI et la pression multi-pathogène AIDB +

3.1. Bordeaux

La figure 36 montre clairement que l'indicateur multi-pathogène AIDB+ est corrélé négativement et significativement (p -value = 0,0187) avec l'indice NDVI total (passage 1). À Bordeaux, une augmentation de 10% de l'AIDB+ provoque une baisse de 0,06 de l'indice NDVI total. Cela traduit que les maladies du bois, les ceps manquants et/ou morts, qui fondent principalement l'AIDB+, sont aussi à l'origine d'une baisse générale de la densité foliaire et de la surface chlorophyllienne sur l'ensemble de la placette.

Nous mettons aussi en évidence dans la figure 37 la très forte corrélation positive (p -value = 0.0007) entre la pression multi-pathogène, AIDB+, et un indicateur de dépérissement qui est la perte de vigueur due aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs (NDVI_{pass3-pass1}). Par conséquent, une augmentation de l'AIDB+ est associée à une augmentation de la perte de vigueur liée au dépérissement car, dans les deux indices, sont considérés les ceps particuliers indicateurs de dépérissement (manquants, morts, complants et symptomatiques MdBs).

3.2. Cognac

Pour les parcelles de Cognac, on n'observe pas de corrélation significative entre l'indice NDVI total et l'indicateur AIDB + (figure 38). Il est important de rappeler que, pour éviter des valeurs à saturation, l'indice NDVI a été mesuré à la floraison à Cognac, contrairement aux parcelles de Bordeaux où l'indice NDVI a été mesuré à la véraison/récolte. Il est également important de noter qu'en raison d'intempérie lors de la récolte, l'AIDB+ a pu être calculé seulement pour les deux premières placettes des parcelles TNT_Juillac et REF_Juillac.

Avec l'indice NDVI mesuré à la floraison, la figure 39 montre une corrélation positive significative (p -value = 0.0217) entre l'indicateur multi-pathogènes AIDB+ et la perte de vigueur aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs. Les vignes de Cognac étant très vigoureuses, on remarque que 9 placettes sur 16 ne présentent pas de perte de vigueur liée au dépérissement.

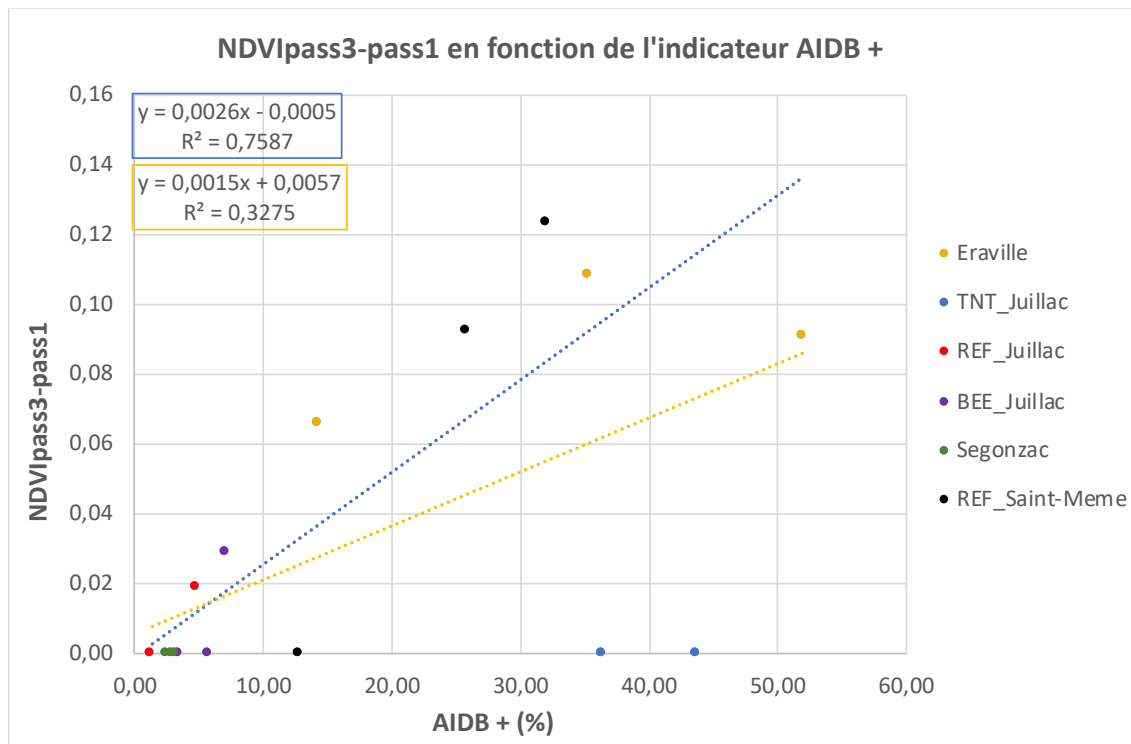


Figure 39 : Indicateur AIDB+ en fonction de la perte de vigueur liée au dépérissement. La droite de corrélation jaune prend en compte tous les points de Cognac, alors que la droite de corrélation bleue présente la corrélation sans les points de TNT_Juillac.

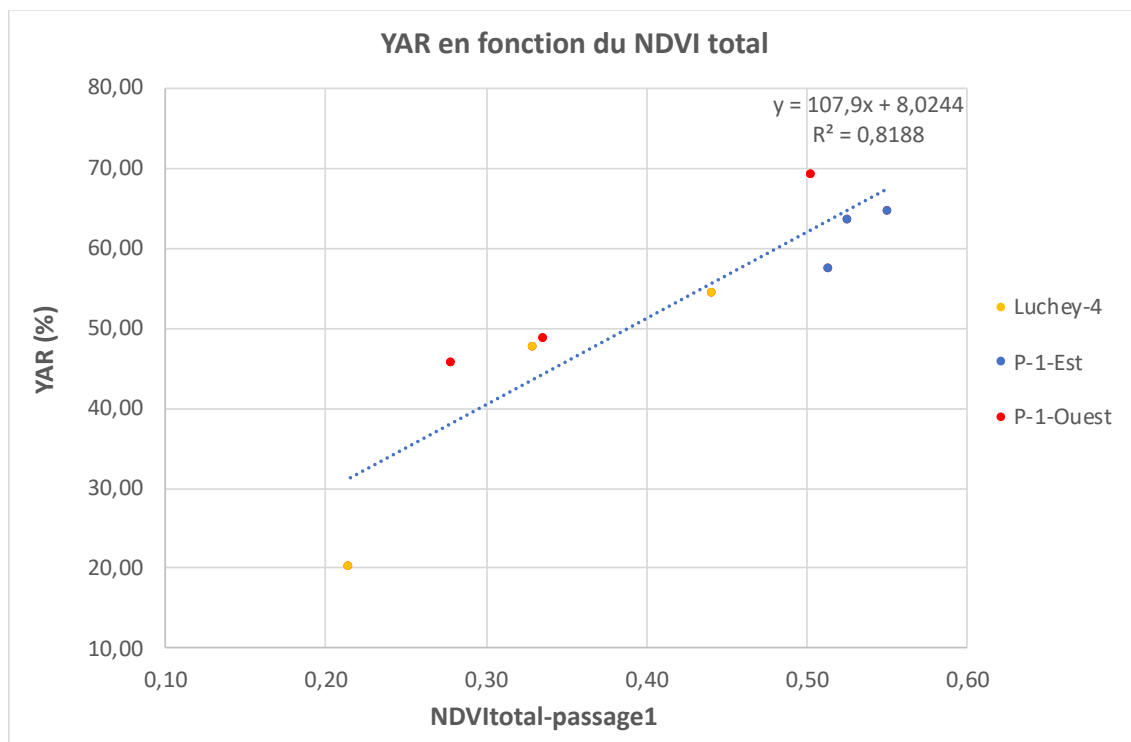


Figure 40 : Taux de réalisation du rendement en fonction de l'indice NDVI total de la placette.

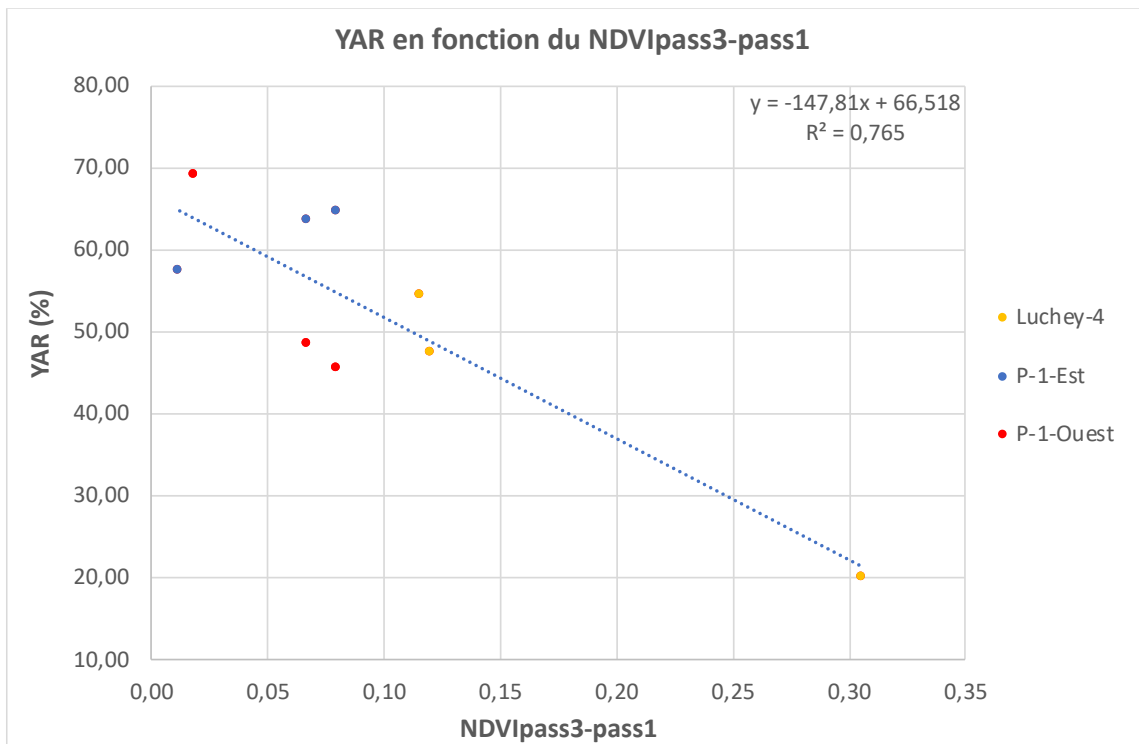


Figure 41 : Taux de réalisation du rendement en fonction de la perte de vigueur aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs.

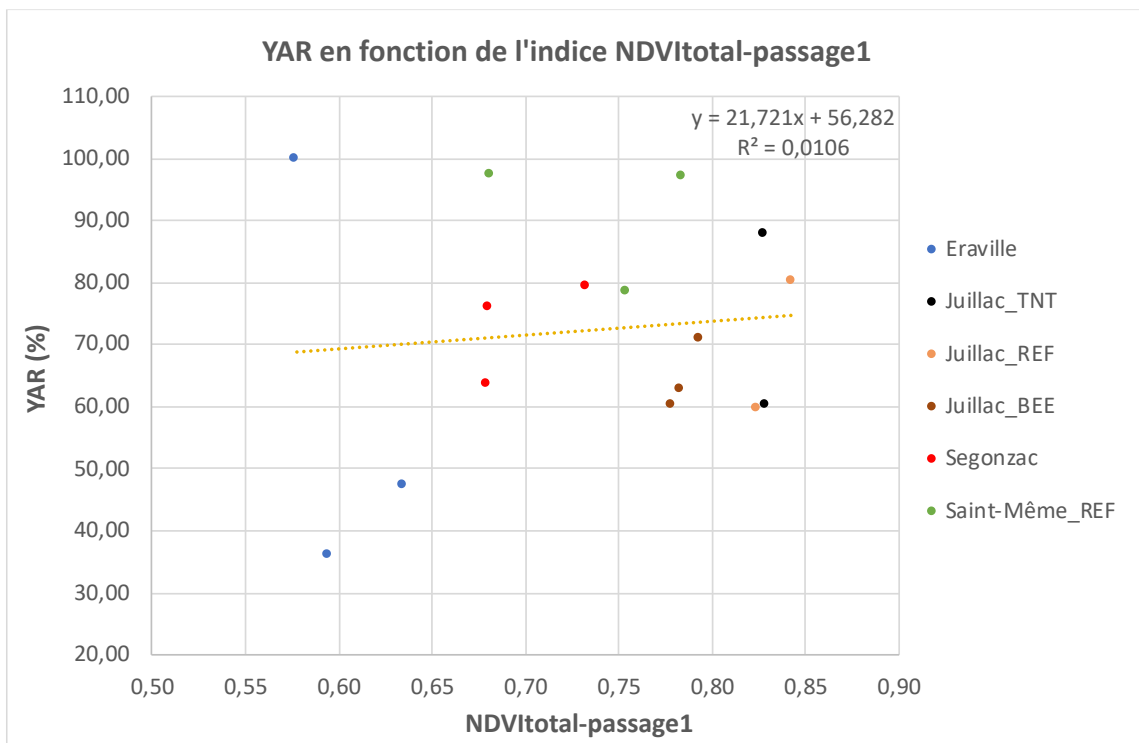


Figure 42 : Taux de réalisation du rendement en fonction de l'indice NDVI total de la placette.

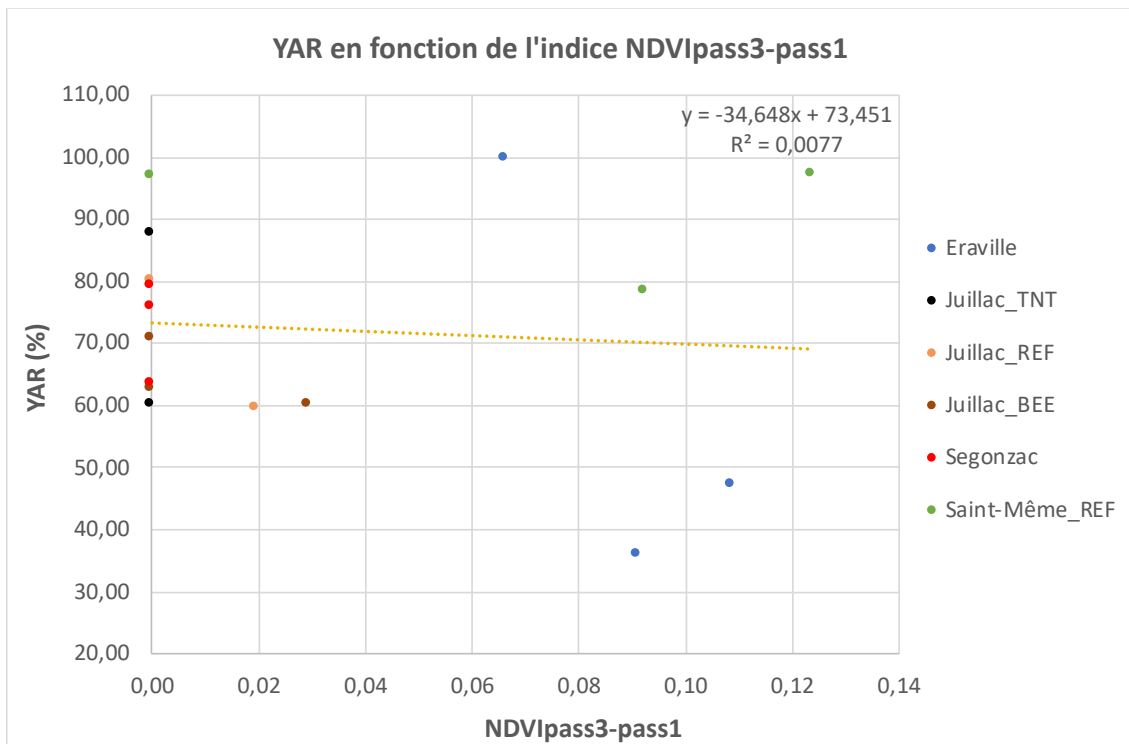


Figure 43 : Taux de réalisation du rendement en fonction de la perte de vigueur liée au dépérissement.

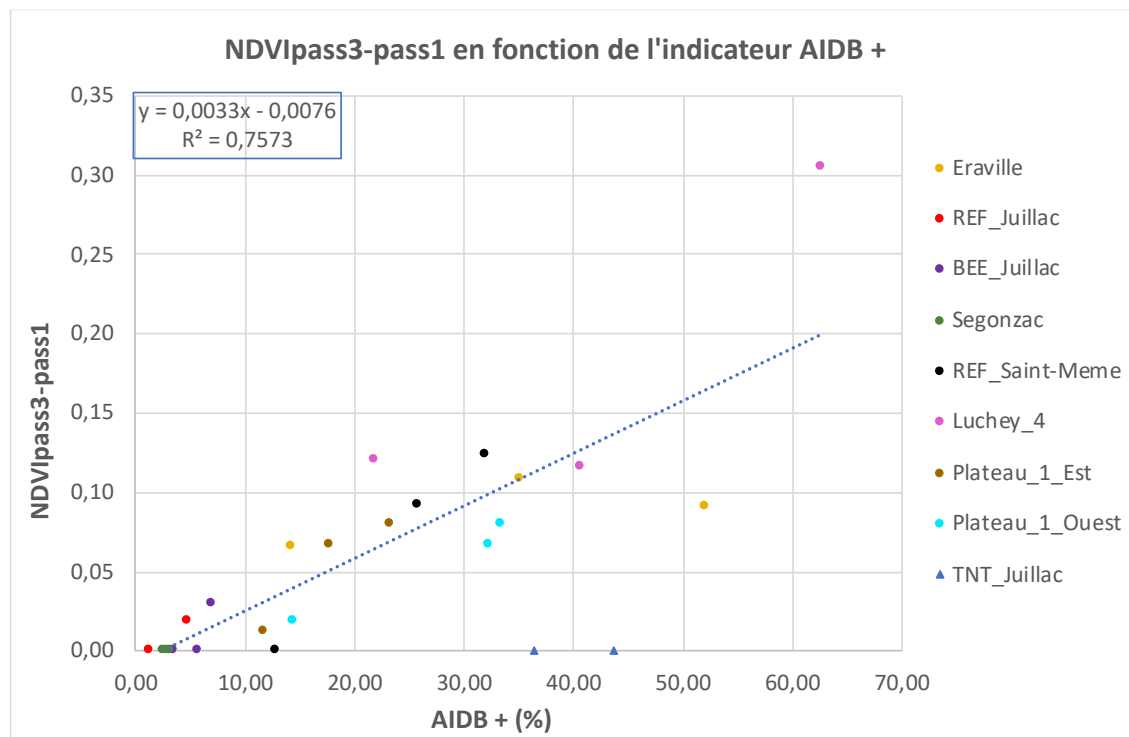


Figure 44 : Taux de réalisation du rendement en fonction de la perte de vigueur liée au dépérissement. Les points de la parcelle TNT_Juillac (triangles bleus) n'ont pas été intégrés à la droite de corrélation.

De plus, comme évoqué précédemment, on a pu remarquer que la parcelle témoin de Juillac (TNT_Juillac) présente un AIDB+ élevé lié à une forte pression des maladies annuelles. Afin de mieux observer l'effet des MdBs, une nouvelle droite de corrélation a été tracée, sans intégrer les 2 placettes de cette parcelle. Cette seconde droite de régression nous présente une corrélation très significative ($p\text{-value} = 5.7e-05$) entre l'indicateur multi-pathogène AIDB+ et la perte de vigueur lié aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs. Une augmentation de l'indicateur multi-pathogène AIDB+ de 10%, provoque une perte de vigueur lié aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs de 0,026 point.

4. Relations entre la réalisation du rendement YAR et les indices de vigueur NDVI

4.1. Bordeaux

On constate une corrélation positive et très significative ($p\text{-value} = 0.0006$) entre l'indice NDVI total de la placette et le taux de réalisation du rendement YAR% (figure 40). Ainsi, plus une placette présente une vigueur végétative importante, plus elle est en capacité d'atteindre son rendement théorique. Pour les placettes de Bordeaux, une augmentation de 0,1 de l'indice NDVI total provoque une augmentation du YAR de 10,8 %.

Il existe également une corrélation négative et très significative ($p\text{-value} = 0.0022$) entre le taux de réalisation du rendement YAR% et la perte de vigueur aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs (figure 41). A chaque perte de 0,1 de NDVI liée au dépérissement, le YAR chute de près de 15 %. Enfin, cette relation est beaucoup due à un point, bien que tous les autres points soutiennent la même tendance. Il aurait donc été intéressant d'avoir des données à Bordeaux de NDVI_{pass3-pass1} entre 0,15 et 0,30 pour améliorer la robustesse de cette analyse. Contrairement à Bordeaux, les figures 42 et 43 présentent l'absence de relation entre le taux de réalisation du rendement (YAR%) et les différents indices NDVI (NDVI_{passage1} et NDVI_{passage1-passage3}). La placette numéro 1 d'Eraville présente un YAR corrigé de 100%, mais ce YAR était en réalité de 120 %.

4.2. Cognac

Les mesures de la perte de vigueur liée aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs étant calculées via une différence entre le NDVI total et le NDVI des ceps normaux, nous avons pu réaliser une corrélation avec l'ensemble des parcelles du Sud-Ouest (figure 44). Cette figure met en évidence une corrélation positive très significative ($p\text{-value} = 5,6*10^{-5}$) entre l'indicateur AIDB+ et la perte de vigueur liée aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs (NDVI_{pass3-pass1}).

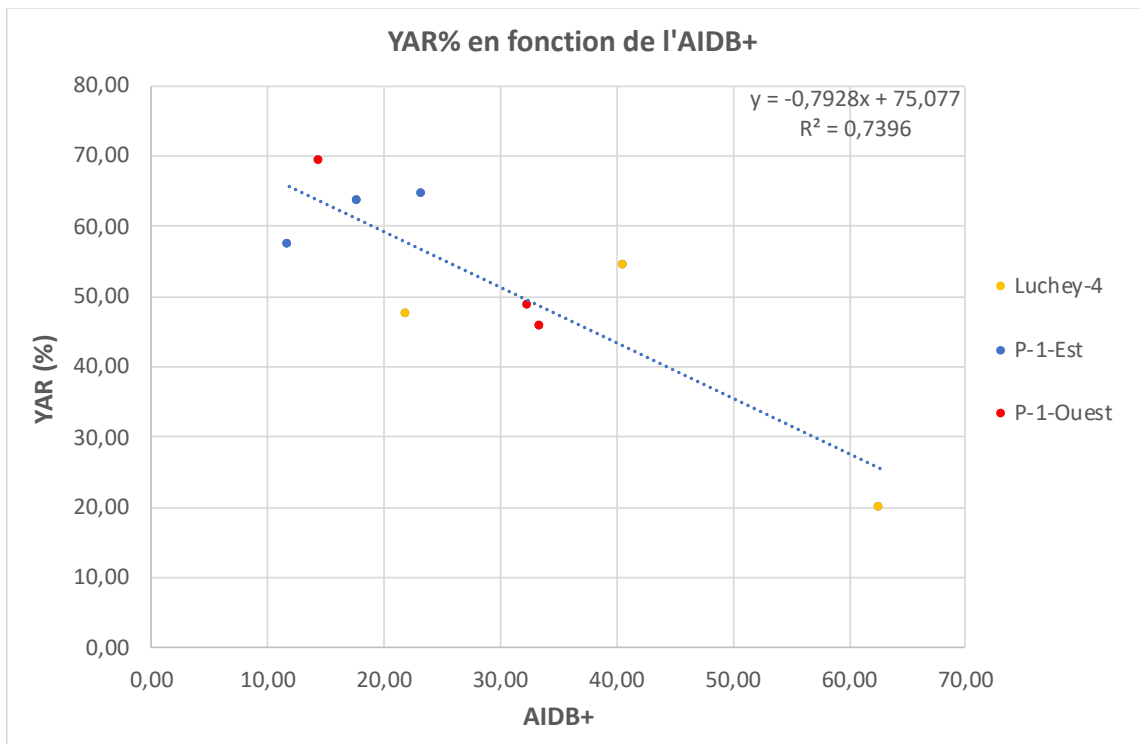


Figure 45 : Taux de réalisation du rendement des parcelles de Bordeaux en fonction de l'AIDB+.

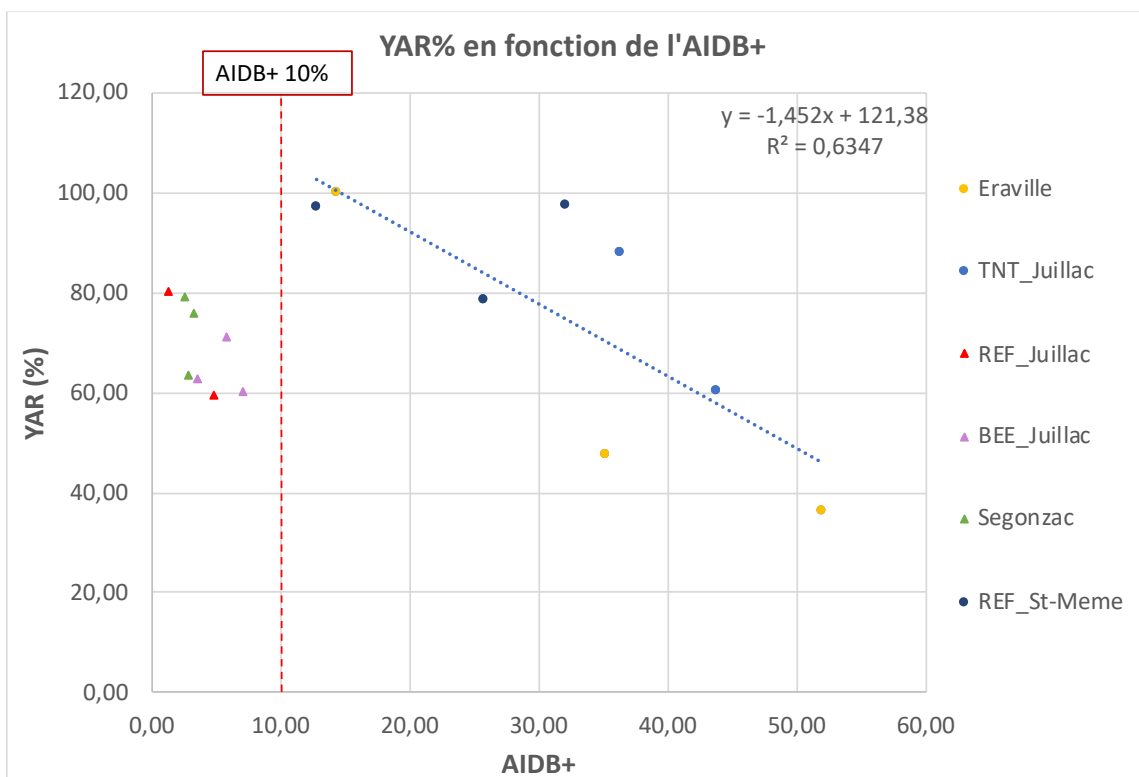


Figure 46 : Taux de réalisation du rendement des parcelles de Cognac en fonction de l'AIDB+.

5. Relations entre la réalisation du rendement YAR et la pression multi-pathogène AIDB+

5.1. Bordeaux

La figure 45 montre la corrélation négative et significative entre le taux de réalisation du rendement (YAR) et l'indice AIDB+ (P-value = 0,003). Pour les parcelles de Bordeaux, on observe qu'une augmentation de 10% de l'AIDB+ entraîne une baisse de 8,8 % du taux de réalisation du rendement. Cependant, on peut observer que la droite de corrélation ne coupe pas l'axe des ordonnées à 100% de YAR, mais plutôt à 75 %. Cela implique qu'à Bordeaux, même avec un AIDB+ de 0% soit sans aucune attaque de pathogène ou ravageur, le rendement théorique de 100 % n'est pas atteint.

5.2. Cognac

De façon similaire, la figure 46 confirme, à Cognac, la corrélation négative et significative entre l'AIDB+ et le YAR. Un passage d'un indicateur AIDB+ de 28,5 à 42,2%, correspond à une chute de 20% du taux de réalisation du rendement YAR.

Cette corrélation a été réalisée avec les points présentant un AIDB+ supérieur à 10%. En effet, le seuil de l'AIDB étant de 10% (Fermaud *et al*, 2015), l'hypothèse que le seuil de significativité de l'AIDB+ soit également de 10% a été posée. Cette hypothèse a été posée car il a été remarqué les années précédentes, une très grande variabilité des résultats de l'AIDB+ en dessous de 10% (Léo Vionnet, 2019). Cependant, pour les résultats de l'année 2019, le seuil de 10% d'AIDB+ semble aussi permettre de différencier le nuage de points en deux grands groupes très différents. Ainsi, les valeurs d'AIDB+ en dessous du seuil de significativité ne présentent pas une très grande variabilité, mais aussi le YAR maximum de ces points est de 80%.

6. Relations multiples entre l'ensemble des variables de la base de données

Avec les deux premiers axes seulement, l'analyse en composantes principales (ACP) permet d'expliquer à hauteur de 69,38 % les relations au sein du jeu de données (figure 47).

L'axe 1 représente les composantes de **vigueurs**. Cette vigueur englobe la vigueur végétative (« NDVI_normaux », « NDVI_vivants », « NDVI_total ») et la vigueur reproductive (« Nb_grappes », « Pds_grappes », « Nb_inflo »). Sachant qu'une des variables clefs les plus à droite de l'axe des abscisses correspond au « RDT_réel », nous pouvons associer à la partie droite de ce plan d'ACP de fort rendements des vignes vigoureuses.

L'axe 2 représente **l'axe du dépérissement** avec, en haut, les variables révélatrices du dépérissement (« Tx_AM », « Perte_RDT » et dans une moindre mesure « Tx_esca » et « AIDB_plus »). Le bas de ce second axe représente les variables révélatrices d'une absence de dépérissement (« Tx_normaux », « YAR »). De manière attendue donc, le taux de réalisation du

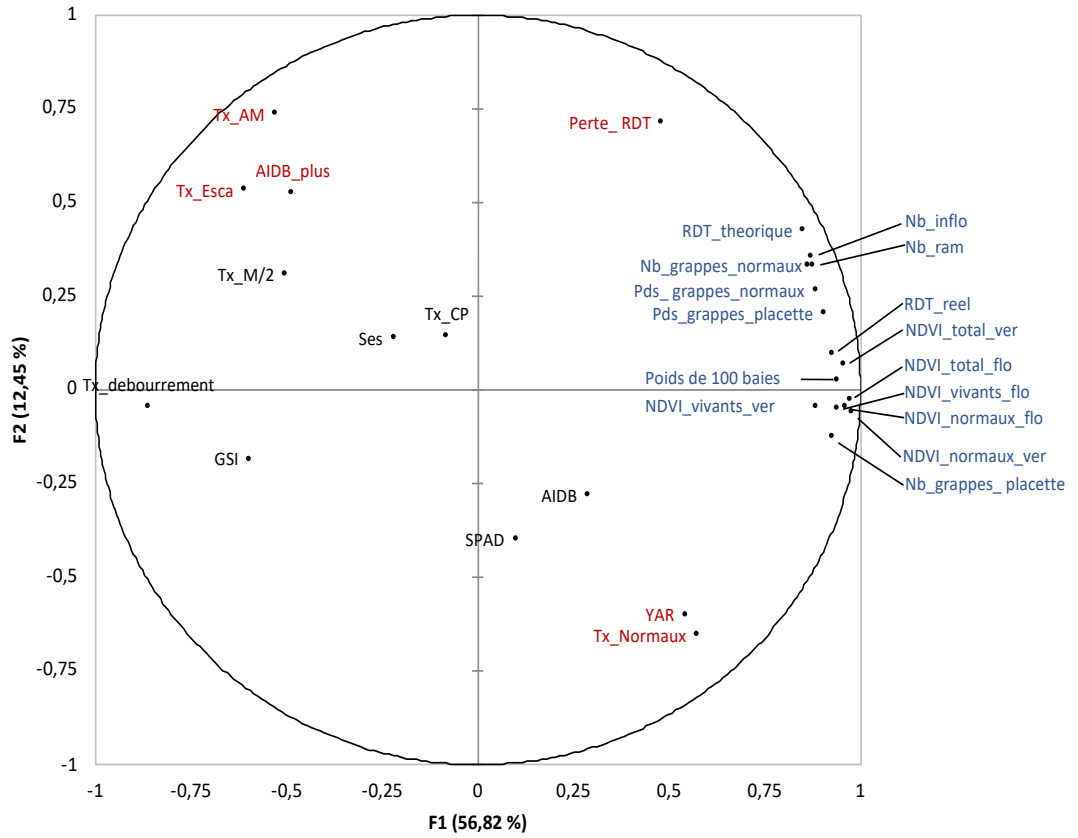


Figure 47 : ACP TraDeVi, représentation des axes 1 et 2.

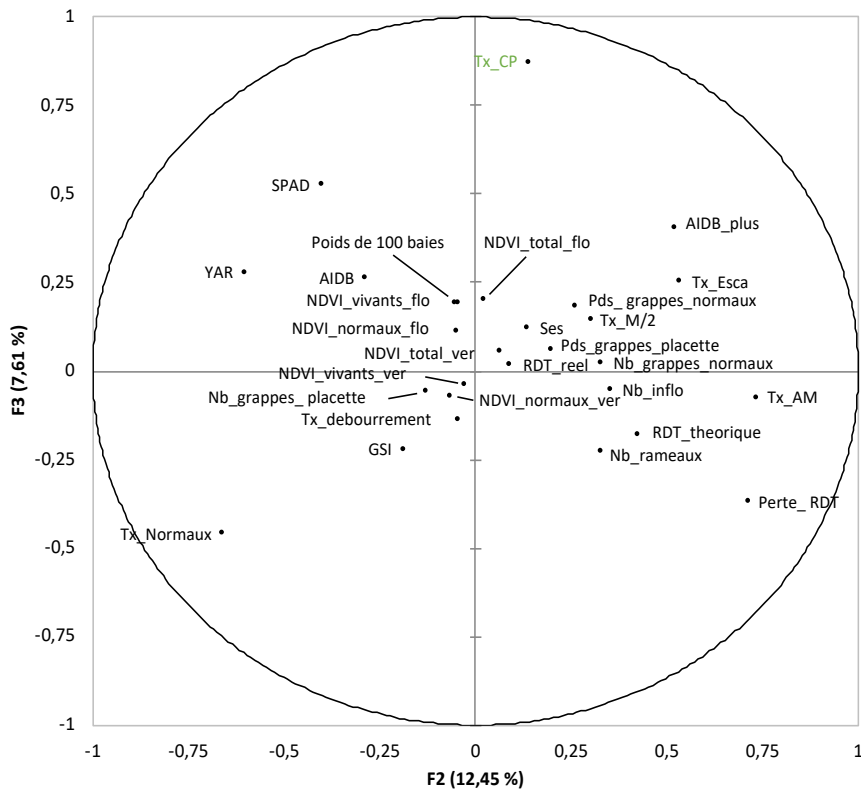


Figure 48 : ACP TraDeVi, représentation des axes 2 et 3.

rendement s'oppose aux indices de dépérissement et aux dégâts des maladies et ravageurs sur les grappes (AIDB+). De façon très importante, par construction de l'ACP, l'axe de dépérissement est orthogonal avec l'axe des vigueurs. Cela implique que les variables de dépérissement sont indépendantes globalement des variables de vigueurs. On remarque également que l'AIDB se présente en opposition avec l'AIDB+ et les indicateurs de dépérissement (Tx_AM et Tx-Esca). Cette opposition entre AIDB et AIDB+ est notamment due au fait que l'AIDB est très important au sein de la parcelle TNT_Juillac. En effet, c'est une parcelle de Cognac qui est très vigoureuse et productive. Par conséquent l'AIDB au sein de cette ACP est fortement influencé par cette parcelle.

L'axe 3 (Figure 48), qui permet d'expliquer 7,61 % de la variabilité générale du dispositif, démontre l'effet des ceps complantés (CP).

La figure 49 aide à visualiser l'effet région. Les placettes de Cognac se disposent à droite sur l'axe 1 des vigueurs alors que les placettes de Bordeaux se disposent à gauche de cet axe. Ainsi, les parcelles de Cognac sont plus vigoureuses que celles de Bordeaux. De plus, les placettes des différentes régions se répartissent de façon homogène sur l'axe « dépérissement ». On en conclut que la vigueur végétative et reproductive sont plus importantes à Cognac qu'à Bordeaux, mais que le phénomène de dépérissement n'est pas plus marqué dans une région ou l'autre.

DISCUSSION

1. Relations entre indices de vigueur et indices de dépérissement

Mise en relation de l'indice de vigueur NDVI_{pass1} total avec les indices de dépérissement (AM et AM-CP), montre que ces variables sont corrélées pour les parcelles de Bordeaux, mais non corrélées pour les parcelles de Cognac. Une corrélation entre l'indice NDVI total de la placette et le taux de ceps absents-morts (AM), voire avec les complants (CP-AM) n'est pas étonnant, car ces ceps ne produisent pas ou peu de végétation.

L'indice NDVI_{pass3} ne mesurant que les ceps normaux et les indices de dépérissements sont peu (Bordeaux) ou pas (Cognac) corrélées. Théoriquement, nous pouvions nous attendre à observer une augmentation de la vigueur des ceps normaux en fonction des indicateurs de dépérissement (AM et AM-CP). En effet, lorsqu'un cep est à proximité d'un cep mort ou absent, les racines de celui-ci ont plus d'espace pour se développer et donc le cep pourrait présenter, une vigueur plus importante que la normale (Kemp *et al.*, 2013). Cependant, on observe une tendance à la baisse de vigueur des ceps normaux. Cela peut être dû au fait que les placettes d'études, avec un fort taux de ceps absents, morts et complants, sont situées et ont été choisies sur des zones dans un contexte avéré de dépérissement qui s'avère donc favorable à la baisse de vigueur de l'ensemble des ceps de la parcelle (sol, fertilisation, climat...) (Corti *et al.*, 2004).

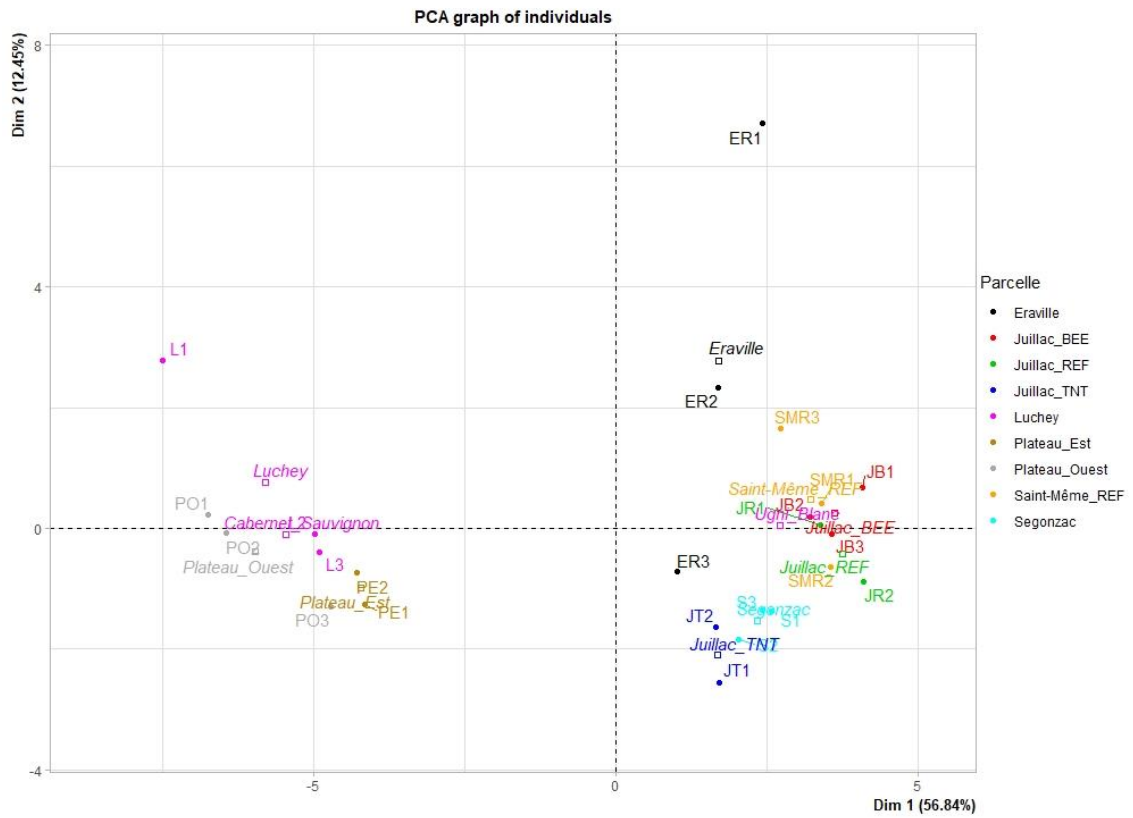


Figure 49 : Distribution des parcelles et des placettes selon les axes 1 et 2.

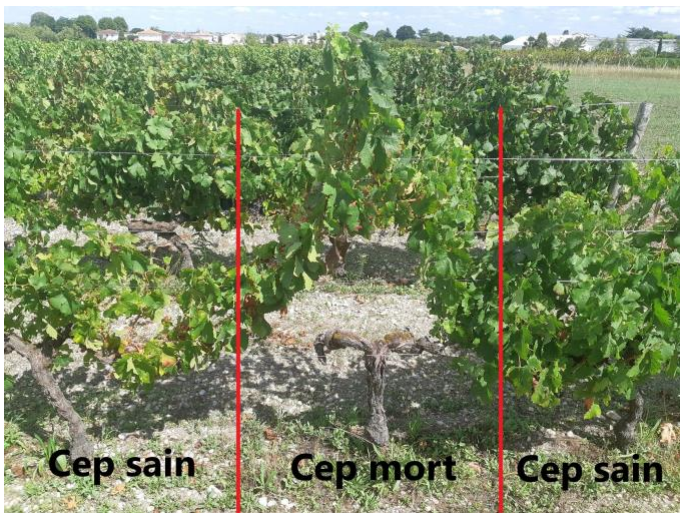


Figure 50 : Représentation de la juxtaposition des ceps.

Les relations entre le différentiel de vigueur entre les ceps normaux et l'ensemble des ceps, et les indices de dépérissement (AM et AM-CP) sont bien corrélées. Cependant, cette corrélation est moins significative à Cognac qu'à Bordeaux. Ces résultats peuvent venir du fait que cet indice de dépérissement est indépendant de la vigueur générale de la parcelle, car il s'agit d'une différence.

2. La complexité des mesures NDVI à l'échelle du cep

On sait que le NDVI mesuré sur un cep correspond en réalité à la juxtaposition de 3 ceps (figure 50), ainsi, les mesures sont plutôt à rapporter à « l'emplacement ». Or, on sait également que les vignes de Cognac sont très vigoureuses et la juxtaposition des ceps entraîne une baisse des écarts de NDVI entre les classes (A, M, CP, Esca...). De plus, à Cognac ce phénomène est démultiplier car, lorsqu'un cep absent est détecté, le viticulteur taille les ceps voisins de façon à ce qu'ils combler l'espace laissé. Cette technique a pour conséquence d'augmenter l'indice NDVI des emplacements « Absent » (communication personnelle, Xavier BURGUN, juillet 2020).

3. La complexité de l'indicateur "Complant"

Les corrélations sont moins significatives avec les indicateurs incorporant les complants. En effet, l'indicateur CP est soumis à une grande variabilité d'interprétation. Un cep peut être considéré comme CP de 1 à 8 ans après son implantation, à partir du moment où il est non ou simplement moins productif qu'un cep normal. Cependant entre 1 et 8 ans, la vigueur et la production d'un cep complant peut varier de façon nette. De plus, les campagnes de complantation sont généralement réalisées sur une parcelle une année donnée, et non tous les ans en fonction des ceps morts et absents. Cela a notamment pour conséquence d'apporter une hétérogénéité de vigueur des cep CP entre les parcelles d'étude.

4. Relations entre les indices de vigueur NDVI et la pression multi-pathogène AIDB+

Schnee *et al.* 2011 et Valdes, 2007 ont montré que les vignes les plus vigoureuses sont celles avec un plus haut niveau de maladies notamment pour l'oïdium et le mildiou. Or, nous observons en 2019, une corrélation négative entre la vigueur (NDV_{pass1} total) et l'indicateur multi-pathogène AIDB+ qui indique que plus l'indicateur AIDB+ est élevé, moins la placette est vigoureuse. Cependant, l'année 2019 a été une année qui a permis d'isoler le phénomène de dépérissement. En effet, étant donné que les maladies annuelles (oïdium, mildiou...) et donc l'AIDB ont été très faibles, on peut considérer l'AIDB+ de l'année 2019 comme une référence en terme de dépérissement et de MdBs.

La corrélation négative à Bordeaux entre la perte de vigueur due aux ceps manquants/morts, CPs et symptomatiques MdBs (NDV_{pass3-pass1}) et l'AIDB+ (figure 43) met en évidence que le

dépérissement a un impact non-négligeable sur la vigueur générale du vignoble. On remarque que même avec le phénomène de compensation des ceps normaux (Munkvold *et al*, 1994), le vignoble n'est pas capable de compenser cette perte de vigueur.

Dans le vignoble de Cognac, cette relation est moins évidente. Les mesures de NDVI à Cognac ont été réalisées à la floraison, or les symptômes du BDA-Esca apparaissent principalement en août et peuvent être donc seulement intégrés lors des mesures à la véraison et/ou à la récolte.

5. Le calcul du Yield Achievement Rate (YAR)

Dans cette étude, nous utilisons le taux de réalisation du rendement "YAR" comme indicateur de rendement. Le YAR est un indice relatif qui permet de lisser la variabilité entre les parcelles, afin de pouvoir travailler avec des parcelles ayant des potentiels de rendement très différents, ce qui est la normale en viticulture (même au sein d'une appellation donnée). Cependant, le taux de réalisation du rendement YAR est une variable difficile à mesurer car elle implique le dire du viticulteur. Compte tenu du contexte lié au Covid-19 et à la difficulté d'obtenir des informations auprès des viticulteurs, cette variable a été calculée pour l'année 2019. Ce calcul permet de nous approcher du rendement théorique, mais, il reste toujours relativement imprécis et discutable.

6. Relations entre la réalisation du rendement YAR et les indices de vigueur NDVI

Nous avons utilisé le taux de réalisation du rendement YAR comme indicateur de rendement. Le YAR est un indice relatif qui permet de lisser la variabilité entre les parcelles afin de pouvoir travailler avec des parcelles ayant des potentiels de rendement différents. Cependant, le taux de réalisation du rendement YAR est une variable difficile à mesurer car elle implique le dire du viticulteur. Compte tenu du contexte lié à la Covid-19 et à la difficulté d'obtenir des informations auprès des viticulteurs, cette variable a été calculée pour l'année 2019. Ce calcul permet de nous approcher du rendement théorique, mais, il reste toujours imprécis.

Contrairement à la vigne sauvage, la vigne cultivée, voit son rendement positivement corrélé avec sa vigueur (Serranon *et al.*, 2012). Ainsi, plus la vigne est vigoureuse en lien à son système végétatif, plus elle a aussi les capacités d'alimenter les baies et les grappes, et donc de produire plus (Filippetti *et al.*, 2013). Les résultats de Bordeaux vont bien dans ce sens en mettant en avant une bonne corrélation entre le taux de réalisation du rendement YAR et l'indice NDVIpass1 total. De plus, à Bordeaux la corrélation négative entre le taux de réalisation du rendement YAR et la perte de vigueur liée aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs (NDVIpass3-1), permet de confirmer qu'une baisse de vigueur peut être à l'origine d'une baisse de rendement.

À Cognac, l'absence de corrélation entre le taux de réalisation du rendement et les indices de vigueur n'est pas clairement expliquée. Ce phénomène peut être dû la forte vigueur des vignes de Cognac qui amène plus vite à la des valeurs NDVI saturante pour l'appareil GreenSeeker dès la floraison. Cette absence de corrélation peut également avoir pour origine un mode de taille spécifique qui vise à combler les trous de végétation liés aux ceps morts et absents. Ces

phénomène entraînent (1) une surproduction des ceps à proximité d'un emplacement AM et (2) l'impossibilité de capter la perte de vigueur liés aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs (NDVI_{pass3-pass1}).

En raison des difficultés du différentiel de vigueur entre les ceps normaux et l'ensemble des ceps (NDVI_{pass3-pass1}) à capter le phénomène de dépérissement des parcelles très vigoureuses, cet indicateur pourrait être intéressant seulement dans les vignobles de vigueur plus faible, comme à Bordeaux par exemple dans notre étude.

7. Relations entre la réalisation du rendement YAR et la pression multi-pathogène AIDB+

Comme déjà mentionné, l'année 2019 a été une année exceptionnelle par la quasi-absence de maladies annuelles. Ainsi, on peut considérer les pertes de rendement en 2019 comme liées principalement aux MdBs. Dans les deux réseaux de parcelles, l'AIDB+ est corrélé négativement avec le taux de réalisation du rendement (figures 51 et 52). Ainsi, plus une placette est atteinte par les MdBs, plus elle voit son taux de réalisation du rendement baisser. Cependant, les graphiques obtenus nous posent quelques questions.

À Bordeaux, la droite de corrélation coupe l'axe des ordonnées à 75%. C'est-à-dire qu'avec un AIDB+ de 0% le taux de réalisation du rendement ne pourrait pas dépasser 75%. Il peut y avoir plusieurs origines (1) le rendement théorique a été sur-évalué par un mauvais mode de calcul (2) le rendement théorique a été sur-évalué par une surévaluation du nombre théorique de grappes par rameau fructifère. En effet, le nombre théorique de grappes par rameau fructifère a été fixé à 2. Cependant, cette valeur varie entre 2 et 1,5 en fonction des cépages, des conditions de culture, des sources et des collections ampélographiques (3) par l'absence d'une parcelle témoin exempte de MdBs. Initialement, au début du projet TraDéVi, la parcelle « Plateau_1_Est » était une parcelle dite "témoin" avec peu de MdBs. Cependant, après 4 années d'études, cette parcelle s'est avérée touchée par les MdBs et ne fait plus office de parcelle témoin.

À Cognac, le problème est inverse, la droite de corrélation coupe l'axe des ordonnées en 120%. Cela implique un taux de réalisation du rendement de 120% lorsque l'AIDB+ est nul. Ce résultat peut être dû à une erreur dans le choix du seuil (10%) qui exclut des poids à faible YAR.

Ces résultats posent des questions de robustesse du nuage de points ainsi que validité du calcul du rendement théorique. Par conséquent, on conclut que l'indicateur AIDB+ peut être un bon indicateur de dépérissement, mais qu'il nécessite encore des investigations afin d'améliorer le calcul du YAR et ainsi confirmer sa fiabilité. Les résultats de l'année 2020 pourront notamment apporter des réponses à ce sujet.

PERSPECTIVES

1. Mise en place de 3 nouveaux indicateurs de la nuisibilité des maladies du bois

Dans un but de cohérence et de facilité de compréhension, les indicateurs AIDB et AIDB+, pourraient être modifiés en 3 nouveaux indicateurs multi-pathogènes. Les formules détaillées de ces indicateurs sont présentées en ANNEXE VI.

- Assessment Indicator of **D**amage from grapevine **D**ieback diseases (AIDD)

Cet indicateur présente la perte de poids de grappe entre 0 et 100% suite aux attaques des maladies de dépérissement (Eutypiose, BDA-Esca, pourridié, pied noir, flavescence dorée et court-noué).

- Assessment Indicator of **D**amage from grapevine **A**nnual diseases (AIDA)

Cet indicateur permet d'évaluer les dommages causés sur les grappes par les maladies annuelles (mildiou, *Botrytis*, oïdium, black-rot et tordeuse).

- Assessment Indicator of **D**amage of grapevine **M**ultipest (AIDM)

Cet indicateur regroupe les principaux bioagresseurs impactant le rendement de la vigne. Il est composé de l'AIDA et de l'AIDD.

2. Étude pluriannuelles

Le manque de robustesse des évaluations lié au faible échantillonnage est un point critique de cette étude. De plus, la mise en relation de paramètres/indicateurs très intégratifs n'est pas chose aisée. De nombreux phénomènes et interactions sous-jacentes participent aux relations. L'analyse des données 2020 ainsi qu'une analyse pluriannuelle des données 2018-2020 pourrait pallier ce problème. En effet, une analyse pluriannuelle permettrait d'augmenter significativement la taille du jeu de données et ainsi produire des tests statistiques et des corrélations plus robustes.

3. Rectification du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude permet déjà de répondre à de nombreuses questions posées dans le projet TraDéVi et de nombreuses relations sont mieux comprises et analysées de manière approfondie. Cependant, ce dispositif expérimental ne semble pas être optimal pour l'étude d'indicateurs en lien avec les maladies du bois. En effet, il aurait été intéressant de travailler sur des parcelles diversifiées (caractéristiques pédoclimatiques, appellations...) avec des niveaux de dépérissement inégaux. Par exemple, les parcelles du réseau de Bordeaux sont toutes situées dans un rayon de 500 mètres sur le même domaine. Également, certaines parcelles de Cognac sont divisées en 3 parcelles traitées différemment. Afin d'améliorer la robustesse des analyses et la cohérence du dispositif expérimentale lié aux questions posées, il serait intéressant de disposer d'un réseau de parcelles avec des parcelles présentant des niveaux de dépérissement et des contextes pédoclimatiques différents.

Moréac Jean-Louis | Analyse des indicateurs AIDB+ multipathogènes et NDVI de vigueur pour évaluer l'impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne dans deux régions Cognac et Bordeaux.

Cependant, il est tout de même important de noter que la mise en place de tel dispositif est très complexe et coûteux en temps et en moyens. De plus, la finalité de cet indicateur est le transfert aux professionnels, cela implique également la mise en place d'un protocole simplifier qui facilite la prise en main de cet indicateur.

CONCLUSION

Les résultats de cette étude apportent une contribution importante à la quantification des symptômes dans un cadre multi-pathogène et à pour une meilleure caractérisation de la nuisibilité et impact des maladies du bois sur le rendement de la vigne. Tout d'abord, l'analyse de ces résultats a permis de mettre en évidence que les parcelles très symptomatiques présentent à la fois des baisses de vigueur et de rendement. Partant de ce constat, les deux principaux indicateurs suivant sont évalués comme étant de potentiels candidats pour quantifier la nuisibilité des maladies du bois.

L'indicateur NDVI_{pass3-pass1} traduisant la perte de vigueur lié aux ceps manquants/morts, CPs et/ou symptomatiques MdBs, est un indicateur efficace qui permet de quantifier l'impact des maladies du bois sur le taux de réalisation du rendement à partir de la véraison. À Bordeaux, une perte de 0,07 point d'indice NDVI due aux maladies du bois, entraîne une baisse du taux de réalisation du rendement de 10%. Cet indicateur présente tout de même une perte de fiabilité dans les vignobles très vigoureux qui entraînent la saturation de l'appareil de mesure (GreenSeeker) selon les dates de mesure.

L'indicateur multi-pathogène AIDB+ permet également de quantifier la nuisibilité des MdBs sur le rendement de la vigne. L'année 2019 étant une année à très faible pression des maladies annuelles (mildiou, oïdium, *Botrytis*, tordeuse et Black Rot), elle a permis de révéler le fort potentiel de l'AIDB+ à capter l'impact des maladies du bois sur le taux de réalisation du rendement. Toujours à Bordeaux, une augmentation de 12% de l'indicateur AIDB+, provoque une baisse de 10% du taux de réalisation du rendement.

On ne peut cependant pas encore valider totalement ces indicateurs car le nombre de parcelles étudiées est encore trop faible et les résultats bien que prometteurs, sont encore trop variables. Aujourd'hui le manque de robustesse de l'évaluation de ces indicateurs ne leurs permet pas une diffusion à grande échelle auprès des professionnels. C'est pourquoi, il reste nécessaire de conduire des essais complémentaires pour approfondir l'ensemble de ces relations et les valoriser au mieux ensuite pour optimiser la protection du vignoble.

Bibliographie

- Andreini, L. *et al.* Gas Exchange, Stem Water Potential and Xylem Flux on Some Grapevine Cultivars Affected by Esca Disease. *SAJEV* **30**, (2016).
- Berger, *et al.*, Plant physiology meets phytopathology: plant primary metabolism and plant pathogen interactions. *Journal of Experimental Botany* **58**, 4019–4026 (2007).
- Bernadette DUBOS. *Maladies cryptogamiques de la vigne*. (2002).
- Bertsch, C. *et al.* Grapevine trunk diseases: complex and still poorly understood. *Plant Pathology* **62**, 243–265 (2013).
- Bertsch, C. *et al.* Grapevine trunk diseases: complex and still poorly understood. *Plant Pathology* **62**, 243–265 (2013).
- Bois, B. & Calon nec, A. Climate vs grapevine pests and diseases worldwide: the first results of a global survey. *OENO One* **51**, 133 (2017).
- Bréda, N. & Peiffer, M. Vulnerability to forest decline in a context of climate changes: new prospects about an old question in forest ecology. *Annals of Forest Science* **71**, 627–631 (2014).
- Calon nec, A. *et al.*, Effects of *Uncinula necator* on the yield and quality of grapes (*Vitis vinifera*) and wine. *Plant Pathology* **53**, 434–445 (2004).
- Calzarano, F. *et al.* Levels of phytoalexins in vine leaves with different degrees of grapevine leaf stripe disease symptoms (Esca complex of diseases). *Phytopathologia Mediterranea* **56**, 494–501 (2017).
- Carbonneau A. The instability of late leaf hydration at the initiation of transpiration under drought conditions. The example of *Vitis vinifera* L. cv. Semillon. *ournal international des Sciences de la Vigne et du Vin* 75–83 (1991).
- Carlucci, A. *et al.*, Characterization of Botryosphaeriaceae Species as Causal Agents of Trunk Diseases on Grapevines. *Plant Disease* **99**, 1678–1688 (2015).
- Castillo-Pando. *et al.*, Priest, M. & Sriskanthades, M. Fungi associated with dieback of Semillon grapevines in the Hunter Valley of New South Wales. *Australasian Plant Pathology* **30**, 59–63 (2001).
- Choat, B. *et al.* Triggers of tree mortality under drought. *Nature* **558**, 531–539 (2018).
- Clinge leffer, P. R. Plant management research: status and what it can offer to address challenges and limitations. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **16**, 25–32 (2010).
- Corti, G. *et al.*, Influence of Soil Factors on Esca Infection in a Vineyard Soil on Pliocene Deposits. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **38**, 661–678 (2007).
- Coulon, C. Méthode de caractérisation systémique du fonctionnement de la vigne à partir de l'évaluation des effets combinés du milieu et des pratiques culturales pour prévoir les types de vins. (Angers, 2012).
- Diakou-Verdin, P. *et al.* Grape berry development : A review. *OENO One* **36**, 109 (2002).
- Didier Guillaume; Bernard ANGELRAS; Guide de sensibilisation à la Certification Haute Valeur Environnementale. (2019).
- Fermaud, M. *et al.* New multipest damage indicator to assess protection strategies in grapevine cropping systems. *Australian Journal of Grape and Wine Research* (2016) doi:10.1111/ajgw.12238.
- Filippetti, I. *et al.* Influence of vigour on vine performance and berry composition of cv. Sangiovese (*Vitis vinifera* L.). *OENO One* **47**, 21 (2013).
- Fischer, M. & Kassemeyer, H.-H. Water regime and its possible impact on expression of Esca symptoms in *Vitis vinifera*: growth characters and symptoms in the greenhouse after artificial infection with *Phaeo moniella chlamydo spora*. *VITIS - Journal of Grapevine Research* 129 Pages (2015).
- Gadoury, D. M. *et al.* Grapevine powdery mildew (*Erysiphe necator*): a fascinating system for the study of the biology, ecology and epidemiology of an obligate biotroph. *Molecular Plant Pathology* **13**, 1–16 (2012).
- Gessler, C. *et al.*, *Plasmopara viticola*: a review of knowledge on downy mildew of grapevine and effective disease management. *Phytopathologia Mediterranea* **50**, 3–44 (2011).
- Gramaje, D. *et al.*, Grapevine Trunk Diseases With Respect to Etiology and Epidemiology: Current Strategies and Future Prospects. *Plant Disease* **102**, 12–39 (2018).
- Guilpart, N. Relations entre services écosystémiques dans un agroécosystème à base de plantes pérennes : compromis entre rendement de la vigne et régulation de l'oïdium. (2014).

- HALE, C. *et al.*, Effect of temperature on ontogeny of berries of *Vitis vinifera* L. CV Cabernet Sauvignon. (1974).
- Hofstetter V. *et al.*, Maladies du bois de la vigne: état des lieux et axes de recherche d'Agroscope. *Revue suisse de viticulture arboriculture horticulture* 88–96 (2017).
- Hossard, L. *et al.*, Lack of evidence for a decrease in synthetic pesticide use on the main arable crops in France. *Sci. Total Environ.* **575**, 152–161 (2017).
- Jacques Delas. *Fertilisation de la vigne*. (2000).
- Jermini, M. *et al.*, Quantitative effect of leaf damage caused by downy mildew (*Plasmopara viticola*) on growth and yield quality of grapevine 'Merlot' (*Vitis vinifera*). *Vitis -Geilweilerhof-* **79**, 77–85 (2010).
- Kaps, M. L. & Cahoon, G. A. Growth and Fruiting of Container-Grown Seyval blanc Grapevines Modified by Changes in Crop Level, Leaf Number and Position, and Light Exposure. *Am J Enol Vitic.* **43**, 191–199 (1992).
- Keller, M. Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **16**, 56–69 (2010).
- Kemp, B. *et al.*, The effect of vine spacing on vine vigour, berry ripeness and wine composition of *Vitis vinifera* cv. L. Regner in the south of England. in (2013).
- Larignon, P. *Maladies cryptogamiques du bois de la vigne : symptomatologie et agents pathogènes*. (2016).
- Larignon, P. & Dubos, B. Fungi associated with Esca disease in grapevine. *European Journal of Plant Pathology* **103**, 147–157 (1997).
- Lecomte, P. *et al.* New Insights into Esca of Grapevine: The Development of Foliar Symptoms and Their Association with Xylem Discoloration. *Plant Disease* **96**, 924–934 (2012).
- Lopez Pinar. *et al.*, Effects of Bunch Rot (*Botrytis cinerea*) and Powdery Mildew (*Erysiphe necator*) Fungal Diseases on Wine Aroma. *Front. Chem.* **5**, (2017).
- Luque, J. *et al.*, and fungi associated with declining mature grapevine plants in Northeast Spain. *Journal of Plant Pathology* **91**, 381–390 (2009).
- Mahé, H. *et al.* A tool for technical and economic evaluation of dieback in wine-growing holdings. *Web Conf.* **15**, (2019).
- Merot, A., Fermaud, M., Gosme, M. & Smits, N. Effect of Conversion to Organic Farming on Pest and Disease Control in French Vineyards. *Agronomy* **10**, 1047 (2020).
- Morton L. Mystery diseases hit young vines. *Wines and Vines* 46–47 (1995).
- Mugnai, L. *et al.*, Esca (Black Measles) and Brown Wood-Streaking: Two Old and Elusive Diseases of Grapevines. *Plant Disease* **83**, 404–418 (1999).
- Munkvold, G. P. Reductions in Yield and Vegetative Growth of Grapevines Due to *Eutypa* Dieback. *Phytopathology* **84**, 186 (1994).
- Nicolas Constant. *La maîtrise de l'oïdium en viticulture biologique*. (2013).
- Ojeda, H. & Carbonneau, A. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* **40**, 141–145 (2001).
- Olivier VIRET. *La vigne Volume 1 : maladies fongiques*. (2014).
- Pandey, P. *et al.*, Shared and unique responses of plants to multiple individual stresses and stress combinations: physiological and molecular mechanisms. *Front Plant Sci* **6**, (2015).
- Pañitur-De la Fuente C. *et al.*, Vigor thresholded NDVI is a key early risk indicator of *Botrytis* bunch rot in vineyards. *OEno-One* (2020).
- Pellegrino, A. *et al.*, Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **11**, 306–315 (2005).
- Phillips, A. J. L. *Botryosphaeria dothidea* and Other Fungi Associated with Excoriose and Dieback of Grapevines in Portugal. *Journal of Phytopathology* **146**, 327–332 (1998).
- Pierre Galet. *Précis de viticulture*. (2000).
- Pool, R. M. Influence of Powdery Mildew on Yield and Growth of Rosette Grapevines. *Plant Dis.* **68**, 590 (1984).
- Qiu, W., Feechan, A. & Dry, I. Current understanding of grapevine defense mechanisms against the biotrophic fungus (*Erysiphe necator*), the causal agent of powdery mildew disease. *Hortic Res* **2**, 15020 (2015).
- Rives, M. Vigour, pruning, cropping in the grapevine (*Vitis vinifera* L.). I. A literature review. *Agronomie* **20**, 79–91 (2000).
- Rolshausen, P. E. *et al.* Pathogenesis of *Eutypa lata* in Grapevine: Identification of Virulence Factors and Biochemical Characterization of Cordon Dieback. *Phytopathology*® **98**, 222–229 (2008).

- Sakalidis, M., Hardy, G. & Burgess, T. Endophytes as potential pathogens of the baobab species *Adansonia gregorii*: A focus on the Botryosphaeriaceae. *Fungal Ecology* **4**, 1–14 (2011).
- Schauberger, B. *et al.* Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Sci Rep* **8**, 16865 (2018).
- Serrano, L. *et al.*, Assessment of grape yield and composition using the reflectance based Water Index in Mediterranean rainfed vineyards. *Remote Sensing of Environment* (2012).
- Smart, R. E. & Sinclair, T. R. Solar heating of grape berries and other spherical fruits. *Agricultural Meteorology* **17**, 241–259 (1976).
- Sosnowski, M. R. *et al.*, The Influence of Grapevine Cultivar and Isolate of *Eutypa lata* on Wood and Foliar Symptoms. *Plant Disease* **91**, 924–931 (2007).
- Sparapano, L. *et al.*, Three-Year Observation of Grapevines Cross-Inoculated with Esca-Associated Fungi. *Phytopathol. Mediterr.* **40**, 376–386 (2001).
- Surico, G. *et al.*, Older and More Recent Observations on Esca : A Critical Overview. *Phytopathologia Mediterranea* **45**, S68–S86 (2006).
- Taylor, A. S. & Cook, D. C. An economic assessment of the impact on the Western Australian viticulture industry from the incursion of grapevine downy mildew. *J Plant Dis Prot* **125**, 397–403 (2018).
- Tesic, D. *et al.*, Environmental effects on cv Cabernet Sauvignon grown in Hawke's Bay, New Zealand.: 1. Phenology and characterisation of viticultural environments. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **8**, 15–26 (2002).
- Trouillas, F. & Gubler, W. Host Range, Biological Variation, and Phylogenetic Diversity of *Eutypa lata* in California. *Phytopathology* **100**, 1048–56 (2010).
- Úrbez-Torres, J. R. The status of Botryosphaeriaceae species infecting grapevines. *Phytopathologia Mediterranea* **50**, S5–S45 (2011).
- Valdés-Gómez, H., Fermaud, M., Roudet, J., Calonnet, A. & Gary, C. Grey mould incidence is reduced on grapevines with lower vegetative and reproductive growth. *Crop Protection - CROP PROT* **27**, 1174–1186 (2008).
- Williams, D. W. *et al.* Validation of a Model for the Growth and Development of the Thompson Seedless Grapevine. II. Phenology. *Am J Enol Vitic.* **36**, 283–289 (1985).

Sitographie

- Butault, J.-P. *et al.* Synthèse du rapport d'étude *Écophyto R&D : quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ?* 90 p. (2010).
- CLAVERIE, M. *et al.* Neadex AB : bilan des réseaux d'expérimentation en France. *Progrès Agricole et Viticole* 17–29 (2016).
- CNIV. Comité National des Interprofessions des Vins à appellation d'origine et à indication géographique.
- Delière L., Burgun X. *et al.*, Réseau DEPHY EXPE : Synthèse des résultats à miparcours à l'échelle nationale - filière Viticulture. (2016).
- Douane & droits indirects. Application par les États-Unis de droits additionnels sur certains produits de l'UE | Portail de la Direction Générale des Douanes et Droits Indirects. (2019).
- FranceAgriMer. *Les chiffres de la pépinière viticole 2017*. (2018).
- LARVF. Coronavirus : la situation est très difficile pour les vignerons alsaciens - La Revue du vin de France. (2020).
- LARVF. Le Brexit, entre augmentation des prix et inquiétudes pour la filière vin - La Revue du vin de France. (2020).
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. Plan *Écophyto II+*. (2018).
- OIV. Communiqué de presse : Eléments de conjoncture vitivinicole mondiale.
- Vin & Société. *Rapports d'activité 2018 de Vin & Société*. (2018).
- Vin & Société. Bilan de l'Organisation Mondiale de la Vigne et du Vin 2019. (2019)
- Ephytia. (2020).

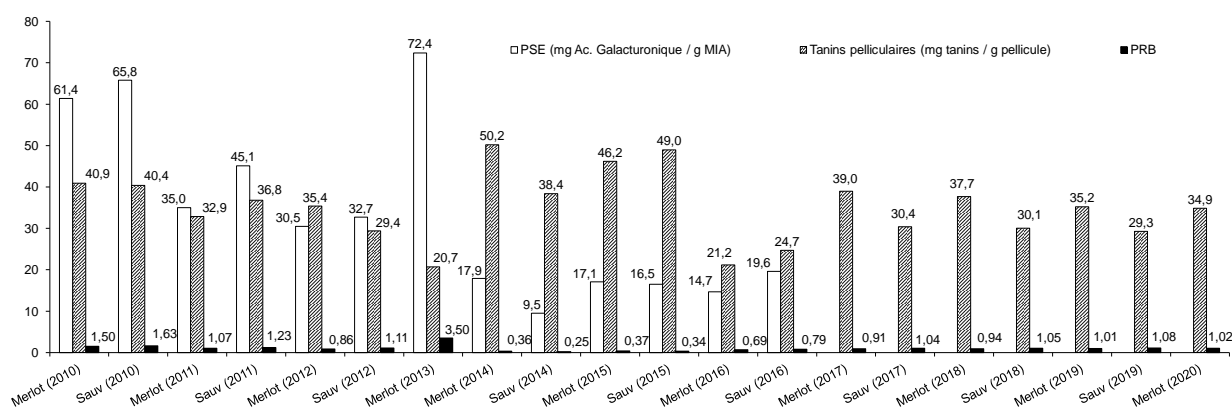
Autres activités réalisées durant le stage

Parallèlement au projet TraDéVi, diverses activités ont été réalisées et notamment des expérimentations pour les projets PRB et PROMISE.

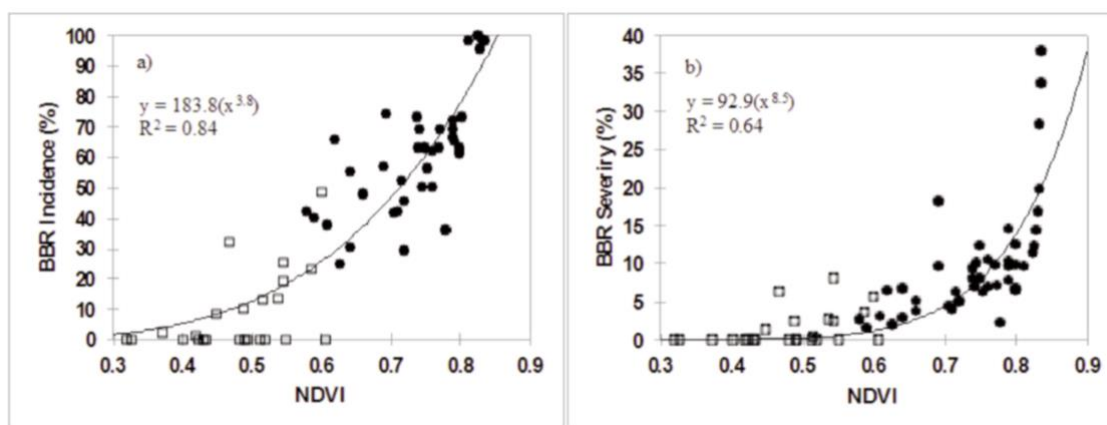
- PRB (Potentiel de Réceptivité des Baies)

Le PRB est un indicateur qui consiste à évaluer, avant fermeture de la grappe, la sensibilité des baies au champignon *Botrytis cinerea*. Sa valeur est corrélée à l'intensité finale de la maladie et résulte principalement d'un dosage de composés pelliculaires : les tannins synthétisés par les baies pour se défendre. En raison du contexte particulier lié au Covid-19, le dosage des tannins a été réalisé en 2020 que sur le cépage Merlot noir. Parallèlement, au dosage des tannins, des mesures de NDVI ont été réalisées au vignoble. En effet, l'indice NDVI est corrélé à la vigueur de la vigne, mais aussi positivement au taux final d'attaque de *Botrytis* (Panitrur et al, 2020).

La valeur du PRB en 2020 atteint 1,02 ; ce qui indique une sensibilité pelliculaire de la baie au *Botrytis* médiane et intermédiaire au vu des 10 derniers millésimes. Cependant, l'indicateur de risque NDVI atteint lui 0,77 ; ce qui amène à rester vigilant sur le risque épidémique potentiel en 2020. Ces résultats et valeurs associées au PRB (dont NDVI) ont été diffusés en juillet, comme chaque année, par l'interprofession de Bordeaux (CIVB) afin de permettre aux viticulteurs d'adapter leur stratégie de lutte et notamment de mettre en place des mesures prophylactiques (effeuillage...).



Valeurs du PRB de 2010 à 2020 sur Merlot et Sauvignon selon les teneurs en tanins pelliculaires : mg de tanins par g de pellicule (intégrant, secondairement aussi les teneurs en pectines hydrosolubles PSE).



Relation entre l'indicateur de vigueur/porosité végétative "NDVI-Bot" (axe des X) et l'expression de Pourriture grise à la vendange pour différents millésimes : a) à gauche, fréquence de grappes atteintes et b) à droite, sévérité finale de maladie en pourcentage de baies botrytisées (Panitru et al, 2020).

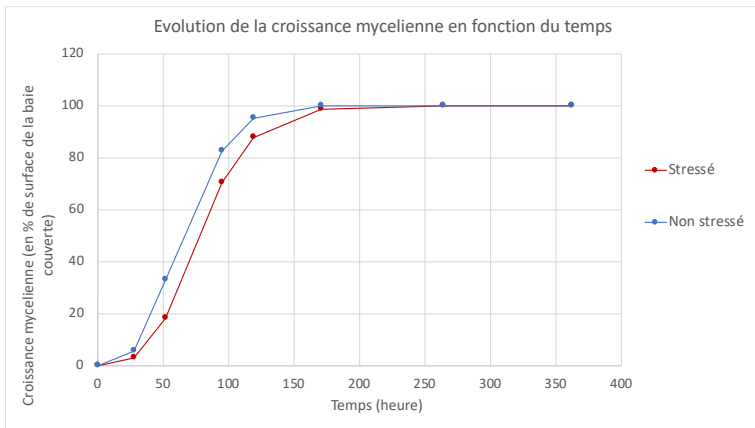
- **PROMISE** (Plant tolerance to multistress : from phenotypes to genes)

Le projet PROMISE est un projet qui vise à étudier les réponses des plantes à de multiple stress et les compromis entre les mécanismes de résistance (et/ou défense) et la croissance végétale. Cette partie du projet se concentre sur les stress liés à la chaleur et à la sécheresse ainsi que sur les maladies fongiques et virales, qui sont les principaux agents pathogènes à l'origine des maladies infectieuses émergentes des plantes.

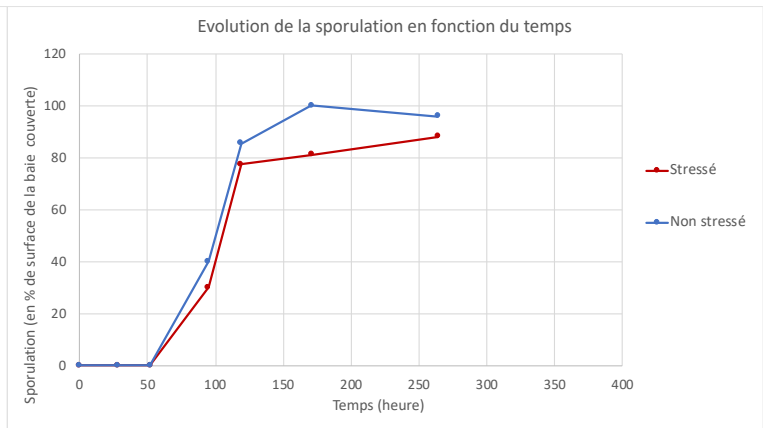
L'UMR SAVE a entrepris des expérimentations sur le réchauffement climatique et l'impact de *Botrytis cinerea* sur la vigne. Pour cela, deux cépages (génotypes) de boutures de vigne fructifères sensibles (Merlot) et tolérants (Carbernet sauvignon) à *B. cinerea* ont été utilisés et soumises à un stress thermique au niveau des baies/grappes uniquement. Par la suite, les baies détachées ont été inoculées via des implants mycéliens de 2 souches de *B. cinerea*.

Au cours des notations, les caractéristiques phénotypiques de l'agent pathogène et l'intensité des symptômes ont été quantifiés afin d'évaluer la réponse de l'agent pathogène aux stress abiotiques appliqués préalablement à la plante hôte. Ont été mesurés visuellement en surface des baies inoculées : le développement mycélien, le développement des symptômes, la production de spores...

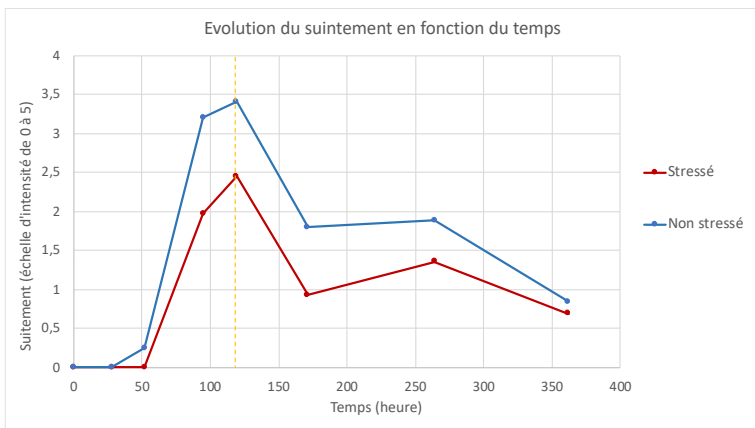
Les résultats préliminaires font état d'une baisse de la croissance mycélienne, de la sporulation et du suintement (possiblement suite à la production d'enzymes par *Botrytis* et/ou à une maturité retardée des baies stressées) pour les baies préalablement soumises à un stress thermique.



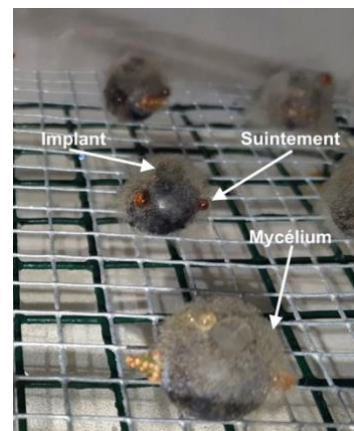
Évolution de la croissance mycélienne en fonction du temps sur des baies de Cabernet Sauvignon stressées (rouge) et non stressées (bleu).



Évolution de la sporulation du mycélium en fonction du temps sur des baies de Cabernet Sauvignon stressées (rouge) et non stressées (bleu).



Évolution du suintement des baies en fonction du temps sur des baies de Cabernet Sauvignon stressées (rouge) et non stressées (bleu). A partir de 120 heures (limite jaune), les suintements sont en parti recouverts par le mycélium.



Baies de Cabernet Sauvignon stressées thermiquement et inoculées par *Botrytis cinerea* S213.

ANNEXES

ANNEXE I

Méthodes de lutte contre le mildiou

La lutte contre le mildiou repose tout d'abord sur des mesures prophylactiques. Ces mesures passent par l'élimination des résidus de culture, un épamprage, suivi d'un rognage raisonné, voire d'un drainage des parcelles, afin de limiter l'inoculum primaire. La maîtrise de la vigueur peut également être citée. En effet, il a été démontré que les vignes les plus vigoureuses, gorgées d'eau, étaient plus sensibles à la maladie (Raynal *et al.*, 2015). Cependant, pendant toute la croissance de la vigne, il faudra tout de même réaliser un certain nombre de traitements, en fonction de la vitesse de croissance des rameaux et des feuilles, de la fréquence des pluies, de la température et de la pression parasitaire (Magarey, 2010; Chen, 2019). À lui seul, le mildiou est responsable de 43 % des interventions dans le Bordelais.

ANNEXE II

Méthodes de lutte contre les maladies du bois

Depuis l'arrêt de l'arsénite de sodium en 2001 (Ministère de l'agriculture, 2001), il n'existe aucune méthode de lutte spécifique dirigée contre les champignons associés aux MDB. Cependant, certaines pratiques permettent de limiter le développement de ces maladies :

- Tout d'abord, la bonne qualité des plants est un critère incontournable pour assurer une bonne espérance de vie d'une parcelle. L'état de fraîcheur du matériel végétal, la répartition et la densité des racines, la qualité de la soudure et surtout l'absence de champignons, sont les critères importants qui garantissent la bonne qualité des plants (IFV).
- Plusieurs méthodes prophylactiques peuvent être conjuguées pour limiter les contaminations des ceps par les champignons : éliminer de la parcelle les bras et les ceps morts afin de réduire la quantité d'inoculum, retarder la taille pour les ceps sensibles en privilégiant la montée de sève, raisonner et adapter ses pratiques culturales pour limiter les excès de vigueur et la charge des pieds.
- La protection des plaies de taille, notamment par le champignon *Trichoderma atroviride*, peut permettre de lutter contre les MDB (Di Marco, 2018). C'est une méthode préventive qui repose sur 4 modes d'action :
 - L'antibiose, qui résulte de la production par ces *Trichoderma* de substances inhibitrices de la croissance des pathogènes.
 - La compétition pour les ressources nutritives car *Trichoderma* consomme les mêmes nutriments que les pathogènes.

- La compétition spatiale, par croissance rapide des *Trichoderma* en comparaison à d'autres microorganismes.
- L'hyperparasitisme, c'est à dire la destruction des pathogènes par la production d'enzymes lytiques qui leur sont létales.

Cependant, on peut noter que l'efficacité sur le terrain, des *Trichoderma* pour le contrôle des MDB est toujours sujette à controverse (Larignon 2009).

- Plusieurs techniques peuvent être tentées dans le but de restaurer les souches atteintes. Il s'agit du recépage, du greffage ou du curetage. Le recépage et le greffage, consistent à couper le tronc à un niveau assez bas pour qu'il n'y ai plus nécrose. Par la suite, pour le recépage, la technique consiste à laisser un nouveau tronc se former avec un jeune pampre. Cependant, certains cépages n'émettent pas de gourmand, un greffage est alors préconisé. Ces techniques permettent de conserver le système racinaire. Le curetage, consiste en l'ouverture des pieds malades pour rendre visibles les tissus ligneux dégradés par l'action des champignons. Le bois mort semblable à l'amadou, caractéristique de l'esca, est ensuite retiré par une tronçonneuse et la souche est laissée ouverte (IFV).
- En ultime recoure, il est possible de renouveler les pieds manquants via deux pratiques : le remplacement des ceps malades par des greffés-soudés qui présente des résultats aléatoires, ou le marcottage, conseillé pour les parcelles âgées (IFV).

ANNEXE III

Présentation des maladies du bois

- Diaporthe

Le dépérissement lié aux champignons du genre *Diaporthe* a été décrit en France en 2016 (Larignon 2016). Ce dépérissement manifeste des symptômes similaires à l'eutypiose. Cependant, contrairement à l'eutypiose, le dépérissement lié au *Diaporthe* touche les jeunes vignes âgées de 3 à 8 ans. Les symptômes sur la partie herbacée sont caractérisés par un affaiblissement de la végétation. Comme pour l'eutypiose, les rameaux sont plus petit et présentent des feuilles chlorotiques. Cependant, contrairement à l'eutypiose, les feuilles ne présentent pas de déchirures, de crispations ou encore de nécroses. Lorsque la maladie est bien installée, il est possible d'observer un dessèchement de rameaux, une absence de débourrement ou même la mort d'un bras. Dans le bois, des nécroses sectorielles et des ponctuations de couleur brune sont observées.

- Les pourridiés

Les pourridiés sont des maladies parasitaires due à divers champignons, principalement l'*Armillaria mellea* (90%, Guillaumin et al. 1982). Ces maladies se développent sur les racines des vignes, des chênes et des arbres fruitiers. Elles engendrent la mort des ceps atteints. Les pourcentages de pieds morts ou dépérissants peuvent atteindre 50 à 60 % sur les parcelles très atteintes. Par exemple, 36 % de pieds morts ou atteints ont été dénombrés sur environ 80 hectares dans la région de Saint-Emilion (Ephytia, INRAE). Les symptômes apparaissent plusieurs années après la contamination et sont délicats à identifier. Les principaux symptômes sont, des sarments chétifs, une chlorose foliaire et une coulure des grappes. Les racines sont alors noirâtres et cassantes. Sous l'écorce, le pourridié génère un important mycélium en plaques blanchâtres, qui génère une forte odeur de champignon.



Cep atteint par le pourridié (Blancard, INRAE)

- Le pied noir

La maladie du Pied noir est une maladie cryptogamique qui touche les jeunes plantations de vigne jusqu'à l'âge de 6 à 8 ans. C'est une maladie tellurique qui est dépendante des conditions prédisposant les jeunes plantes à des infections par les racines, notamment l'humidité et les conditions asphyxiantes de certains sols. L'intensité de la maladie peut aller de quelques ceps, jusqu'à 50% de la parcelle touchée. Les symptômes peuvent s'exprimer par une absence de débourrement ou par une végétation affaiblie qui se dessèche au cours de la saison (apoplexie). L'examen du système racinaire montre des racines qui se développent peu profondément et parallèlement à la surface du sol. À un niveau supérieur sur le porte-greffe, on peut observer un deuxième plateau de racines qui permet, la survie du plant. Les racines du premier plateau deviennent nécrosées et prennent une couleur grise (IFV).

- La verticilliose

La verticilliose est une maladie cryptogamique qui touche les jeunes plants de vigne, de la plantation jusqu'à l'âge de 6 ans. Les symptômes de cette maladie peuvent ressembler à ceux de l'esca ou du Black dead arm au niveau de la partie herbacée. En effet, la verticilliose se manifeste sous deux formes : (i) une forme lente qui se caractérise par des taches jaunâtres à la surface du limbe ou des taches nécrotiques délimitées par un liseré jaune. (ii) une forme apoplectique qui se manifeste par un dessèchement des rameaux et la chute des feuilles et des grappes (contrairement au BDA). Dans le bois, les symptômes se traduisent par des nécroses olivâtres ou brunes. Ces symptômes sont rencontrés dans le porte-greffe, le point de greffe et le greffon. Les racines peuvent également présenter des nécroses de couleur grisâtres.



Pied de vigne atteint par le pied noir (Ruet, INRAE).



Nécrose foliaire caractéristique de la verticilliose (PNDV).



Forme apoplectique de la verticilliose avec chute des feuilles et grappes (IFV).



Cep atteint par la verticilliose (IFV).

ANNEXE IV

Équation de l'indicateur multi-pathogène AIDB +

$$AIDB_{\%}^{+} = C_{\%}^{+} \{ (100 - C_{\%}^{+}) \times [1 - (A_{\%}^{+} \times B^{+} / 100)] \}$$

L'équation se décompose en 3 parties :

A%+ (de 0 à 100) : Ravageurs / attaques précoces de la floraison à la fructification.

B+ (de 0 à 1) : Infections pendant la croissance et la maturation des baies sur des grappes existantes.

C%+ (de 0 à 100) : Perte d'inflorescences et / ou de grappes entières suite aux attaques des MdBs et / ou d'autres raisons / conséquences des MdBs.

Partie " A%+ " de l'équation

À la floraison, le DM (mildiou / mildiou rot-gris), le GM (moisissure grise / Botrytis sur inflorescence) et le TM (pyridés) peuvent infecter des parties ou la totalité de l'inflorescence (qui doit être abscisée).

$$A_{\%}^{+} = 100 - [(DMF\% + GMF\% + ((10/25) \times TMF\%)]$$

Avec :

- **DMF (%)** = gravité moyenne du mildiou sur les fleurs
- **GMF (%)** = gravité moyenne de la moisissure grise sur les fleurs
- **TMF (%)** = gravité moyenne associée aux larves de la première génération de tordeuse de la vigne.

Le facteur « 10/25 » vient du fait que l'étude des glomérules sur de nombreux cultivars par l'INRAE de Bordeaux (L. DELBAC communication personnelle) montre que 10 fleurs sur 25 (soit 40%) sont vraiment détruites par la larve.

Partie " B+ " de l'équation

Après la nouaison, les maladies et ravageurs affectent les fruits / baies restants en termes de volume et / ou de masse.

$$B^{+} = 1 - [\frac{DMB\%}{100} + \frac{PM\%}{100} + \frac{GMB\%}{100} + \frac{TM\%}{100} + \frac{BR\%}{100} + \frac{SR\%}{100} + (F_{ES\%} \times \frac{C_{ES}}{C_N} \times \frac{S_{ES\%}}{100}) / 100]$$

Avec :

- **DMB%** = gravité moyenne du mildiou sur grappes à la véraison.
- **PM%** = gravité moyenne de l'oïdium sur grappes à la véraison.
- **GMB%** = gravité moyenne de la moisissure grise sur grappes à la récolte.
- **TM%** = gravité moyenne de tordeuse sur grappes à la vendange.
- **BR%** = gravité moyenne de la pourriture noire sur grappes à la véraison
- **SR%** = gravité moyenne de la pourriture acide sur grappes à la récolte
- **MdBs** = Maladies du bois où :
 - o **F_{Es%}** = fréquence des vignes atteintes d'Esca en %
 - o **C_{Es} / C_N** = rapport (de 0 à 1) du nombre de grappe par vigne Esca divisé par le nombre moyen de grappe par vigne saine
 - o **S_{Es%}** = taux de flétrissement (de 0 à 100) dû à l'Esca = pourcentage moyen de perte de volume de baies / fruits dans les grappes restantes à la récolte sur les vignes exprimant les symptômes de Esca

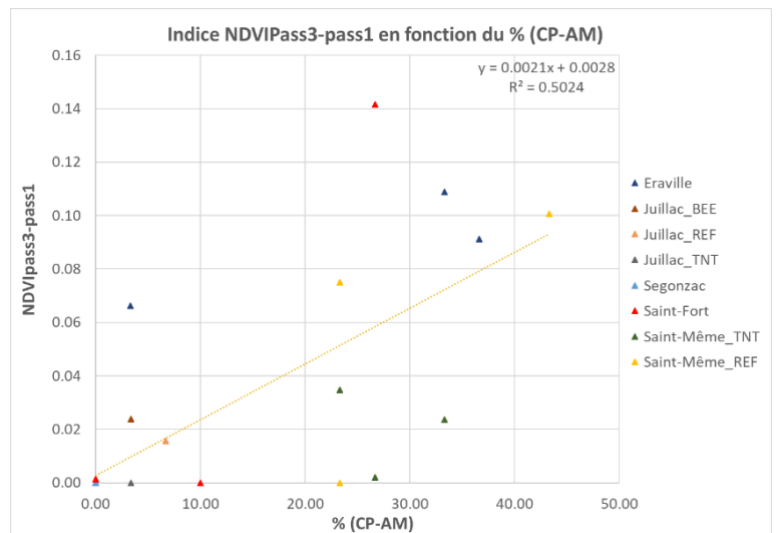
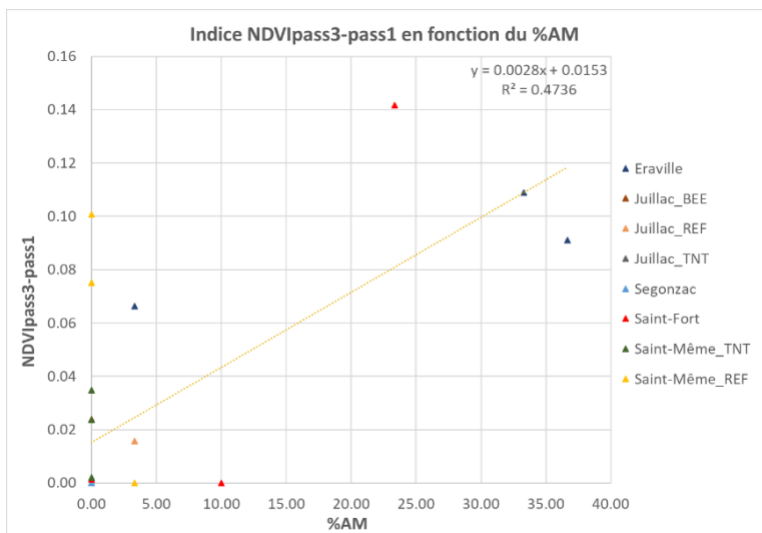
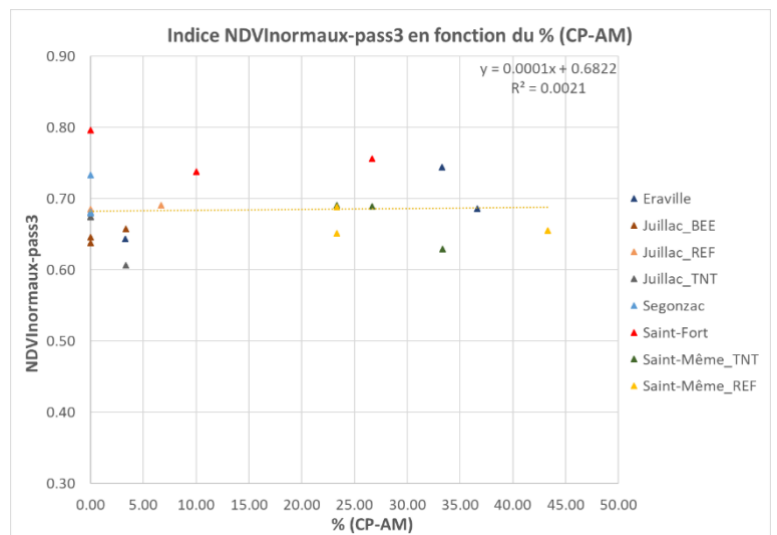
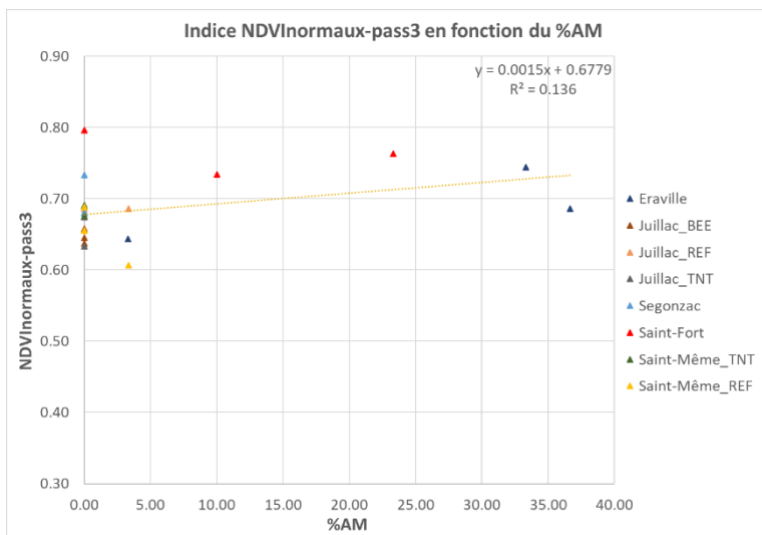
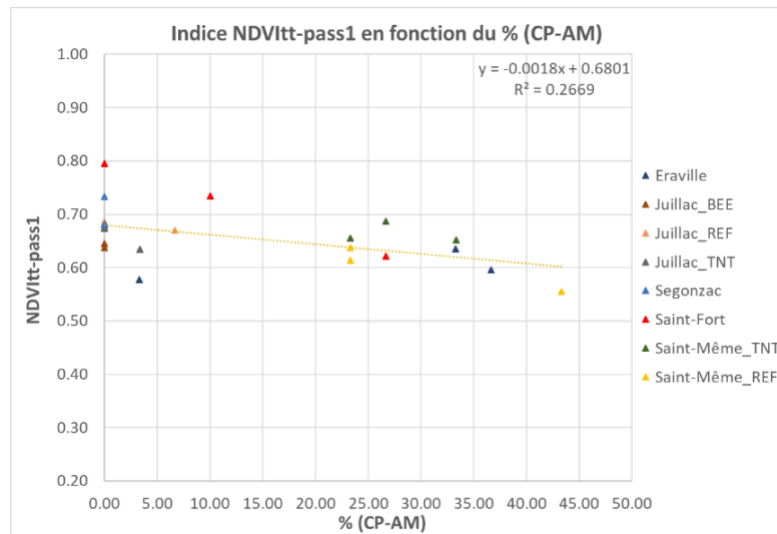
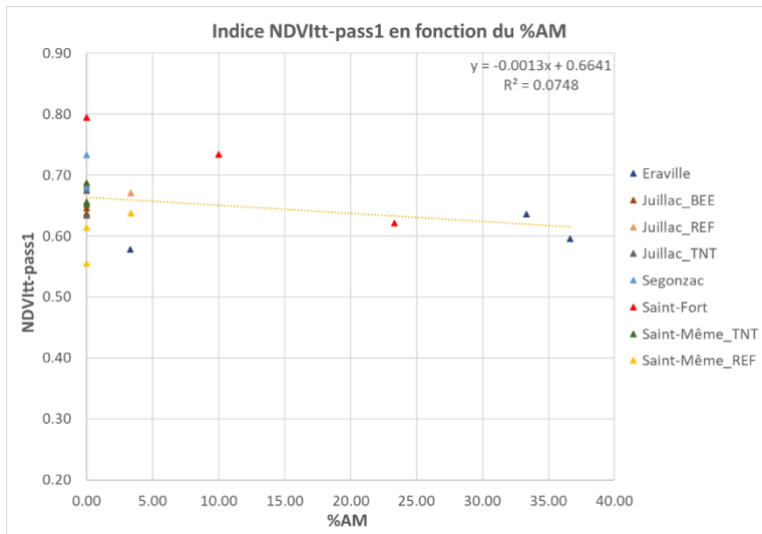
Partie " C%+ " de l'équation

$$C_{\%}^{+} = \left(\frac{1}{C_N}\right) \times [(F_{AM\%} \times C_N) + (F_{ES\%} \times (C_N - C_{ES})) + (F_{EU\%} \times (C_N - C_{EU})) + (F_{M/2\%} \times (C_N - C_{M/2})) + (F_{CP\%} \times (C_N - C_{CP}))]$$

Avec :

- **F_{Es%}** = fréquence des vignes Esca en %
- **F_{Eu%}** = fréquence des vignes Eutypiose en %
- **F_{M/2%}** = fréquence des vignes avec un bras mort en %`
- **F_{CP%}** = fréquence des vignes Complant
- **F_{AM%}** = fréquence des vignes mortes (Mort) ou absentes (A)
- **C_N** = nombre moyen "normal" de grappe par vigne saine
- **C_{Es}** = nombre moyen de grappe par pied de vigne Esca
- Identique pour les cepts « Eu », « M/2 » et « CP »

ANNEXE V



ANNEXE VI

- **Assessment Indicator of Damage of grapevine Dieback diseases (AIDD)**

Cet indicateur présente la perte de charge entre 0 et 100% suite aux attaques des maladies de dépérissement.

$$\text{AIDD (\%)} = \left(\frac{1}{C_N}\right) \times [(F_{AM\%} \times C_N) + (F_{ES\%} \times (C_N - C_{ES})) + (F_{EU\%} \times (C_N - C_{EU})) + (F_{M/2\%} \times (C_N - C_{M/2})) + (F_{CP\%} \times (C_N - C_{CP}))]$$

Avec :

- $F_{ES\%}$ = fréquence des vignes Esca en %
- $F_{EU\%}$ = fréquence des vignes Eutypiose en %
- $F_{M/2\%}$ = fréquence des vignes avec un bras mort en %
- $F_{CP\%}$ = fréquence des vignes Complant
- $F_{AM\%}$ = fréquence des vignes mortes (Mort) ou absentes (A)
- C_N = nombre moyen "normal" de grappe par vigne saine
- C_{ES} = nombre moyen de grappe par pied de vigne Esca
- Identique pour les cepes « Eu », « M/2 » et « CP »

On pourra également y ajouter les maladies du pourridié, la maladie du pied noir, le diaporthe, la verticilliose, la flavescence dorée et le court-noué en fonction de la présence ou non de ces maladies dans les parcelles évaluées.

- **Assessment Indicator of Damage of grapevine Annual diseases (AIDA)**

Cet indicateur permet d'évaluer les dommages causés sur les grappes par les maladies annuelles.

$$\text{AIDA (\%)} = 100 - (A \times B)$$

L'équation se décompose en 2 parties :

A% (de 0 à 100) : Ravageurs / attaques précoces de la floraison à la fructification.

B (de 0 à 1) : Infections pendant la croissance et la maturation des baies sur des grappes existantes.

Partie " A% " de l'équation

$$A\% = 100 - [(DMF\% + GMF\% + ((10/25) \times TMF\%))]$$

Avec :

- **DMF (%)** = gravité moyenne du mildiou sur les fleurs
- **GMF (%)** = gravité moyenne de la moisissure grise sur les fleurs
- **TMF (%)** = gravité moyenne associée aux larves de la première génération de tordeuse de la vigne.

Le facteur « 10/25 » vient du fait que l'étude des glomérules sur de nombreux cultivars par l'INRAE de Bordeaux (L. DELBAC communication personnelle) montre que 10 fleurs sur 25 (soit 40%) sont vraiment détruites par la larve.

Partie " B " de l'équation

Après la nouaison, les maladies et ravageurs affectent les fruits / baies restants en termes de volume et / ou de masse.

$$B = 1 - [\frac{DMB\%}{100} + \frac{PM\%}{100} + \frac{GMB\%}{100} + \frac{TM\%}{100} + \frac{BR\%}{100} + \frac{SR\%}{100}]$$

Avec :

- **DMB%** = gravité moyenne du mildiou sur grappes à la véraison.
- **PM%** = gravité moyenne de l'oïdium sur grappes à la véraison.
- **GMB%** = gravité moyenne de la moisissure grise sur grappes à la récolte.
- **TM%** = gravité moyenne de tordeuse sur grappes à la vendange.
- **BR%** = gravité moyenne de la pourriture noire sur grappes à la véraison
- **SR%** = gravité moyenne de la pourriture acide sur grappes à la récolte

- **Assessment Indicator of Damage of grapevine Multipest (AIDM)**

Cet indicateur regroupe les principales bioagresseurs impactant le rendement de la vigne. Il permet d'évaluer d'une manière globale l'impact des bioagresseurs sur le rendement. est composé de la partie "A%" et "B" de l'AIDA et de l'AIDD.

$$AIDM\% = AIDD\% \{ (100 - AIDD\%) \times [1 - (A\% \times B / 100)] \}$$

RÉSUMÉ

La viticulture française subit une baisse de production moyenne estimée à 5% par an, depuis plusieurs années, due au phénomène de "déperissement". Ce fléau résulte d'une baisse pluriannuelle subie de la productivité du cep et/ou de sa mort prématurée, brutale ou progressive liée à une multiplicité de facteurs encore mal connus. Le déperissement fait l'objet d'études approfondies à l'UMR SAVE : projet TraDéVi (PNDV) notamment, qui vise à l'étudier en fonction, pour partie, de causes biotiques incluant les maladies cryptogamiques et ravageurs majeurs de la vigne. Premières concernées, les maladies du bois (Esca, Eutypiose) conduisant à la mort des ceps, mais aussi mildiou, oïdium, tordeuses, black-rot et pourriture grise qui impactent la qualité et le rendement. De nouveaux indicateurs ont été testés afin de mieux quantifier cet impact biotique sur le rendement, mais aussi les relations entre pression multi-pathogènes, vigueur végétative et rendement (indicateurs AIDB+, NDVI, YAR, resp.). Ces indicateurs ont été analysés sur la base des données 2019 dans deux régions Cognac et Bordeaux. Les deux principaux indicateurs mis en évidence et d'intérêt sont (1) l'indicateur multi-pathogènes AIDB+ et (2) l'indicateur NDVI_{pass3-1} relatif à la perte de vigueur liée au déperissement. Un résultat majeur est de démontrer que ces indicateurs permettent de quantifier de manière significative l'impact et la nuisibilité des facteurs biotiques, en premier lieu les maladies du bois, grâce à leur mise en relation avec le taux de réalisation du rendement (YAR).

Mots-clé : Indicateur, Déperissement, Rendement, Vigne.

ABSTRACT

French viticulture has been facing an estimated production decline of 5%, in average, per year for several years called "decline" (for "déperissement"). This scourge is defined in relation to a multi-year decrease in grapevine productivity and/or premature, sudden or progressive death of the vine stock due to many causal factors that are still poorly understood. This decline is the subject of in-depth studies at UMR SAVE, in particular the TraDéVi project (PNDV), aiming at analyzing this decrease in yield, partly due to biotic causes, including the major cryptogamic diseases and grapevine pests. The Grape Trunk Diseases (GTDs : Esca, Eutypiosis), first concerned, can lead to the death of the vine stocks, but are also monitored downy mildew, powdery mildew, grape berry moth, black rot and grey mould rot, which impact quality and yield. New indicators have been tested in order to better quantify this impact on yield, and to better establish relationships between multi-pathogens pressure, vegetative vigor and yield achievement (AIDB+, NDVI, YAR indicators, resp.). These indicators were analyzed on the basis of 2019 data in two regions, Cognac and Bordeaux. The two main indicators being of main interest and highlighted are (1) the AIDB+ multi-pathogens indicator and (2) the NDVI_{pass3-1} indicator relating to vigor loss due to dieback. A major result is to show that these indicators allowed us to quantify significantly the impact and harmfulness of GTDs on the grapevine and particularly on the yield achievement rate (YAR).

Keywords : Indicator, Decline, Trunk diseases (GTDs), Yield, Grapevine.