



HAL
open science

Optimisation de l'utilisation de la robotique, au sein d'un Château en appellation Saint-Emilion grand cru, par l'emploi de capteurs embarqués : cas du Château Fombrauge, Grand Cru Classé

Théo Chaumet

► To cite this version:

Théo Chaumet. Optimisation de l'utilisation de la robotique, au sein d'un Château en appellation Saint-Emilion grand cru, par l'emploi de capteurs embarqués : cas du Château Fombrauge, Grand Cru Classé. Informatique [cs]. 2024. dumas-04787806

HAL Id: dumas-04787806

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04787806v1>

Submitted on 18 Nov 2024

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

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

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES de
BORDEAUX AQUITAINE

1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex, France

M E M O I R E de fin d'études
Pour l'obtention du titre
D'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

**OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE LA
ROBOTIQUE, AU SEIN D'UN CHÂTEAU EN
APPELLATION SAINT-EMILION GRAND CRU, PAR
L'EMPLOI DE CAPTEURS EMBARQUÉS**

Cas du Château Fombrauge, Grand Cru Classé

CHAUMET, Théo

Spécialisation : Agro TIC (Technologies de l'Information et de la Communication)

Étude réalisée à : Château Fombrauge, 615 route des Baziliques, 33330 Saint-Christophe-des-Bardes



-2024-



THE FRENCH MINISTRY OF AGRICULTURE AND FOOD

NATIONAL SCHOOL of **AGRICULTURAL SCIENCES** and **ENGINEERING**,
BORDEAUX AQUITAINE

1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex, France

MASTER THESIS

Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of

Agricultural Engineer, Bordeaux Sciences Agro

OPTIMISING THE USE OF ROBOTICS AT A CHÂTEAU IN THE SAINT-EMILION GRAND CRU APPELLATION USING ON-BOARD SENSORS

Case study : Château Fombrauge, Grand Cru Classé

CHAUMET, Théo

Specialisation : Agro TIC (Technologies de l'Information et de la Communication)

Study completed at: Château Fombrauge, 615 route des Baziliques, 33330 Saint-Christophe-des-Bardes



-2024-



Remerciements

En avant-propos, je souhaite adresser des remerciements à toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de mon apprentissage et sans qui cette étude n'aurait pu être réalisée.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à M. Anthony Defives, Directeur Technique, et M. Emmanuel Massé, Chef de culture du Château Fombrauge autant pour leur accueil que pour m'avoir permis de réaliser mes trois années d'apprentissage dans un cadre très formateur. Je les remercie tout particulièrement pour leur aide précieuse lors de la rédaction de ce mémoire.

Je souhaite également adresser un remerciement chaleureux aux équipes de Fombrauge et notamment à M. Daugieras pour avoir partagé régulièrement son expérience et sa passion de la vigne. J'ai beaucoup appris à son contact.

Je remercie aussi les équipes techniques des entreprises Naïo Technologies, Chouette Vision et RVS, pour leur réactivité que ce soit sur les réparations terrains ou bien la restitution des résultats.

Un grand merci également aux équipes encadrantes de Bordeaux Sciences Agro et Montpellier SupAgro pour leurs apports théoriques et leur patience. Mon attention se porte tout particulièrement vers M. Lionel Bombrun pour sa disponibilité et ses retours constructifs, tout au long de ces trois années.

Je dédie aussi mes remerciements à mes parents pour leur aide logistique et leur soutien moral constant.

Enfin, un remerciement fraternel à mes camarades apprentis, qui m'ont donné l'opportunité de faire de magnifiques rencontres humaines et ont contribué à faire de ces trois années une source inépuisable de souvenirs et plaisirs épicuriens.

Résumé

On retrouve, depuis plusieurs années déjà, de nombreuses sociétés ayant développé des robots agricoles, particulièrement viticoles, qui ont pour but d'automatiser les travaux mécaniques, d'alléger le travail du vigneron et de gagner en précision dans les opérations à réaliser. C'est dans ce cadre-là que le Château Fombrauge, Grand Cru Classé en appellation Saint-Émilion Grand Cru, a participé au co-développement d'un robot viticole. A présent, la propriété souhaite accroître son utilisation, avec des capteurs embarqués, afin de répondre à de nouveaux enjeux.

Au cours de cette étude, le but sera de présenter le contexte de la viticulture française jusqu'à recentrer sur la propriété. Cette démarche permettra d'améliorer notre compréhension des besoins du Château Fombrauge. Par la suite, nous présenterons un état de l'art des technologies existantes en justifiant le choix des sociétés partenaires en accord avec le recueil des besoins du domaine. A posteriori, nous présenterons deux expérimentations réalisées sur l'exploitation, qui tenteront de répondre aux problématiques du Château Fombrauge. Pour cela nous utiliserons différents capteurs embarqués possédant chacun un type de fonctionnement ou des indices différents. En toute fin de cette étude nous énoncerons une synthèse du travail fourni sur la détection de maladies et de pieds improductifs.

Mots clefs : Viticulture française, Robot viticole, Capteurs embarqués, Détection de maladie fongique

Abstract

For several years now, numerous companies have been developing agricultural robots, particularly for viticulture, with the aim of automating mechanical tasks, reducing the workload of winemakers, and increasing precision in operations. It is within this context that Château Fombrauge, a Grand Cru Classé in the Saint-Émilion Grand Cru appellation, has participated in the co-development of a viticultural robot. The estate now aims to expand its use, incorporating onboard sensors to address new challenges.

In this study, the goal will be to present the context of French viticulture before focusing on the estate itself. This approach will help us better understand the needs of Château Fombrauge. Subsequently, we will provide a state-of-the-art review of existing technologies, justifying the selection of partner companies in line with the estate's requirements. After that, we will present two experiments conducted on the estate, which aim to address the challenges faced by Château Fombrauge. For this, we will use different onboard sensors, each with its own type of operation or different indicators. At the end of this study, we will provide a summary of the work carried out on the detection of diseases and unproductive vines.

Key words : French viticulture, Wine-growing robot, On-board sensors, Fungal disease detection

Table des Matières

REMERCIEMENTS

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

GLOSSAIRE

INTRODUCTION 1

PARTIE 1 - LE CHATEAU FOMBRAUGE : UNE ENTREPRISE QUI FAIT CONFIANCE AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES DANS SON VIGNOBLE POUR REpondre AUX ENJEUX 2

1 - LES DEFIS DE LA VITICULTURE MODERNE.....	2
A - Analyse globale de la production viticole mondiale.....	2
B - Implantation de la viticulture en France	2
C - Production du Saint Emilion : tradition et innovation	4
2 - LE CHATEAU FOMBRAUGE : UN ECOSYSTEME UNIQUE.....	5
A - Son environnement naturel.....	5
B - Des équipes qualifiées.....	9
C - Son parcellaire singulier	10
D - Un vin unique pour la meilleure qualité.....	11
E - Le Groupe Bernard Magrez : La dynamique du pôle Recherche et Développement	11
3 - DES PROBLEMATIQUES QUI FREINENT LE BON DEVELOPPEMENT DU VIGNOBLE	12
A - Le manque de main d'œuvre : vers une robotisation des propriétés ?	12
B - Connaître ses parcelles pour mieux agir	13
C - Un réel besoin pour le domaine	15

PARTIE 2 - ETAT DE L'ART DES INNOVATIONS NUMERIQUES DANS LE MONDE VITICOLE VISANT A DEVELOPPER L'AGRICULTURE DE PRECISION AU SEIN D'UNE EXPLOITATION 16

1 - LA ROBOTIQUE AU SERVICE DE LA VITICULTURE.....	16
A - Etats des lieux des technologies robotiques.....	16
B - Recueil de besoins de l'entreprise	17
C - Sélection stratégique de Naïo Technologies.....	20
2 - LES CAPTEURS EMBARQUES : EVOLUTION ET PERSPECTIVES	22
A - Etats des lieux des capteurs	22
B - Recueil et analyse des besoins spécifiques.....	23
C - Sélection des capteurs optiques	25
3 - LES UTILISATIONS ACTUELLES A FOMBRAUGE	28
A - Cartographie du parcellaire : vers une utilisation optimisée du robot.....	28
B - Un robot qui s'adapte à l'équipement.....	31

PARTIE 3 - DEPLOIEMENT DE DEUX NOUVEAUX SERVICES AU SEIN DU DOMAINE PERMETTANT DE CARTOGRAPHIER LA PRESSION SANITAIRE ET LES PIEDS IMPRODUCTIFS..... 33

1 - DETECTION DU MILDIU EN VITICULTURE	33
A - Présentation et impact du mildiou de la vigne.....	33
B - Importance de la maîtrise de la maladie pour les exploitations viticoles à Saint-Émilion.....	34
C - Mise en place de la méthodologie	34
D - Interprétation des résultats	37
2 - COMPTABILISATION ET GEOLOCALISATION DES PIEDS IMPRODUCTIFS	41
A - Détection des pieds manquants : stratégies et Importance.....	41

B - Mise en place de la méthodologie 42
C - Interprétation des résultats..... 45

DISCUSSIONS **48**

CONCLUSION **50**

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

Listes des illustrations

Tables des Figures

Figure 1 : Graphique de la production mondiale de vin de 2022 en comparaison à la moyenne de 2019-2021	2
Figure 2 : Évolution de la production viticole française	3
Figure 3 : Évolution par bassins viticoles de la production de vin en milliers d'hectolitres (2013-2021)	3
Figure 4 : Diagramme de répartition des principaux groupes de types de sol du Château Fombrauge	
Figure 5 : Évolution de la température moyenne (°C) - Données Libourne (Météo France)	8
Figure 6 : Graphique de la répartition des porte-greffes du vignoble du Château Fombrauge	10
Figure 7 : Pyramide des âges du parcellaire du Château Fombrauge en 2021	11

Tables des Images

Image 1 : Cartographie des sols de la Nouvelle-Aquitaine (B. Papion, 2024)	5
Image 2 : Cartographie des régions viticoles et de leur climat	6
Image 3 : Photographie de la V1 du TED, lors de son arrivé en 2018	21
Image 4 : Position de la caméra verticale de Chouette sur le TED	26
Image 5 : Position de la caméra latérale de Chouette sur le TED	27
Image 7 : Représentation de l'interface de l'application Naïo Maps	29
Image 6 : Béquille crée pour la prise de données cartographiques	29
Image 9 : Représentation d'un chemin de demi-tour sur EasyMapping	30
Image 8 : Représentation des zones de délestages sur EasyMapping	30
Image 11 : Prototype de lames intercepts Clemens sur le TED	31
Image 10 : Installation de disques émoteurs sur le TED	31
Image 12 : Symptômes foliaires, sur vigne, du mildiou (vignevin)	33
Image 13 : Photo capturée par la caméra verticale et analysée par l'IA de Chouette	35
Image 14 : Capteur actif du Projet VISA - Château Fombrauge	36
Image 15 : Photo accessible sur Chouette View pour le contrôle des tâches détectées sur le feuillage	37
Image 16 : Cartographie de la détection de taches symptomatiques - Château Fombrauge	37
Image 17 : Comparaison d'un pied en juin et juillet	39
Image 18 : Cartographie de la comparaison de vigueur entre les indices de Chouette et de RVS	40
Image 19 : Cartographie des pieds à complanter (droite) et la photo prise par la caméra verticale - Parcelle Devant Bureau	45
Image 20 : Visualisation de l'interface attendue par le château pour les résultats de PMM issus des capteurs Chouette	46

Tables des Schémas

Schéma 1 : Variation de la sensibilité du bourgeon à la température en fonction de son stade de développement.....	9
Schéma 2 : Représentation du protocole de prise de points par Naïo Technologies	28
Schéma 3 : Représentation des mesures permettant de catégoriser les "Entités" en fonction de celles autour.....	44

Tables des Tableaux

Tableau 1 : Proportion des différents vins constituant la production nationale (Milliers d'hectolitres)	4
Tableau 2 : Indicateurs climatiques de l'année 2023 - Données de Mérignac (Météo France)	7
Tableau 3 : Evolution des tâches détectées pour les parcelles robotisées.....	38
Tableau 4 : Comparaison de la détection de taches symptomatiques entre l'opérateur et le capteur de Chouette - Juin et Juillet 2024.....	38
Tableau 5 : Surfaces par zones de vigueur issues de RVS et Chouette	40
Tableau 6 : Pourcentage de gain économique de la géolocalisation des complants - Plateau 99 (2024)	47

Liste des abréviations

AOP : Appellation d'Origine Protégée

CDD : Contrat à Durée Déterminée

CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole

CVSE : Conseil des Vins de Saint-Émilion

DT : Directeur Technique

GPS : Global Positioning System

IA : Intelligence Artificielle

IFV : Institut Français de la Vigne et du Vin

IGP : Indication Géographique Protégée

ITK : Itinéraire Technique

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de Végétation Par Différence Normalisée)

ODG : Organisme de Défense et de Gestion

PMM : Pieds Morts et Manquants

PwC : Price Waterhouse Cooper

R&D : Recherche & Développement

RTK : Real-Time Kinematic

TESA : Titre Emploi Simplifié Agricole

UMT SEVEN : Unité Mixte Technologique - Santé des Ecosystèmes Viticoles Economes en intraNts

Glossaire

Agriculture de précision : Utilisation de technologies telles que les capteurs, le GPS, et les drones pour optimiser l'efficacité des cultures et minimiser l'impact environnemental.

Apex : Partie supérieure de la plante, notamment le bourgeon terminal ou le point de croissance principal de la tige.

Autonomie énergétique : Capacité d'un système ou d'un appareil à fonctionner de manière indépendante sans avoir besoin d'une recharge ou d'un apport d'énergie externe fréquent.

Caméras multispectrales : Caméras capables de capturer des images dans différentes longueurs d'onde de lumière, utilisées en agriculture pour analyser la santé des plantes, détecter le stress hydrique ou les maladies.

Caméras thermiques : Caméras qui capturent des images basées sur la température des objets, utilisées pour identifier les zones de stress hydrique ou les anomalies dans les cultures.

Capteur GreenSeeker : Dispositif de détection utilisé pour mesurer la santé et la vigueur des plantes en utilisant la réflexion de la lumière infrarouge et visible.

Capteur optique : Dispositif capable de détecter la lumière (visible ou non) et de transformer cette information en données exploitables, souvent utilisé pour surveiller la santé des plantes.

Codage Arduino : Programmation d'un microcontrôleur Arduino pour automatiser des tâches ou pour intégrer des capteurs et des actionneurs dans des projets d'agriculture de précision ou de robotique.

Code du travail : Ensemble de lois et de règlements régissant les relations de travail entre employeurs et employés, incluant des dispositions sur la sécurité et la santé au travail.

Complantation : Remplacement des pieds de vigne morts ou improductifs pour maintenir la densité et la productivité d'une parcelle viticole.

Encépagement : Répartition des cépages plantés dans un vignoble ; il définit la variété de raisin cultivée dans une parcelle de vigne.

Éocène : Période géologique de l'ère Cénozoïque, s'étendant de 56 à 34 millions d'années, caractérisée par un climat chaud et l'émergence de nombreux mammifères modernes.

France AgriMer : Établissement national des produits de l'agriculture et de la mer en France, chargé de la régulation, de la gestion et du soutien aux filières agricoles et de la pêche.

Géolocalisation : Détermination de la position géographique d'un objet ou d'une personne à l'aide de systèmes tels que le GPS.

Glyphosate : Herbicide non sélectif utilisé pour éliminer les mauvaises herbes; son utilisation est controversée en raison de préoccupations environnementales et de santé.

Intrants : Produits ou matériaux (comme les engrais, pesticides, eau) utilisés dans l'agriculture pour améliorer la croissance des cultures.

Mildiou : Maladie fongique affectant les vignes, causée par le champignon *Plasmopara viticola*, entraînant des dommages importants sur les feuilles et les grappes.

Oligocène : Période géologique de l'ère Cénozoïque, s'étendant de 34 à 23 millions d'années, marquée par des changements climatiques et géologiques significatifs.

Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) : Règlement de l'Union Européenne visant à protéger les données personnelles des citoyens et à encadrer leur traitement par les entreprises.

RTK (Real-Time Kinematic) : Technique qui améliore la précision des systèmes GPS, essentielle pour des applications de localisation nécessitant une haute précision.

Sol hydrophobe : Sol qui repousse l'eau, souvent en raison de conditions extrêmes ou de la dégradation de la structure du sol, ce qui empêche l'infiltration d'eau.

Stress hydrique : Condition dans laquelle les plantes ne reçoivent pas suffisamment d'eau, affectant leur croissance et leur productivité.

Surveillance phytosanitaire : Ensemble des activités et des technologies utilisées pour détecter et gérer les maladies et parasites affectant les cultures.

Système Selerys : Système de protection contre la grêle, utilisé en viticulture, qui repose sur des solutions technologiques avancées pour prévenir les dommages climatiques.

Viticulture : Ensemble des techniques et activités liées à la culture de la vigne et à la production de vin.

Introduction

Le domaine de la viticulture, élément essentiel de l'économie agricole française, fait face à une série de défis majeurs qui perturbent ses méthodes traditionnelles. Les producteurs sont contraints de revoir leurs méthodes et d'adopter des innovations technologiques en raison du changement climatique, de la main-d'œuvre limitée et des attentes croissantes en matière de durabilité et de qualité. La robotique viticole se présente peu à peu comme une solution prometteuse pour faire face à ces enjeux. Les robots, développés dans le but d'automatiser des tâches répétitives comme le désherbage ou la pulvérisation, peuvent améliorer la précision des interventions et réduire l'impact environnemental des vignobles. En utilisant des capteurs intelligents, ces progrès technologiques permettent aux viticulteurs d'utiliser des outils performants pour améliorer la gestion de leurs exploitations.

Dans ce contexte, le Château Fombrauge, situé en appellation Saint-Émilion Grand Cru, se distingue par son engagement à intégrer ces technologies de pointe au sein de son vignoble. En collaboration avec la société Naïo Technologies, le domaine a investi dans le robot TED, un enjambeur robotisé pour améliorer la gestion des parcelles et répondre aux contraintes agronomiques actuelles. La propriété est consciente des difficultés qu'elle a à relever, plusieurs expérimentations s'offrent à elle. L'ajout de capteurs embarqués, notamment les systèmes optiques développés par la société Chouette Vision, permet d'aller encore plus loin en matière de surveillance et de visualisation des maladies de la vigne, un des enjeux traités à court terme.

La problématique de ce mémoire s'articule autour de la question suivante : **en quoi l'ajout de capteurs embarqués sur le robot TED permettrait-il de développer la visualisation des maladies et d'optimiser la complantation du parcellaire ?** Pour répondre à cette question, ce travail est structuré en trois parties principales. Tout d'abord seront détaillés, le contexte de l'étude ainsi qu'une présentation du Château Fombrauge et ses défis. Par la suite, sera approfondi l'état des lieux des innovations numériques dans le monde viticole, avec un accent particulier sur la robotique et les capteurs embarqués. Pour finir, une analyse des nouveaux services technologiques au sein du domaine sera réalisée afin de répondre au mieux à la problématique.

Partie 1 - Le Château Fombrauge : une entreprise qui fait confiance aux nouvelles technologies dans son vignoble pour répondre aux enjeux

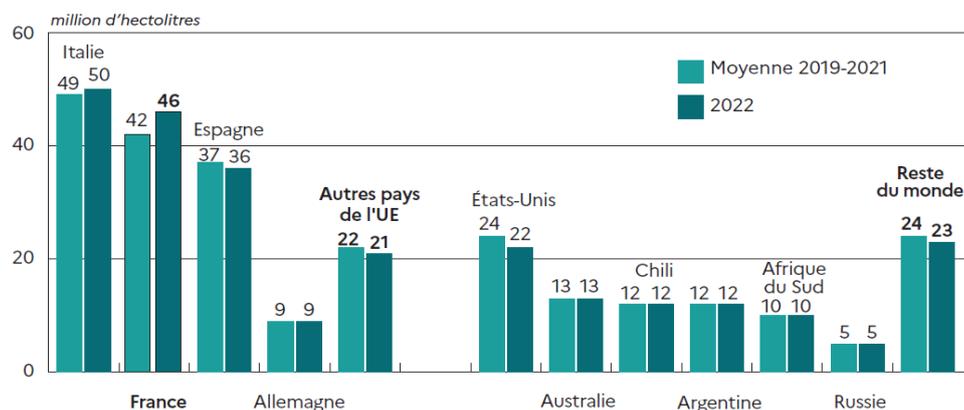
1 - Les défis de la viticulture moderne

A - Analyse globale de la production viticole mondiale

La viticulture mondiale est confrontée à une série de défis exacerbés par les changements climatiques, les fluctuations du marché mondial et l'évolution des habitudes de consommation. Les conditions météorologiques extrêmes telles que les vagues de chaleur, les sécheresses, les épisodes de gel, ainsi que les tempêtes de grêle, impactent directement la santé des vignobles et la qualité des récoltes. Ces phénomènes climatiques peuvent expliquer en partie la baisse de la production française.

Parallèlement, la concurrence internationale s'intensifie avec l'émergence de nouveaux acteurs sur le marché mondial du vin, augmentant la pression sur les producteurs traditionnels. De plus, les préférences des consommateurs évoluent, avec une demande croissante pour des vins durables, biologiques et de terroir. Les producteurs doivent donc adapter leurs pratiques viticoles et leurs stratégies de commercialisation pour rester pertinents. Ainsi, pour que la France puisse maintenir sa position compétitive face à l'Italie et l'Espagne, il est crucial d'**innover et de s'adapter aux nouvelles exigences du marché mondial du vin**.

Le graphique de la production mondiale de vin (cf. [Figure 1](#)) révèle une hausse de la production française, passant de 42 millions d'hectolitres en moyenne (2019-2021) à **46 millions en 2022**. En comparaison, l'Italie conserve sa position de leader avec 50 millions d'hectolitres, et l'Espagne suit avec 36 millions d'hectolitres. Ces fluctuations montrent bien la nécessité pour les producteurs français de s'adapter rapidement afin de faire face à la compétition croissante et aux impacts des changements climatiques.



Source : OIV, note conjoncturelle d'avril 2023 (2022 prévisionnel et 2021 provisoire)

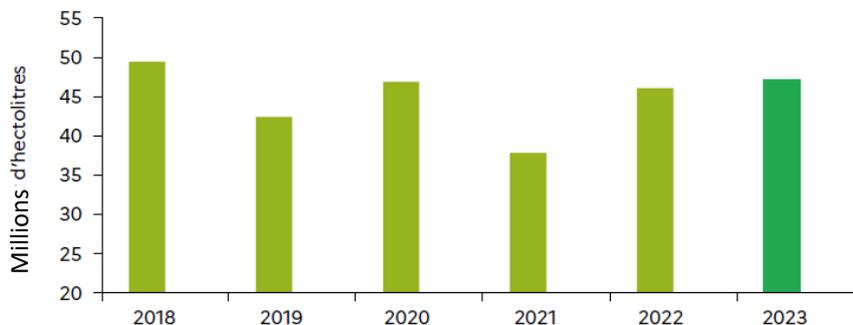
Figure 1 : Graphique de la production mondiale de vin de 2022 en comparaison à la moyenne de 2019-2021

B - Implantation de la viticulture en France

En France, pays au riche patrimoine viticole, l'industrie viticole est confrontée à des défis similaires, mais aussi à des enjeux spécifiques. La France est l'un des plus grands producteurs de vin au monde et bénéficie d'une réputation internationale pour la qualité de ses vins et de ses terroirs. Cependant, la viticulture française est confrontée à des défis tels que la pression concurrentielle des nouveaux acteurs sur le marché mondial, les réglementations strictes sur les pratiques viticoles, y compris les



normes environnementales et sanitaires, ainsi que les fluctuations du marché et les changements dans les habitudes de consommation. La carte illustrant l'orientation technico-économique des exploitations agricoles (OTEX) dominante par commune en France (cf. [Annexe 1](#)), et montre que la viticulture est particulièrement concentrée dans les régions de Bordeaux, de la vallée du Rhône, de la Bourgogne, de la Champagne et du Languedoc.



Source : douanes pour 2023, Agreste-Douanes pour années antérieures

Figure 2 : Évolution de la production viticole française

Malgré ces défis, la France continue de jouer un rôle central dans l'industrie viticole mondiale et cherche à maintenir sa position en promouvant l'innovation et la durabilité dans la viticulture. Le deuxième graphique fournit une vue d'ensemble de la production nationale viticole en millions d'hectolitres de 2018 à 2023 (cf. [Figure 2](#)). Après un pic en 2018, la production a connu une baisse jusqu'à l'année 2021 qui marque une chute significative, mais la tendance repart à la hausse en 2022 et 2023. Cette variabilité peut être attribuée à des conditions météorologiques défavorables, comme les gelées tardives et les sécheresses, ainsi qu'à des facteurs économiques et de marché.

On peut subdiviser la production nationale afin de visualiser le poids de chaque région viticole. On obtient ainsi un graphique qui présente l'évolution de la production de vin par bassin viticole en France, de 2013 à 2021 (cf. [Figure 3](#)). Il est clair que les régions du Languedoc-Roussillon, des

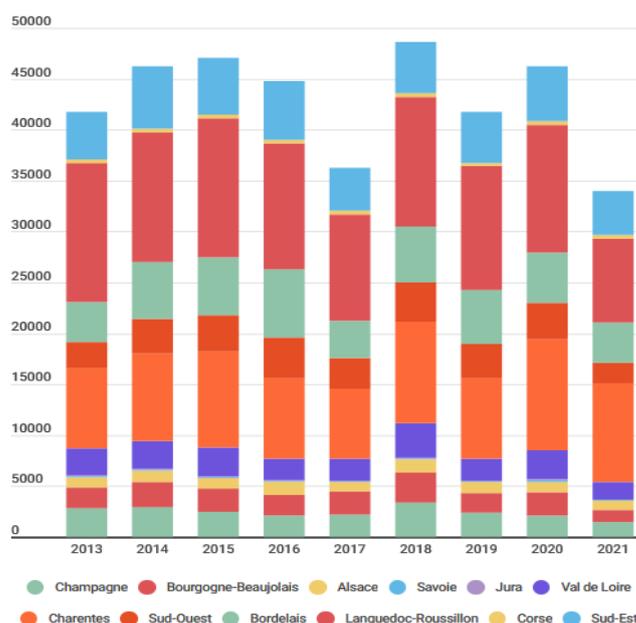


Figure 3 : Évolution par bassins viticoles de la production de vin en milliers d'hectolitres (2013-2021)

Charentes et de Bordeaux dominant la production. Cependant, il y a des fluctuations notables au fil des années, notamment une baisse significative en 2021.

La viticulture en France est fortement influencée par les conditions climatiques et pédologiques spécifiques de chaque région. **Les pratiques viticoles doivent constamment évoluer pour répondre aux défis de la durabilité et de la qualité de production.** Le développement de stratégies innovantes est crucial pour maintenir la compétitivité de la viticulture française face aux défis climatiques et économiques mondiaux (Biarnes et al., 2017). En plus des conditions naturelles, l'implantation de la viticulture est également façonnée par les politiques agricoles et les dynamiques économiques locales, qui jouent un rôle déterminant dans l'adoption des nouvelles technologies et des pratiques durables (Simonneau et al., 2014).

En parallèle des défis agronomiques et économiques que peut rencontrer la production viticole, il est important de commercialiser un produit qui sera attrayant pour les consommateurs. Selon FranceAgriMer, on observe depuis plusieurs décennies une baisse de consommation de vin sur l'entièreté des français. Par ailleurs, les chiffres montrent que les critères ont évolué. En effet, non seulement les acheteurs de vins en boivent moins, mais ils ont actuellement une préférence pour des vins moins chers mais où est notifié explicitement l'origine. Il va donc de soi que la proportion des AOP ET IGP soit importante dans l'ensemble des vins français (cf. [Tableau 1](#)).

Catégorie de vins	2023	2022	Moyenne 2018-2022	2023/2022 (%)	2023 / Moyenne 2018-2022 (%)
Vins AOP	19 427	19 597	19 327	- 1	1
Vins pour eaux-de-vie	12 699	10 299	9 652	23	32
Vins IGP	11 776	12 750	12 291	- 8	- 4
Autres vins (dont vins sans IG)	4 189	3 412	3 267	23	28
TOTAL VINS*	48 091	46 058	44 536	4	8

* Ces estimations portent sur les récoltes annuelles totales incluant les parties commercialisables et non commercialisables
Sources : DGDDI provisoire pour 2023, Agreste-DGDDI pour les années antérieures

[Tableau 1 : Proportion des différents vins constituant la production nationale \(Milliers d'hectolitres\)](#)

Au vu de ce tableau, on remarque une nette augmentation des quantités de vins dédiés aux spiritueux sur des marchés en hausse sans impacter pour autant de manière caractéristique la production des autres vins. Cela signifie que les producteurs veulent **répondre aux attentes des consommateurs** en assurant une **qualité** ainsi que le **respect des terroirs** dans l'essence même de leurs produits.

La production viticole française, loin d'être en crise, nécessite tout de même de se transformer afin de répondre aux différents enjeux évoqués. Pour cela, l'attachement au terroir et les nouvelles technologies doivent s'allier au sein des différentes appellations.

C - Production du Saint Emilion : tradition et innovation

Le Saint-Émilion, célèbre région viticole française, offre un exemple particulier de résilience face aux défis actuels. En tant qu'appellation prestigieuse, le Saint-Émilion bénéficie d'une forte demande sur les marchés internationaux et d'une reconnaissance pour la qualité de ses vins. Cependant, même si le Saint-Émilion est mieux positionné que certaines autres régions pour faire face aux défis tels que la concurrence mondiale et les fluctuations du marché, il n'est pas à l'abri des pressions externes telles que les changements climatiques et les réglementations environnementales. La région doit continuer à innover et à **s'adapter pour maintenir sa réputation et sa compétitivité sur le marché mondial du vin.**



La production de Saint-Émilion combine des techniques traditionnelles et des innovations modernes pour maintenir la qualité du vin tout en augmentant l'efficacité des processus viticoles. L'adoption de nouvelles technologies, comme les capteurs et les outils de gestion précise, permet d'optimiser les rendements et de surveiller les conditions de croissance en temps réel (Rochard, 2017). En effet, les vignobles de l'appellation sont de vrais supports d'innovations ; ceci s'explique principalement par **un procédé unique au monde**, celui d'actualiser le classement tous les 10 ans. Cette démarche incite les propriétés qui veulent améliorer ou conserver leur classement de constamment être à la pointe de la technologie et de répondre aux nouveaux objectifs. Ce classement étant un enjeu économique important pour les propriétaires pour qui il est nécessaire de conserver ce classement. C'est grâce à cela qu'on voit apparaître par exemple, des systèmes de protection anti-grêle collectif avec le système Selerys ou particulier comme le dispositif de Viti-Tunnel.

Ainsi, Saint-Émilion se positionne comme un modèle d'innovation dans le secteur viticole, illustrant comment tradition et modernité peuvent se combiner pour répondre aux exigences contemporaines. Les efforts continus pour **intégrer des technologies avancées** tout en respectant les méthodes viticoles traditionnelles permettent à la région de rester compétitive et de **maintenir la qualité qui fait sa renommée**. Ces pratiques innovantes montrent également la voie à suivre pour d'autres régions viticoles confrontées à des défis similaires, soulignant l'importance de l'adaptabilité et de la résilience dans un marché mondial en constante évolution.

2 - Le Château Fombrauge : un écosystème unique

A - Son environnement naturel

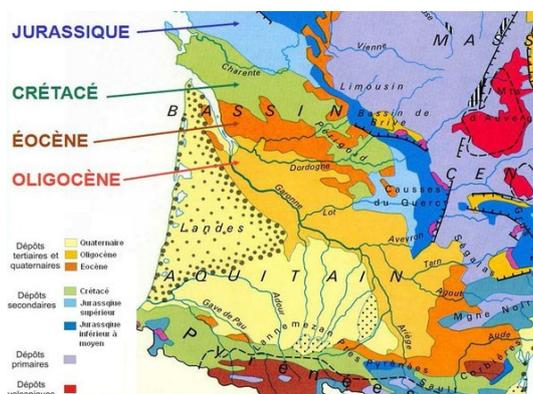


Image 1 : Cartographie des sols de la Nouvelle-Aquitaine (B. Papion, 2024)

Située à l'Est de la Gironde, l'entreprise viticole profite d'une zone géographique favorable à l'agriculture due à la bande argilo-calcaire datant de l'Oligocène et de l'Éocène (cf. [Image 1](#)).

A. 1 - Analyse pédologique et topologique

Le département de la Gironde, qui s'ancre dans un relief bas proche de celui du Bassin Aquitain, est constitué de roches sédimentaires d'origine marine. Le sol du vignoble bordelais est composé de graves dans la partie haute, graves argileuses au milieu, et sable de colluvionnement dans la partie basse. Ces variations pédologiques influencent fortement la qualité et les caractéristiques des vins produits (Papy, 1966).

La majeure partie de la surface de l'îlot attenant au château se situe à une altitude supérieure à **60 mètres** au-dessus du niveau de la mer. La partie du vignoble la plus haute se trouve à 90 mètres d'altitude. Pour la partie plus au Sud, la majeure partie se trouve à une altitude supérieure à 50m. Les



autres parcelles du vignoble s'étalent sur les côteaux où le point le plus bas se trouve à 20 mètres d'altitude. Les cartographies de [l'Annexe 2](#) présentent la topographie du vignoble et l'emplacement des nouvelles fosses pédologiques réalisées depuis 2015. De la formation la plus ancienne à la plus récente on retrouve : la molasse du Fronsadais, l'argile de Castillon, le calcaire à astéries, la molasse de l'Agenais (cf. [Annexe 3](#)). L'existence d'un tel dépôt a une importance réelle pour les sols viticoles, car elle explique l'absence de calcaire actif et la profondeur des sols qui en sont issus comme sur le plateau de Niord et sur le plateau autour du château. Sur le parcellaire du Château Fombrauge, on retrouve en grande majorité le **calcaire à Astéries et la molasse du Fronsadais**, appelés respectivement la roche mère dure et la roche mère tendre. Nous avons pu en conclure que finalement 7 groupes principaux et 2 plus marginaux sont obtenus, comme représentés sur le diagramme ci-dessous (cf. [Figure 4](#)). Cette diversité pédologique nécessite une gestion précise pour optimiser la production viticole, en utilisant des techniques adaptées à chaque type de sol pour maximiser le potentiel de chaque parcelle (Casteran et al., 1975).

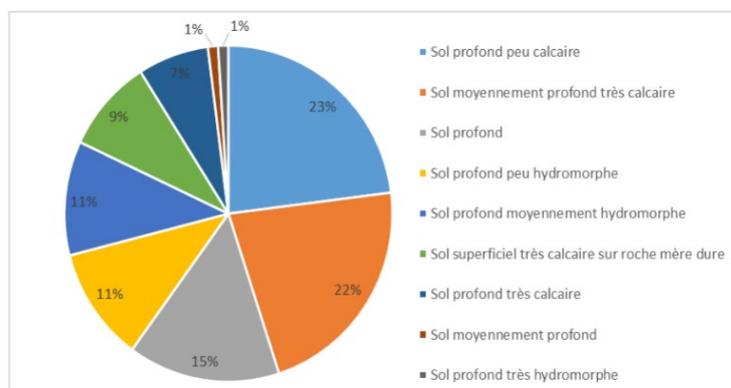
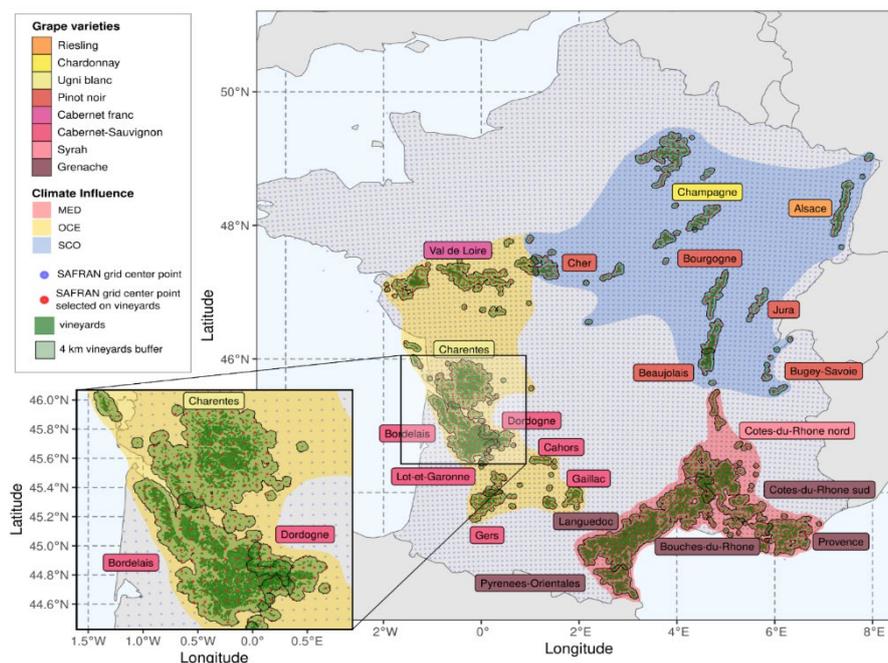


Figure 4 : Diagramme de répartition des principaux groupes de types de sol du Château Fombrauge

A. 2 - Conditions Climatiques

Après avoir discerné l'ensemble des caractéristiques pédologiques du Château Fombrauge, nous allons pouvoir visualiser l'impact qu'ont les événements climatiques sur sa production. Tout d'abord la cartographie suivante (cf. [Image 2](#)) nous permet de visualiser que l'appellation viticole s'ancre au sein du climat océanique (OCE) se caractérisant par des cépages Cabernet et Merlot.



Un climat océanique est caractérisé par des températures généralement douces toute l'année, avec des étés frais et des hivers modérés. Cette constance est due à l'influence de l'océan qui agit comme un **régulateur thermique**. Ce climat possède aussi une humidité relative élevée et des précipitations bien réparties tout au long de l'année. Ce qui favorise une végétation dense et des sols fertiles. Nous allons plus amplement détailler ces spécificités en prenant les données de Bordeaux-Mérignac ainsi que les données météo du domaine.

	Ensoleillement (h)		Pluviométrie (mm)		T°C moy. min (°C)		T°C. moy. max (°C)	
	2023	Moyenne 1991-2010	2023	Moyenne 1981-2010	2023	Moyenne 1981-2010	2023	Moyenne 1981-2010
Janvier	119	96	59	87	4,3	3,1	10,4	10,0
Février	168	115	53	71	2,3	3,3	12,7	11,7
Mars	87	170	87	65	7,4	5,4	16,4	15,1
Avril	204	182	58	78	8,7	7,4	18,8	17,3
Mai	264	217	54	80	12,3	11,0	23	21,2
Juin	247	239	102	62	17,1	14,1	27,9	24,5
Juillet	230	249	22	50	16,7	15,8	27,6	26,9
Août	245	241	34	56	17,3	15,7	28,6	27,1
Septembre	240	203	93	84	16,7	12,9	28,6	24,0
Octobre	176	147	188	93	12,7	10,4	23,6	19,4

Tableau 2 : Indicateurs climatiques de l'année 2023 - Données de Mérignac (Météo France)

A.2.a - La pluviométrie

On peut remarquer une diminution de la pluviométrie depuis les années 2000. Avec une majorité de pluie en automne et hiver, on recense une moyenne proche de **700mm de pluie annuelle** (cf. [Tableau 2](#)). Ce qui favorise certes la concentration des raisins mais diminue les capacités optimales de la vigne à produire. Sachant qu'un c moyen est important pour le raisin et pour le vin, on peut penser qu'il s'agit de conditions climatiques à risque si celles-ci tendent à diminuer encore. Cette pluviométrie en baisse, couplée à un déficit hydrique grandissant et une augmentation des températures, indique des prévisions de plus en plus préoccupantes qui doivent être prises en compte par tout agriculteur. En effet, un stress hydrique extrême peut entraîner une **diminution du taux de nouaison des baies** (Korkutal et al., 2019) ainsi que de leur taille et une augmentation de la concentration en anthocyanes, mais aussi une détérioration de la qualité globale du vin (Korkutal et al., 2011).

A l'échelle de l'exploitation (cf. [Annexe 4](#)), on remarque cependant des cumuls de pluies discordant avec les moyennes de Mérignac. En effet, ils sont supérieurs à la moyenne de 700mm lors de la fin de la décennie et ce cumul dépasse les 1100mm en 2023. Impacter par son microclimat, les cours d'eau ainsi que les reliefs.

Le Château observe un total de **981.2mm** pour ce millésime 2024, ce qui a nettement pénaliser les travaux mécaniques des sols.

A.2.b - Température moyenne saisonnière

L'analyse des données climatiques pour Libourne (cf. [Figure 5](#)) (cf. [Tableau 2](#)), révèle une tendance nette à l'augmentation des températures minimales, moyennes, et maximales au cours des dernières années. Cette hausse des températures, particulièrement marquée pour les maximales, est illustrée par les équations de tendance dans la **Figure 6**, qui montrent une progression continue des températures entre 2009 et 2023.

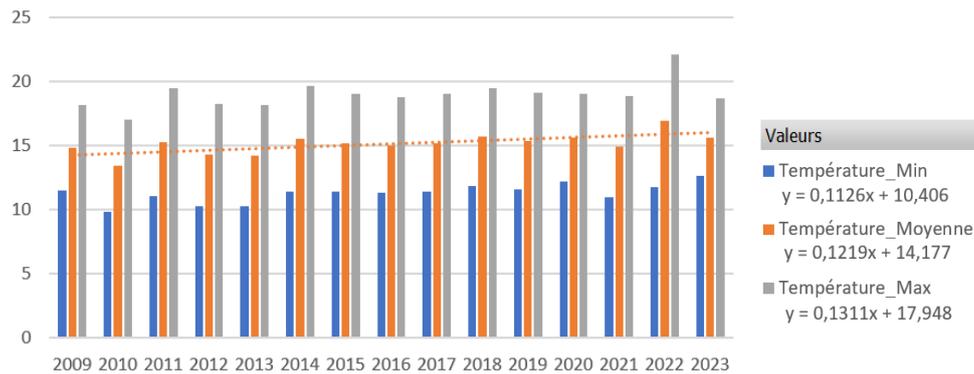


Figure 5 : Évolution de la température moyenne (°C) - Données Libourne (Météo France)

Le [Tableau 2](#) vient confirmer cette observation en comparant les températures de 2023 aux moyennes historiques de 1981 à 2010. On y constate que les températures minimales et maximales de 2023 sont systématiquement plus élevées que les moyennes sur chaque mois, avec des écarts particulièrement significatifs pendant les mois d'été, où les maximales de juillet et août 2023 dépassent les moyennes historiques. Tout cela concorde avec les données de l'exploitation (cf. [Annexe 4](#)), qui représente nettement une **hausse globale des températures** en toutes saisons.

Ces changements climatiques, tels que mis en évidence par l'analyse de ces données, affectent directement le cycle de croissance des vignes et la qualité des raisins récoltés, comme le souligne Rochard (2017). Pour faire face à ces variations climatiques, il devient impératif pour les viticulteurs d'adapter leurs pratiques, notamment par l'irrigation contrôlée et la **sélection de cépages plus résistants** à la chaleur (Biarnes et al., 2017). Ces ajustements sont essentiels non seulement pour maintenir la qualité et le rendement des vignobles, mais aussi pour garantir la pérennité de la production dans un contexte de réchauffement climatique accru (Drappier et al., 2019).

En somme, les données présentées illustrent de manière concrète l'impact du réchauffement climatique sur le microclimat de Libourne. Elles soulignent la nécessité d'une adaptation continue et proactive des pratiques viticoles pour répondre aux défis imposés par ces conditions climatiques changeantes.

Malgré des températures en hausse on peut observer la présence de température nulle ou négative qui peuvent avoir un impact sur la production viticole.

A.2.c - Le pourcentage de jours de gel

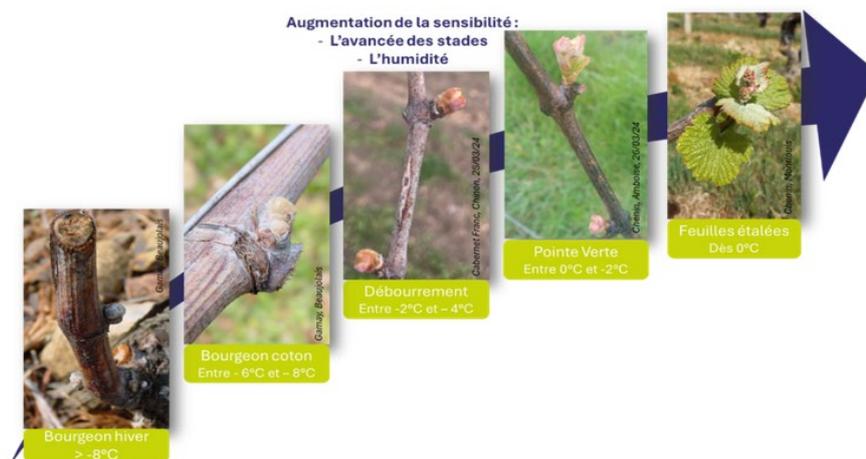
Les types de gel qui peuvent affecter les vignobles sont de deux types : le gel peut être radiatif ou advectif (cf. [Annexe 5](#)). Le premier se produit généralement en l'absence de couverture nuageuse et avec un gradient de température dans l'atmosphère. Pendant une nuit claire et calme, la chaleur du sol est irradiée vers le ciel, ce qui provoque un refroidissement rapide de l'air près du sol, pouvant entraîner du gel. Le gel advectif, quant à lui, est associé à un front d'air froid qui se déplace souvent du nord-est, apportant des températures plus basses. La couverture nuageuse est souvent présente dans ces conditions, mais l'air froid de l'extérieur peut causer un refroidissement rapide. Il est donc préférable dans ces conditions de disposer de systèmes de chauffage, comme des tours anti-gel, pour contrer l'effet de ce front froid et minimiser l'impact sur les vignes. Mais cette **gestion de la protection contre le gel** doit être **adaptée** au stade de développement des bourgeons : comme le montre le



schéma ci-dessous (cf. [Schéma 1](#)), plus le bourgeon avance dans son développement, plus il devient sensible aux basses températures.

On observe une tendance à la diminution des jours de gel entre les années 1987 et 2016, avec une réduction de 20 % depuis 1987 et de **30 % depuis 2005**. Le gel, bien qu'étant un événement naturel, peut engendrer des complications importantes pour le rendement viticole. S'il survient lorsque les plantes débutent leur croissance ou avant la floraison, il peut entraîner une perte significative des récoltes annuelles. Cependant, la diminution de ces gels est le reflet d'une variation des températures. Ce réchauffement progressif entraîne une avancée du débourrement, augmentant le risque de gel destructeur à un stade phénologique avancé (Rochard et al., 2019).

Les hivers à Bordeaux, généralement doux et humides en raison de l'influence atlantique, peuvent néanmoins être ponctués de gelées sévères qui endommagent gravement les vignes. Les données historiques montrent des fluctuations importantes, avec des hivers extrêmement froids causant des dégâts significatifs sur les vignobles (Papy, 1966). La gestion des risques climatiques, y compris les épisodes de gel, est donc essentielle pour assurer la pérennité de la production viticole dans la région (Simonneau et al., 2014). Ces stratégies de gestion sont d'autant plus cruciales dans un contexte où les événements climatiques extrêmes deviennent moins fréquents mais potentiellement plus imprévisibles ; « On pourrait voir apparaître des épisodes de gel après le débourrement qui seraient susceptibles de se produire dans un avenir proche et lointain » (Molitor et al., 2014)



[Schéma 1 : Variation de la sensibilité du bourgeon à la température en fonction de son stade de développement](#)

B - Des équipes qualifiées

Le domaine, dirigé par Mr. Defives, Directeur Technique (DT) et aussi directeur du Clos Haut-Peyraguey en Sauternes, comporte principalement (cf. [Annexe 6](#)) :

- ➔ Une équipe « Vigne » composée d'1 chef de culture, 3 tractoristes et 4 employés CDD,
- ➔ Une équipe « Chais » comprenant 1 maître de chai, une adjointe et 1 employé.

Pour ma part, au cours du projet d'ingénieur et de ces trois années, j'ai été employé à faire le lien avec le pôle R&D du groupe. En effet, je me suis concentré sur les **projets d'innovation exclusivement viticoles**, tout en réalisant les missions courantes du château, telles que de la traçabilité ou du machinisme agricole.

C - Son parcellaire singulier

Le Château Fombrauge se situe au cœur de l'appellation de Saint-Emilion. Les 59.9638 Ha plantés en vigne en font l'une des exploitations les plus vastes de l'appellation. Le vignoble est réparti sur trois communes de l'appellation Saint-Emilion Grand Cru : Saint-Christophe-des-Bardes, Saint-Etienne-de-Lisse et Saint-Hippolyte. Le vignoble est divisé en 2 ilots éloignés d'environ 2 kms à vol d'oiseau.

C. 1 - Un encépagement dominé par le Merlot

Sur le parcellaire, le Merlot représente **90 % de la superficie plantée**, tandis que les 10 % restants sont plantés en Cabernet franc. Cette prédominance du Merlot peut paraître « écrasante », mais elle ne signifie pas pour autant une uniformité dans les vins produits. La mosaïque de sols et d'expositions au sein du vignoble permet d'obtenir des expressions très variées de ce cépage.

Le Merlot est le cépage dominant dans le vignoble bordelais, en particulier à Saint-Émilion. Il est apprécié pour sa capacité à produire des vins riches et fruités, adaptés aux conditions pédologiques et climatiques de la région (Casteran et al., 1975). La domination du Merlot permet également une certaine homogénéité dans la production, facilitant ainsi la gestion des vignobles et la commercialisation des vins (Papy, 1966).

Cependant, dans le but de diversifier davantage les expressions du terroir, une restructuration importante du vignoble a été entreprise depuis 2012 au Château Fombrauge. Grâce à des audits de plantation, la surface dédiée au Cabernet franc a été progressivement augmentée, passant de **7 % en 2016 à 10 % aujourd'hui** (cf. [Annexe 7](#)). Cette stratégie vise à enrichir encore plus la complexité des vins produits, en intégrant davantage ce cépage qui apporte structure et fraîcheur au vin, tout en maintenant l'équilibre et l'harmonie caractéristiques des grands vins de Saint-Émilion.

C. 2 - Des porte-greffes adaptés

Levier important de l'adaptation du matériel végétal au sol, l'ensemble des porte-greffes du vignoble, ainsi que leur pourcentage d'occupation sont représentés ci-dessous (cf. [Figure 6](#)).

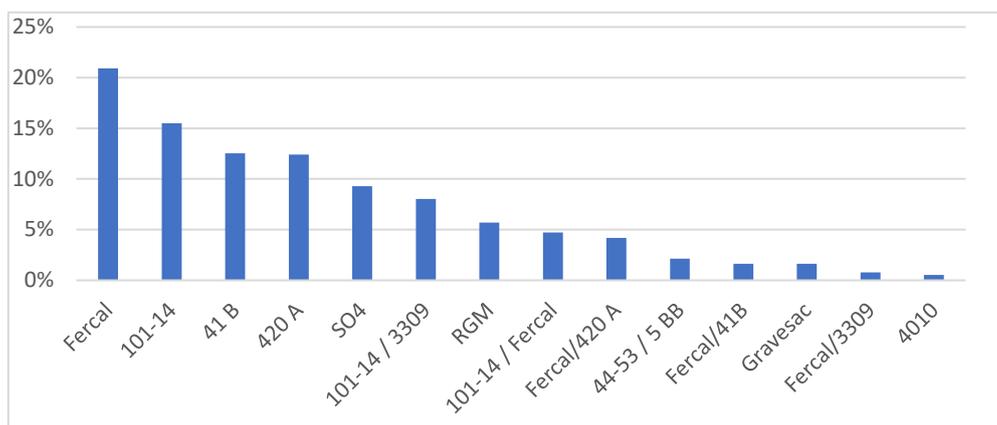
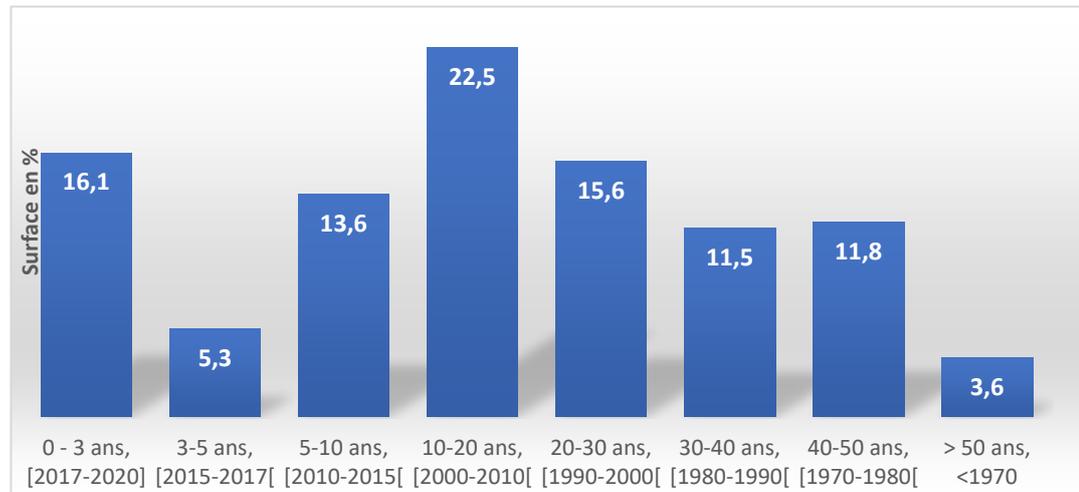


Figure 6 : Graphique de la répartition des porte-greffes du vignoble du Château Fombrauge

Le **Fercal est plus fortement représenté (21%)**, présent sur les nombreux sols calcaires de la propriété, avec le 420 A et le 41 B. Le 101-14 MGT arrive au second rang, ce qui est en adéquation avec une proportion élevée de sols profonds, et peu ou pas calcaire. Nous pouvons noter une part non négligeable de SO4 (porte-greffe conférant une vigueur forte). Cependant, ce sont des vieilles parcelles dont l'âge permet d'aboutir à une vigueur satisfaisante.

Initiée par la restructuration des parcelles en 2012, la distribution des âges est centrée autour de la classe 10-20 ans (plus de 20 % des parcelles) ce qui reflète un vignoble relativement jeune et avec un fort potentiel de production et de qualité. **L'âge moyen du vignoble est de 18 ans** (cf. [Figure 7](#)).



[Figure 7 : Pyramide des âges du parcellaire du Château Fombrauge en 2021](#)

Nous pouvons remarquer que **20 %** du vignoble a été **restructuré** depuis 2014 afin d'adapter les parcelles en adéquation avec les sols de la propriété.

D - Un vin unique pour la meilleure qualité

Le château produit des vins rouges réputés pour leur profondeur, leur complexité et leur capacité à vieillir gracieusement. Le vignoble s'étend sur un vaste terroir avec une diversité de sols qui contribue à la complexité de ses vins. Le vin de Château Fombrauge est issu de cépages Merlot et Cabernet Franc, reflétant l'**expression unique de leur terroir**.

Sous la direction des équipes de Bernard Magrez, Château Fombrauge combine habilement **tradition et innovation**. Le domaine a intégré des technologies de pointe dans ses pratiques viticoles et vinicoles, tout en respectant les méthodes traditionnelles qui font la réputation des vins de Bordeaux. L'objectif est de produire des vins qui reflètent à la fois le caractère unique de leur terroir et l'**excellence de leur savoir-faire**.

Le Château Fombrauge jouit d'une reconnaissance internationale pour la qualité de son vin. C'est en effet à la suite du rachat de la propriété en **1999 par Bernard Magrez** que le château obtient en 2012 pour la première fois la nomination de « **Grand Cru Classé** » au classement de cette même année. La nouvelle option de ce titre au classement 2022 témoigne de la qualité exceptionnelle et de la constance de ses vins. Bernard Magrez et Château Fombrauge incarnent, de ce fait, l'excellence de la viticulture bordelaise, alliant tradition viticole séculaire et innovations pour continuer à produire des vins d'exception reconnus mondialement.

E - Le Groupe Bernard Magrez : La dynamique du pôle Recherche et Développement

Bernard Magrez est une figure emblématique du monde viticole français, connu pour être un propriétaire et un négociant de vins de **grande renommée**. Il possède un vaste portefeuille de vignobles non seulement en France mais aussi dans d'autres parties du monde (Chili, Japon...).

Le Groupe Bernard Magrez, est synonyme de qualité et d'excellence dans la production de vins, avec un accent particulier sur les vins de Bordeaux. Bernard Magrez est reconnu pour son approche



innovante et son engagement envers l'excellence, cherchant constamment à améliorer la qualité de ses vins à travers des **investissements significatifs** dans la technologie et le terroir.

C'est en 2014, que le pôle R&D est né avec l'arrivée des drones au sein des domaines du groupe. Il a été créé afin de développer les nouvelles technologies et c'est dans ce sens qu'on a pu associer le projet « **Bordeaux 2050** » au château La Tour Carnet, et en parallèle la robotique au château Fombrauge dès 2018. Ayant toujours eu la volonté de promouvoir les avancées techniques dédiées à la viticulture, ce pôle R&D fut les prémices de l'**Incubateur Bernard Magrez** qui actuellement permet à de nombreuses start-ups d'être accompagnées dans leur développement et leur expérimentation.

3 - Des problématiques qui freinent le bon développement du vignoble

A - Le manque de main d'œuvre : vers une robotisation des propriétés ?

La robotique agricole englobe l'utilisation de robots pour automatiser les tâches agricoles telles que la plantation, l'irrigation, la récolte, et la lutte contre les nuisibles. L'objectif est de **réduire la dépendance à la main-d'œuvre, d'augmenter la productivité** et de **minimiser l'impact environnemental**.

- **Drones agricoles** : Utilisés pour la cartographie des champs, la surveillance des cultures et l'application précise de pesticides. Selon un rapport de PwC, le marché potentiel des applications drone en agriculture pourrait atteindre 32,4 milliards de dollars.
- **Robots de désherbage** : Des entreprises comme Naïo Technologies et EcoRobotix développent des robots capables de désherber de manière autonome, réduisant ainsi le besoin d'herbicides chimiques.
- **Robots de récolte** : Des robots comme ceux développés par Harvest CROO Robotics et Agrobot sont capables de récolter des fruits et des légumes, utilisant l'intelligence artificielle pour identifier la maturité des produits.

A. 1 - Robotique en viticulture

L'introduction de la robotique dans la viticulture révolutionne les pratiques agricoles, offrant de nombreux avantages tels que la réduction du temps de travail, la réduction de la pénibilité des tâches et une exposition réduite des agriculteurs aux produits phytosanitaires. Les robots permettent aux viticulteurs de se **focaliser** sur des activités à plus grande **valeur ajoutée** en réalisant des tâches répétitives et laborieuses avec une grande précision (Simonneau et al., 2014). En outre, grâce à l'incorporation de technologies de pointe, ces robots ont la capacité de recueillir des informations en temps réel, ce qui facilite la prise de décision et l'amélioration des opérations (Biarnes et al., 2017).

Toutefois, même si les bénéfices de la robotique viticole sont clairs, ce domaine est encore en **plein essor** et de nombreux défis demeurent pour les fabricants. Lors de la 4ème édition du Forum International de la Robotique Agricole (FIRA), de nombreux acteurs du secteur se sont rassemblés pour favoriser une approche collective. Des personnalités telles que David Frabotta de Meister Media, Cédric Bache de Vitibot et Thierry Bidaut de Pernod Ricard ont partagé leur point de vue sur la robotique dans le secteur viticole, abordant les obstacles à surmonter, l'évolution du secteur et les modèles économiques à envisager pour une adoption plus large de ces technologies.

A. 2 - Défis de l'attractivité du secteur

L'une des principales motivations de l'adoption de la robotique en viticulture est le **manque de main-d'œuvre qualifiée** pour la tractorisation. Le recrutement d'opérateurs est compliqué en raison des



tâches agricoles, souvent peu attrayantes et physiquement exigeantes. Les exploitants sont libérés de ces tâches laborieuses et chronophages grâce aux robots.

De plus, les nouvelles méthodes agricoles plus écologiques, telles que l'élimination du glyphosate, remettent en avant les opérations manuelles de désherbage. De cette manière, les robots contribuent à diminuer l'usage des pesticides tout en préservant les opérateurs des produits chimiques.

A. 3 - Des robots pour combler ce manque

Selon Fabien ARIGNON, les robots offrent une précision et une répétabilité en économisant du temps et des pesticides, lesquelles entraînent de facto des avantages économiques. Parallèlement Thierry Bidaut de Pernod Ricard énonce que la robotique représente une solution durable aux défis du secteur, justifiant l'intérêt d'un partenariat avec des startups comme la société Vitibot afin de **rendre la production plus respectueuse de l'environnement**.

Néanmoins, malgré ces bénéfices, les robots sont parfois mal accueillis par le grand public, car ils donnent à s'interroger sur leur intégration dans l'exploitation. Selon Cédric BACHE, les terrains escarpés ou sinueux présentent des difficultés supplémentaires et requièrent une adaptation spécifique des robots. Les robots autonomes doivent également faire face à divers défis, tels que l'environnement, la sécurité et l'économie. L'analyse de données et la formation des opérateurs sont devenues des tâches essentielles, lesquelles demandent un soutien et un accompagnement constants de la part des fabricants. Dans le futur, l'objectif est de **combinaison l'expertise humaine** avec la **capacité de travail diversifiée** des robots. Vitibot prévoit d'inclure de nouvelles fonctionnalités comme la pulvérisation afin de satisfaire les exigences évolutives des agriculteurs.

Finalement, différents schémas économiques apparaissent, allant de la vente directe à la collaboration avec des distributeurs ou des acteurs déjà implantés. Les [coopératives agricoles](#) (CUMA) proposent aussi une possibilité de diminuer les dépenses et de standardiser les traitements, ce qui favorise une utilisation plus étendue de la robotique agricole.

B - Connaître ses parcelles pour mieux agir

B. 1 - L'agriculture de précision : plus qu'une nécessité

L'**agriculture de précision** est devenue **indispensable dans la viticulture moderne** en raison des nombreux défis auxquels les viticulteurs doivent faire face, notamment les variations climatiques, les maladies et les pressions économiques. Cette approche utilise des technologies avancées pour surveiller et gérer les cultures à un niveau de détail sans précédent. Parmi les principales technologies utilisées, on trouve les systèmes GPS, les drones, les capteurs intelligents et les logiciels de gestion des données. Ces outils permettent une gestion plus fine et réactive des vignobles, essentielle pour optimiser les rendements. Par exemple, la variabilité intra-parcellaire peut être gérée en ajustant les apports d'eau et de nutriments en fonction des besoins spécifiques des différentes zones du vignoble, pour assurer une croissance homogène et des récoltes de meilleure qualité (Bellvert et al. 2021).

Les innovations technologiques, telles que les capteurs intelligents et les systèmes de surveillance automatisés, sont essentielles pour maintenir la viabilité et la compétitivité des vignobles (Ilknur Korkutal et al., 2019). Un autre avantage majeur de l'agriculture de précision est la réduction des intrants. Grâce à des capteurs et des systèmes de surveillance, les viticulteurs peuvent appliquer des engrais et des pesticides de manière plus ciblée, réduisant non seulement les coûts, mais aussi l'impact environnemental des pratiques viticoles. La gestion de l'eau est également optimisée par



l'utilisation de capteurs d'humidité du sol et de systèmes d'irrigation intelligents, essentiels dans les régions sujettes à des périodes de sécheresse ou des restrictions d'eau (Ferro, Catania 2023). Ces outils contribuent à une **gestion plus durable et rentable des vignobles**, renforçant ainsi la **compétitivité** des exploitations viticoles **face aux défis contemporains**.

B. 2 - Les capteurs au service de la production viticole

Les capteurs jouent un rôle crucial dans la production viticole moderne en fournissant des données précises et en temps réel sur l'état des vignes, le sol, et les conditions climatiques. Ces données permettent aux viticulteurs de prendre des **décisions informées et d'optimiser leurs pratiques** de gestion des vignobles. Les capteurs de sol, par exemple, mesurent l'humidité, la température et la composition chimique du sol, fournissant des **informations essentielles** pour la gestion de l'irrigation et la fertilisation. Par exemple, les capteurs de la société Decagon Devices peuvent mesurer l'humidité du sol à différentes profondeurs, permettant une irrigation précise et ciblée, crucial pour maintenir une bonne santé des vignes et maximiser les rendements (Ferro, Catania 2023)(Poblete-Echeverría, Tardaguila 2022).

Les capteurs climatiques, intégrés dans des stations météorologiques, fournissent des données sur la température, l'humidité, les précipitations et la vitesse du vent. Ces informations sont indispensables pour **anticiper les conditions** météorologiques et ajuster les pratiques de gestion en conséquence, afin de protéger les cultures contre les conditions extrêmes et de planifier les interventions en temps opportun(Fuentes, Tongson, Gonzalez Viejo 2023).

Des capteurs de vigne optiques, comme ceux développés par Chouette Vision, utilisent la vision par ordinateur et l'intelligence artificielle pour détecter les maladies de la vigne. Ces capteurs analysent les images des vignes et identifient les problèmes de manière précoce, ce qui permet une intervention rapide et ciblée pour **prévenir la propagation des maladies** (Poblete-Echeverría, Tardaguila 2022).

De plus, l'utilisation de capteurs embarqués sur des robots viticoles, comme le robot TED de la société NAÏO Technologie, rend possible une **surveillance continue et détaillée** des parcelles, facilitant la détection précoce des maladies et la gestion précise de l'irrigation et de la fertilisation (Simonneau et al., 2014).

Les drones équipés de caméras multispectrales et thermiques survolent les vignobles et fournissent des images détaillées de l'état des vignes. Ces images peuvent être analysées pour détecter des zones de stress hydrique, des infections de maladies et des variations de vigueur, justifiant une intervention rapide et ciblée. L'utilisation de drones et d'imagerie aérienne offre ainsi une vue d'ensemble précise et complète des vignobles, améliorant l'**efficacité des interventions** et la **gestion globale des cultures** (Fuentes, Tongson, Gonzalez Viejo 2023).

L'intégration de l'intelligence artificielle et de **l'automatisation** dans la production de Saint-Émilion permet une gestion plus précise et efficace des vignobles. Ces technologies contribuent à optimiser la qualité du vin en surveillant en temps réel les conditions de croissance et en ajustant les pratiques viticoles en conséquence (Michael Meier et al., 2018). En conclusion, l'intégration de ces technologies dans la viticulture moderne permet non seulement d'améliorer la qualité et le rendement des vignobles, mais aussi de répondre aux défis posés par les conditions climatiques changeantes et les pressions économiques.

C - Un réel besoin pour le domaine

La robotisation et l'utilisation des capteurs répondent à un besoin réel du domaine viticole, permettant de maintenir la compétitivité face aux défis actuels. **Un des principaux défis est l'adaptation aux conditions climatiques.** Les changements climatiques posent des défis importants pour la viticulture, y compris des variations extrêmes de température, des périodes de sécheresse et des événements météorologiques sévères. Les technologies de précision permettent aux viticulteurs de **surveiller et de réagir rapidement** à ces conditions, assurant ainsi la santé et la productivité des vignes. Par exemple, des capteurs climatiques avancés peuvent fournir des données en temps réel, légitimant des ajustements immédiats des pratiques agricoles pour protéger les vignes des conditions défavorables.

En plus de l'adaptation aux conditions climatiques, la robotisation des tâches viticoles réduit la dépendance à la main-d'œuvre, qui peut être coûteuse et difficile à trouver. La robotisation permet d'automatiser des tâches telles que la pulvérisation et le désherbage. Les robots comme le TED de Naio Technologies sont conçus pour effectuer ces travaux de manière autonome, augmentant l'efficacité et réduisant les coûts. Cette automatisation contribue également à l'amélioration de la qualité des raisins produits. En améliorant la qualité d'analyse pour une gestion plus précise et réactive des vignobles, ces technologies assurent que les vignes **reçoivent exactement** ce dont elles ont besoin, **au bon moment**, maximisant ainsi la qualité des fruits.

Enfin, en optimisant les rendements et en réduisant les coûts de production, les viticulteurs peuvent maintenir et même améliorer leur compétitivité sur le marché. Les vins de haute qualité produits avec l'aide de technologies de précision sont plus susceptibles de **recevoir des certifications** et des récompenses, renforçant ainsi leur position sur les marchés internationaux.

L'étude bibliographique a démontré l'importance, pour un viticulteur, de contrôler sa culture. Dans une volonté de marche en avant et de continuelle amélioration à propos de ce vaste sujet, le Château Fombrauge recherche une solution innovante pour répondre à la problématique suivante :

En quoi l'ajout de capteurs embarqués sur le robot TED permettrait de développer la visualisation des maladies et d'optimiser la complantation du parcellaire ?

Synthèse de la Partie 1

- La baisse des rendements nationaux et du Bordelais, ainsi que la croissance des concurrents étrangers poussent les producteurs français à innover.
- Les aléas climatiques néfastes à la production de raisins sont en hausse.
- La propriété conserve un outil de production performant, permettant le maintien du classement de son vin.
- Le Château explore la robotisation pour optimiser sa production.
- Il imagine également la possibilité d'expérimenter les capteurs embarqués pour accentuer son agriculture de précision.

Partie 2 - Etat de l'art des innovations numériques dans le monde viticole visant à développer l'agriculture de précision au sein d'une exploitation

Le monde viticole, fort de ses nombreuses problématiques, est un terrain propice aux innovations. Nous allons voir dans cette partie les détails de deux innovations cruciales en viticulture, premièrement la robotique puis les capteurs embarqués ; nous prendrons soin d'analyser l'intérêt pour le Château Fombrauge de participer au développement de ces technologies.

1 - La Robotique au service de la viticulture

A - Etats des lieux des technologies robotiques

La robotique en viticulture aborde plusieurs défis spécifiques liés à l'environnement unique et exigeant des vignobles. Les problématiques principales comprennent l'adhérence des robots sur les pentes, leur autonomie électrique, et les interactions sécuritaires avec les humains. Parallèlement, l'intégration de ces technologies s'inscrit dans le cadre plus large de l'agriculture de précision, visant une optimisation de la **répétabilité du travail** et un gain de temps significatif pour les propriétaires de vignobles.

A. 1 - Adhérence et performance sur terrains escarpés

Les vignobles sont souvent situés sur des terrains pentus, ce qui représente un défi majeur pour la robotique. L'adhérence et la capacité à se déplacer efficacement sur ces **terrains irréguliers** sont cruciales. Des solutions techniques incluent l'utilisation de chenilles plutôt que de roues traditionnelles, offrant une meilleure adhérence. Des systèmes de suspension et de contrôle avancés permettent également aux robots de **s'adapter dynamiquement** au terrain, réduisant le risque de renversement et assurant une couverture complète du vignoble.

A. 2 - Géolocalisation et cartographie des parcelles

Il n'est pas envisageable d'arriver dans une parcelle et passer directement un outil robotique. Afin qu'un robot puisse arpenter les rangs d'une parcelle, il est nécessaire que celle-ci soit **cartographiée numériquement**, en tenant compte de toutes ses particularités (courbures sur certains rangs, tournières particulières ou murs à éviter) mais aussi les usages de la société : les unes prennent seulement les amarres, d'autres les rangs entiers. Plusieurs tentent d'innover avec une cartographie faite à l'aide de drones.

A. 3 - Autonomie énergétique et défis associés

L'autonomie électrique est un autre enjeu majeur, les vignobles s'étendant souvent sur de vastes superficies. Les robots doivent avoir une **capacité de batterie suffisante** pour accomplir leurs tâches sans nécessiter de recharges fréquentes. L'intégration de panneaux solaires et le développement de batteries à haute densité énergétique sont des pistes explorées pour prolonger l'autonomie des robots. Par ailleurs, la **planification intelligente des itinéraires** et la gestion énergétique optimisée par IA peuvent contribuer à une utilisation plus efficace de l'énergie.

A. 4 - Interactions et sécurité avec les travailleurs humains

La cohabitation des robots et des travailleurs humains dans les vignobles soulève des questions de sécurité. Des systèmes de **détection avancés**, tels que les lidars et les capteurs ultrasoniques, sont intégrés pour permettre aux robots de détecter les humains (et les animaux) à proximité et d'ajuster

leur trajectoire ou de s'arrêter pour éviter les collisions. La **formation des travailleurs** à la coexistence sécuritaire avec les robots est également essentielle.

A. 5 - Contribution à l'agriculture de précision

L'agriculture de précision en viticulture vise à maximiser la qualité et le rendement des vignes tout en **minimisant les intrants** et l'impact sur l'environnement. Les robots, équipés de capteurs, collectent des données détaillées sur la santé des plantes, l'humidité du sol, et les besoins nutritionnels, permettant des interventions ciblées et personnalisées.

A. 6 - Répétabilité du travail

La capacité des robots à exécuter des tâches avec précision et répétabilité est un avantage majeur. Contrairement aux humains, qui peuvent être influencés par la fatigue ou d'autres facteurs, les robots assurent une **qualité de travail constante**, que ce soit pour la taille, le traitement des maladies, ou la surveillance des cultures.

A. 7 - Optimisation du temps et productivité

Pour les propriétaires de vignobles, l'adoption de la robotique peut se traduire par un gain de temps considérable. Les tâches automatisées permettent une gestion plus efficace du vignoble, libérant du temps pour se concentrer sur des aspects stratégiques de l'exploitation.

En résumé, la robotique en viticulture apporte des solutions innovantes aux défis traditionnels de ce secteur, tout en s'inscrivant dans une démarche d'agriculture de précision. Bien que les défis technologiques et économiques demeurent, les **avantages** potentiels en termes de répétabilité du travail, d'efficacité, et de durabilité sont **considérables**, promettant une transformation significative de la viticulture traditionnelle.

A. 8 - Présentation des Robots Existants

L'innovation technologique dans le secteur viticole a conduit à l'émergence de divers robots conçus pour automatiser et optimiser **différentes tâches** dans les vignobles. Ces robots (cf. [Annexe 8](#)), adaptés aux spécificités et aux contraintes des travaux viticoles, se répartissent en plusieurs catégories selon leurs fonctions principales : pulvérisation, désherbage, travail du sol, multifonctions et transport.

Ces robots innovants représentent une avancée significative dans la gestion des vignobles, offrant des solutions variées pour améliorer l'efficacité, la durabilité et la productivité des exploitations viticoles. En intégrant ces technologies, les viticulteurs peuvent répondre aux défis modernes tout en optimisant leurs opérations.

B - Recueil de besoins de l'entreprise

Comme dans toute acquisition, il est primordial de relever la pertinence de son achat et d'analyser les besoins auxquels va répondre notre investissement. Dans le cas actuel, le choix d'un robot s'est vu attribuer en raison plusieurs facteurs.

L'ensemble des éléments concernant le domaine a été réalisé sous plusieurs formes :

Premièrement un **entretien semi-directif** de 45min, réalisé de façon séparée avec le DT puis le chef de culture afin d'obtenir un maximum d'informations et de les regrouper. Dans un second temps, des besoins plus « de terrain » ont pu être recueillis avec des **échanges informels** auprès des tractoristes et ouvriers viticoles qui ont un autre regard sur le parcellaire.

Fort des 3 ans d'apprentissage au sein du château, il a été possible de visualiser les problématiques et nécessité d'acquérir un robot viticole.

Il est important de savoir que malgré l'importance des besoins du château, cette acquisition du robot a été **soutenu par le pôle R&D**, comme expliqué dans la partie 1 (cf. [Groupe Bernard Magrez](#)), qui a pour vocation d'être à la pointe de la technologie et de développer les partenariats avec des Start-Up innovantes tel que Naïo Technologies en 2018.

B. 1 - Besoins techniques

Après avoir consulté le personnel de l'établissement on remarque plusieurs besoins techniques, et le plus important est de pouvoir intégrer de façon complète l'ITK du domaine lequel est voué à évoluer. En effet, avec **l'arrêt du désherbage chimique** dans les mêmes années, la surface à travailler mécaniquement allant doubler, il faut donc trouver une solution à la multiplication des passages. Une des nécessités que l'on requiert lors du passage du robot dans une parcelle est bien entendu la rapidité d'exécution de la mission, celle-ci ne peut se faire seulement si le robot est performant, précis et qu'il **optimise ses mouvements**.

De plus le robot doit être **polyvalent**, capable de passer deux outils en simultanément et/ou de s'ajuster afin de pouvoir fixer différents outils de travaux du sol. Pour limiter la **concurrence des herbes**, il est capital de bien maîtriser les dates d'intervention et d'avoir des outils performants sinon, en plus de la pénibilité pour les personnes à pied, la concurrence a un impact sur la disponibilité en eau et nutriments pour la vigne.

Nonobstant, la multiplication des passages liée aux travaux du sol **ne doit pas impacter** la qualité des sols et **surtout son tassement**. Ce dernier, s'il est trop important, risque de rendre le sol hydrophobe et accentuer l'effet de ruissellement. D'autre part, ce compactage des sols peut limiter la propagation des racines ainsi que de la vie d'individus au sein des mésofaune et macrofaune des sols. On conclue donc à un besoin où le robot ne doit pas être aussi lourd qu'un tracteur classique qui pèse entre 3 et 4 tonnes.

Dans le cadre du maintien de la qualité de travail de nos tractoristes, il est important de les assister au mieux et de mettre à leur disposition tous les outils, afin qu'ils puissent améliorer leurs conditions de travail. L'arrivée d'un robot autonome pourrait tout à fait s'intégrer dans cette optique-là, permettant ainsi de **soulager leur travail**, en ayant des parcelles en moins à s'occuper, et en réduisant les risques possibles d'**accident corporel** notamment sur des parcelles présentant des pentes ou des versants importants. Actuellement, le château possède certaines parcelles à fort risque qui ont pu aider à la décision d'acquérir un robot viticole. Cependant, les besoins techniques ne peuvent décider à eux seuls le choix d'un investissement de cette importance.

B. 2 - Besoins organisationnels

Il n'est pas suffisant pour le robot de pouvoir répondre aux attentes terrains, il faut aussi que celui-ci réponde à des questions d'ordre purement pratiques, propres au château.

Il est essentiel que le robot s'ancre correctement avec les infrastructures existantes au château sans demander de gros investissements supplémentaires. Nous utilisons en effet des garages et une plateforme de tracteurisation qui ne peuvent pas changer en raison de la proximité du clocher du village. On doit donc intégrer ce paramètre pour le rangement du robot dans ces bâtiments **sans impacter l'extérieur**.



Par ailleurs, l'arrivée de ce robot va provoquer un changement dans l'organisation de la structure, mais surtout dans les routines quotidiennes des employés qui devront possiblement le prendre en main. C'est d'ailleurs une question primordiale de savoir qui sera l'**opérateur référent** de ce robot, cela nécessitera indéniablement une formation complète sur l'utilisation mais aussi sa gestion, ce qui contraint à une période d'apprentissage, non productive qu'il convient de mesurer en termes de temps.

Sachant que l'acquisition de cette nouveauté technologique est poussée par le pôle R&D, il va de soi qu'il ait accès au robot pour des représentations. Il est donc convenu que le robot puisse être transporté dans d'autres propriétés du groupe afin de réaliser des journées de présentations, voire d'exposition comme lors des primeurs où il serait **mis à l'honneur**. Il est en effet important de rappeler la **vocation marketing** d'un tel outil. Il peut être opportun pour un château ayant pour objectif d'être précurseur en matière d'innovations, de savoir mettre en avant ses nouveaux outils et ses nouvelles pratiques. Cela pouvant se faire auprès du grand public ou de clients professionnels, par des démonstrations sur le terrain, ou via des **médias spécialisés** ([Couverture de Réussir Vigne – numéro 307 – Juin 2023](#)).

Cependant, rien n'est absout de loi et l'achat d'un tel outil de travail doit respecter un certain cadre.

B. 3 - Cadre réglementaire

Lors de l'intégration d'un robot dans l'itinéraire technique du château, plusieurs obligations légales et réglementaires doivent être respectées pour garantir la sécurité, la conformité et le respect des normes en vigueur, comme celle d'intégrer le robot au document unique des risques professionnels.

- **Code du travail :**
 - **Article L4121-1** : L'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale des travailleurs. Dans le cadre de l'intégration d'un robot, cela implique une évaluation des risques et la mise en œuvre de mesures de prévention adaptées.
 - **Article L4121-2** : Ce texte précise que l'employeur doit adapter les conditions de travail, y compris les technologies employées, pour garantir la sécurité des employés. Cela inclut la formation des employés aux nouveaux outils technologiques comme les robots.
- **Normes de sécurité des machines (Directive Machines 2006/42/CE) :**
 - Cette directive européenne impose que toutes les machines, y compris les robots, respectent des exigences essentielles de sécurité avant leur mise sur le marché. Cela inclut l'évaluation des risques, la conformité aux normes techniques (ex. EN ISO 10218 pour les robots industriels), et l'obligation de marquage CE.
- **Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) :**
 - Si le robot collecte des données personnelles (par exemple, via des caméras ou des capteurs), il est crucial de respecter le RGPD, qui impose des obligations strictes en matière de collecte, de traitement, et de stockage des données.
- **Loi relative à la sécurité des sites historiques et du patrimoine :**

- L'intégration d'un robot dans un site patrimonial tel qu'un château peut être soumise à des contraintes spécifiques en matière de protection du patrimoine. Les interventions doivent être réalisées sans altérer l'intégrité et l'authenticité du site, conformément à la législation sur la protection des monuments historiques.

C - Sélection stratégique de Naïo Technologies

Fondée en **2011**, Naïo Technologies est une entreprise française spécialisée dans la robotique agricole. Son domaine d'expertise est le développement et la vente de robots qui aident les agriculteurs dans leurs tâches quotidiennes, en particulier pour le désherbage. Naïo Technologies vise à proposer des solutions novatrices qui répondent aux défis de l'agriculture contemporaine, comme la diminution de l'utilisation des pesticides, l'**amélioration** de la qualité de **vie des agriculteurs** et la préservation de l'environnement et des sols.

C. 1 - Robots de Naïo Technologies : un aperçu

Plusieurs robots ont été développés par Naïo Technologies, parmi lesquels les plus célèbres sont OZ, DINO et TED, qui visent différents types de cultures et de besoins agricoles :

- **OZ** : Ce robot est conçu pour les petites exploitations et les maraîchers. Compact et facile à utiliser, OZ peut désherber, biner, et transporter des charges légères. Il aide à réduire la pénibilité du travail en effectuant des tâches répétitives et en permettant aux agriculteurs de se concentrer sur des activités à plus haute valeur ajoutée.
- **DINO** : Destiné au désherbage mécanique des grandes cultures en rangs, comme les légumes feuilles, DINO est un robot plus grand et plus puissant, capable de couvrir des surfaces plus importantes. Il utilise des caméras et de l'intelligence artificielle pour naviguer entre les rangs de cultures et effectuer un désherbage précis, réduisant ainsi le besoin d'herbicides.
- **TED** : Spécifiquement conçu pour le travail dans les vignobles, TED est un robot enjambeur qui peut se déplacer entre les rangées de vignes pour effectuer du désherbage mécanique. Sa conception permet de préserver la santé des sols et de réduire l'empreinte écologique de la viticulture.

C. 2 - Présentation du robot TED

TED est un robot enjambeur spécifiquement conçu pour le désherbage mécanique dans les vignobles. Son utilisation vise à réduire la dépendance aux herbicides chimiques tout en préservant la santé des sols et la qualité des récoltes. TED peut naviguer entre les rangées de vignes de **manière autonome**, en effectuant des opérations de désherbage précises et efficaces.

C.2.a - Caractéristiques de TED

Selon Naïo Technologie, le TED est un robot robuste et fiable lui permettant de naviguer sur des terrains irréguliers et de traverser divers obstacles présents dans les vignobles (cf. [Annexe 9-10-11](#)). TED peut utiliser des outils de désherbage mécanique, efficace pour arracher les mauvaises herbes sans endommager les racines des vignes, ce qui contribue à la santé globale des vignobles.

TED est aussi doté d'un système de navigation autonome, et peut se déplacer de manière fluide entre les rangs de vignes **sans intervention humaine**, réduisant ainsi considérablement le temps et les coûts associés au désherbage manuel.

Cette fonctionnalité permet aux viticulteurs de se concentrer sur d'autres tâches importantes, tout en assurant un entretien régulier des vignobles. Par ailleurs, TED fonctionne à **l'énergie propre**, étant

entièrement électrique, ce qui non seulement le rend plus respectueux de l'environnement, mais réduit également les coûts d'exploitation.

C.2.b - Implantation de TED

D'après la société qui le commercialise, TED est conçu pour être facilement intégré dans les opérations viticoles existantes, grâce à une formation des utilisateurs sur l'utilisation et la maintenance de TED, garantissant une **prise en main rapide** et efficace. TED peut aussi être personnalisé pour s'adapter aux spécificités de chaque vignoble. Naïo Technologies assure un service clientèle et un support technique pour répondre aux besoins des utilisateurs et garantir le bon fonctionnement de TED, et apporte des **améliorations régulières** à TED, sur la base des retours clients.

En résumé, TED de Naïo Technologies représente une solution innovante pour le désherbage mécanique dans les vignobles. Ses caractéristiques techniques avancées, son autonomie de fonctionnement et son **impact environnemental réduit** en font un outil précieux pour les viticulteurs soucieux de préserver la qualité de leurs vignobles tout en adoptant des pratiques agricoles durables.

C. 3 - Investissement du Château Fombrauge dans le robot TED

Nous avons pu l'évoquer précédemment, le robot TED de la société Naïo Technologies est **arrivé** au château Fombrauge en **2018**, via un partenariat afin de participer au co-développement de cet outil. Il s'agit alors de la V1 (cf. [Image 3](#)) qui est alors présentée avec des porte-outils arrière. Il va très vite évoluer à la version physique que nous connaissons actuellement (cf. [Annexe 9](#)), qui se deviendra **définitive** malgré des versions numériques différentes.

S'agissant d'un partenariat, la possession du robot fut progressive, en effet il s'agissait d'un forfait qui nous a amené à un coût total de **150 000 € HT** pour obtenir la propriété complète du robot. A ce tarif s'ajoute des frais de gestion à hauteur de **3 000 € HT/an** et des frais de formation initiale et puis des sessions complémentaires, comme pour la prise en main de l'interface de création de carte, leurs tarifs variant en fonction du temps et du nombre de personnes formées.



Image 3 : Photographie de la V1 du TED, lors de son arrivée en 2018

Ce robot est donc depuis un certain au sein de l'établissement et suscite de ce fait des réactions chez les différents employés. Les employés administratifs y trouvent une certaine **démarche marketing** quand les employés du chai, dont l'ancienneté est au maximum de 3 ans, y voient une belle avancée technologique. Concernant les employés viticoles du château, les plus anciens sont **ravis** de le voir tourner davantage et constatent très nettement les progrès réalisés sur le robot, ce qui développe favorablement leur **confiance dans le produit**. Par ailleurs, leur regard critique sur le travail du sol,



leur permet d'avoir une certaine satisfaction à avoir le robot qui les supplée sur certaines tâches, qu'ils jugent très bien réalisées.

A ce jour, le robot **est intégré** par l'ensemble des membres de la propriété. Cependant, il est important de le **développer encore**.

2 - Les capteurs embarqués : évolution et perspectives

A - Etats des lieux des capteurs

Les capteurs jouent un rôle crucial dans l'agriculture moderne, en particulier dans l'agriculture de précision, où ils permettent une gestion plus fine et efficace des cultures. Ces dispositifs sont utilisés pour collecter des données précises sur divers paramètres environnementaux, tels que l'humidité du sol, la température, la composition chimique, ainsi que les conditions climatiques. Grâce à ces informations, les agriculteurs peuvent prendre des décisions éclairées. Les capteurs contribuent ainsi à une agriculture plus durable et rentable, adaptée aux défis de l'exploitation.

A. 1 - Entreprises innovantes et technologies disponibles

L'importance croissante des capteurs dans l'agriculture de précision a conduit plusieurs entreprises à innover dans ce domaine : **John Deere**, un leader reconnu, intègre des capteurs avancés dans ses solutions de gestion des cultures, facilitant la surveillance en temps réel des champs et améliorant la gestion de l'irrigation, de la fertilisation et de la protection des cultures ; De même, **AgroSensors** développe des capteurs spécialisés pour mesurer l'humidité du sol et surveiller les conditions climatiques, éléments cruciaux pour anticiper les besoins en irrigation, notamment dans les régions sujettes à des périodes de sécheresse.

Dans le domaine de la gestion des nutriments, **Yara** se distingue en proposant des capteurs qui analysent la santé des plantes, optimisant ainsi l'apport en nutriments pour assurer une croissance saine et productive des cultures. Parallèlement, **Sentera** se concentre sur la détection précoce des maladies grâce à ses capteurs optiques et multispectraux, permettant une intervention rapide avant que les problèmes ne deviennent critiques.

Bosch et **Pessl Instruments** contribuent également à cette révolution technologique. Bosch, avec ses solutions IoT, connecte différents types de capteurs pour offrir une vue d'ensemble complète des exploitations agricoles, tandis que Pessl Instruments propose une gamme étendue de capteurs et de stations météo, fournissant des données précises sur les conditions locales, indispensables pour la planification et la gestion des risques climatiques.

Ces entreprises emmènent l'agriculture vers une ère où la technologie permet une gestion plus intelligente, durable et rentable des cultures. Ces sociétés sont aussi accompagnées et poussées par les établissements de recherche, **public ou privé**, qui participent au développement de nouveaux capteurs comme peut le faire l'INRAE en France. Cette intégration technologique est capitale pour faire face aux défis contemporains tels que le changement climatique et la gestion des ressources, tout en maintenant la compétitivité des exploitations agricoles.

A. 2 - Types et fonctionnalités des capteurs

Les capteurs utilisés dans l'agriculture de précision se divisent en plusieurs catégories. Les capteurs de sol incluent le **Decagon 5TE**, qui mesure l'humidité, la température et la conductivité électrique du sol. Il peut être utilisé par exemple pour optimiser l'irrigation en fournissant des données précises sur les besoins en eau des cultures. Le **Sentek Drill & Drop**, quant à lui, fournit des données sur



l'humidité du sol à différentes profondeurs, ce qui est utile pour surveiller l'irrigation en profondeur et éviter le stress hydrique des plantes. Les capteurs climatiques, tels que le **Davis Vantage Pro2**, une station météo complète mesurant la température, l'humidité, la vitesse du vent et les précipitations, sont essentiels pour prévoir les conditions météorologiques et planifier les activités agricoles. Le **Pessl iMETOS**, une autre station météorologique, offre des mesures détaillées pour l'agriculture, aidant ainsi à anticiper les maladies des plantes et à optimiser les traitements phytosanitaires.

En complément de ces capteurs de sol et climatiques, les capteurs optiques et multispectraux jouent un rôle crucial dans la surveillance des cultures. Le **Sentera Quad Sensor** surveille la santé des plantes en détectant des variations subtiles dans leur couleur, permettant ainsi d'identifier des zones de stress avant qu'elles ne soient visibles à l'œil nu. Le **MicaSense RedEdge-MX** analyse la végétation et détecte les maladies, ce qui aide à prendre des décisions éclairées sur les traitements à appliquer. Pour la mesure de distance et la détection d'obstacles, les capteurs lidar comme le **SICK LMS100** et le **Velodyne Puck** sont utilisés. Le **Velodyne Puck**, par exemple, est utilisé pour la cartographie 3D et la navigation des robots agricoles, améliorant ainsi l'efficacité des tâches automatisées. Les capteurs de santé des plantes, comme le **Yara N-Sensor**, mesurent la teneur en azote des plantes pour optimiser les applications de fertilisants, réduisant ainsi les coûts et l'impact environnemental. Le **CropX Soil Sensor** surveille l'humidité et la salinité du sol, aidant à éviter la salinisation et à gérer l'irrigation de manière plus précise. Enfin, les capteurs de position GPS tels que le **Trimble AgGPS** pour la géolocalisation précise et le **Topcon AGI-4** pour la gestion de l'agriculture de précision, permettent une gestion plus efficace et précise des parcelles agricoles.

Sur l'ensemble des capteurs existants, une partie sont **embarqués** et peuvent s'appliquer au monde viticole. On peut retrouver une liste non exhaustive de ces capteurs en [Annexe 12](#), dans un tableau, issu d'un mémoire réalisé au sein de groupe Bernard Magrez (V. Montaru – 2022) et actualisé à date. Ce tableau regroupe des technologies actuellement déployées dans le secteur viticole. On peut y voir une grosse proportion de dispositif émergent sur la problématique du rendement (en orange dans le tableau). Cependant le reste des mesures, tel que la vigueur ou les maladies, sont réalisées par **images satellites** ou drones et peu par capteurs embarqués. On retrouve (en bleu), les technologies de dispositifs embarqués servant à la capture de ces autres mesures comme les sociétés **Chouette Vision** ou **GreenShield** ainsi que le capteur GreenSeeker présenté par la société **RVS**, conseiller viti-vinicole.

B - Recueil et analyse des besoins spécifiques

Comme nous avons pu l'évoquer, le groupe Bernard Magrez, à travers les expériences menées au Château Fombrauge, cherche à être précurseur en matière de technologie et se veut **novateur** quant aux solutions à apporter aux complications rencontrées au sein de la propriété. Après l'acquisition d'un robot il a fallu maintenir cette volonté d'innovation afin de répondre à de nouveaux enjeux.

Fort de ces constats, le domaine va équiper le TED d'un capteur Chouette en 2021, mais la question de connaître quels étaient les **besoins et la nécessité** d'apposer un tel capteur sur le robot s'est reposée. De nouveau, il a été décidé d'utiliser le même process (entretiens semi-directifs et échanges informels avec le personnel de terrain) pour tous les recenser.

B. 1 - Besoins techniques

Sur le plan technique, il est essentiel de garantir que le capteur soit pleinement **compatible** avec le robot viticole existant. Cela inclut la compatibilité matérielle, comme la connectivité des interfaces et



l'alimentation électrique. Parallèlement, la précision du capteur est cruciale pour répondre aux besoins spécifiques du vignoble, tels que la détection des maladies, la mesure de la vigueur des vignes, ou l'analyse de l'enherbement. Pour cela, il est nécessaire de calibrer correctement les capteurs afin d'assurer une **mesure précise et fiable**. La résolution des capteurs doit également être suffisante pour capter les variations fines sur le terrain, permettant ainsi une analyse détaillée des problèmes potentiels.

Le Château se trouvant dans une zone **peu couverte par les réseaux mobiles**, il est important que le capteur puisse transmettre les données collectées efficacement, que ce soit en temps réel ou en différé, à travers une connexion stable comme le Wi-Fi ou la 4G. De plus, la robustesse du capteur est un autre aspect clé à considérer. Le capteur doit être conçu pour **résister** aux conditions environnementales difficiles, typiques d'un vignoble, telles que l'humidité, la poussière et les températures élevées.

B. 2 - Besoins organisationnels

Sur le plan organisationnel, la formation du personnel est indispensable. Le personnel technique doit être formé non seulement à l'utilisation du capteur mais aussi à la **compréhension** de son fonctionnement, de la collecte des données à leur **interprétation via l'interface** web fournie par Chouette Vision. Cette interface web est un outil qui doit être parfaitement maîtrisé pour permettre une visualisation et une analyse efficaces des données collectées, préalable essentiel pour prendre des décisions agronomiques éclairées. La présence d'une telle technologie présente sur un outil autonome tel que le TED **est pertinent** car si nous ne sommes pas dans la parcelle au moment du passage la caméra elle, nous permet d'**avoir un visuel sur notre parcelle**, voire d'apporter un **œil extérieur et objectif** sur ce que nous pourrions penser visualiser lors de nos passages dans la parcelle.

De surcroît, la propriété doit évaluer attentivement les coûts associés à l'intégration du capteur, y compris les coûts d'achat, d'installation, et de maintenance, par rapport aux bénéfices attendus. Ces bénéfices peuvent inclure une amélioration de la qualité des vendanges, une réduction des intrants, ou une **optimisation du rendement**. Un suivi régulier du retour sur investissement (ROI) doit être effectué pour mesurer l'efficacité de cette intégration et ajuster la stratégie d'utilisation du capteur si nécessaire.

En somme, l'intégration d'un capteur embarqué sur un robot viticole nécessite une **préparation minutieuse** tant au niveau technique qu'organisationnel. Cela permettra de maximiser les bénéfices apportés par cette technologie, tout en minimisant les risques et les coûts associés.

B. 3 - Cadre réglementaire

À l'acquisition d'un capteur il est obligatoire de se conformer aux contraintes légales pour garantir sa sécurité ainsi que celle des employés.

- **Réglementation sur la Protection des Données et la vie privée**
 - **RGPD et Loi Informatique et Libertés** : Toute collecte de données personnelles via des capteurs embarqués doit respecter les obligations du RGPD et de la loi Informatique et Libertés. Cela inclut l'information des personnes concernées, l'obtention de leur consentement, la sécurisation des données, et le respect des droits des individus (accès, rectification, suppression).

- **Propriété des données** : Les agriculteurs doivent être clairement informés sur la propriété et l'utilisation des données collectées par les capteurs, afin de garantir une transparence totale et de respecter leurs droits.
- **Conformité technique et sécurité des dispositifs**
 - **Normes et certification (marquage CE)** : Les capteurs doivent être conformes aux normes techniques européennes (électromagnétiques, électriques, mécaniques) et obtenir le marquage CE pour être mis sur le marché.
 - **Sécurité des dispositifs IoT** : Il est essentiel de respecter les normes de sécurité pour protéger les capteurs contre les cyberattaques et garantir l'intégrité des données collectées. Cela comprend aussi le respect des fréquences radio régulées par l'ARCEP pour les communications sans fil.
- **Responsabilité environnementale et légale**
 - **Législation environnementale** : Les capteurs ne doivent pas avoir d'impact négatif sur l'environnement, et leur gestion en fin de vie doit respecter la directive sur les déchets électroniques (DEEE).
 - **Responsabilité civile et pénale** : L'utilisation des capteurs embarqués engage la responsabilité juridique des exploitants agricoles ou des entreprises installatrices, notamment en cas de dysfonctionnement ou de dommages causés.

C - Sélection des capteurs optiques

Comme nous avons pu le voir dans le tableau en [Annexe 12](#), plusieurs solutions étaient disponibles pour le Château Fombrauge. A noter que l'entreprise Chouette Vision était déjà présente parmi les propriétés du groupe et notamment au **Château Pape Clément** où les capteurs étaient installés sur les tracteurs électriques de la propriété. Dans un cadre de **partenariat et de développement** des relations, il était important d'analyser scrupuleusement les capacités du capteurs Chouette, afin de possiblement envisager son acquisition.

C. 1 - Fonctionnalités du capteur optique de Chouette Vision

Chouette Vision est une société innovante spécialisée dans les solutions de surveillance pour l'agriculture de précision, ayant pour mission d'aider les viticulteurs à mieux comprendre et gérer leurs vignobles, Chouette Vision utilise des technologies avancées de vision par ordinateur et d'intelligence artificielle pour offrir des diagnostics précis et rapides des vignes.



Image 4 : Position de la caméra verticale de Chouette sur le TED

D'après la société, le capteur optique de Chouette Vision (cf. [Image 4](#)) est particulièrement adapté à la viticulture, offrant des capacités de détection étendues pour plusieurs types de maladies et conditions de la vigne. Il joue un rôle dans la production viticole moderne en fournissant des données précises sur l'état des vignes et la gestion des sols. Ces données permettent aux viticulteurs de prendre des décisions éclairées et d'optimiser leurs pratiques de gestion des vignobles. Voici un aperçu des fonctionnalités et avantages du capteur :

- 1- **Détection de la jaunisse de la vigne** : Les capteurs optiques utilisent des algorithmes de vision par ordinateur pour identifier les signes de jaunisse, une maladie virale qui cause le jaunissement des feuilles et peut sérieusement affecter la santé de la vigne. La détection précoce de cette maladie permet de prendre des mesures pour limiter sa propagation, assurant ainsi une gestion plus efficace des vignes et réduisant les pertes potentielles (Hnatiuc et al. 2023) (Kerkech, Hafiane, Canals 2020).
- 2- **Détection des maladies du bois** : Le capteur peut détecter des maladies du bois telles que l'Esca, l'Eutypiose et la Black Dead Arm. Ces maladies graves affectent la longévité et la productivité des ceps de vigne. La détection visuelle des symptômes, comme les stries nécrotiques et les feuilles tachetées, permet d'intervenir avant que les dommages ne deviennent irréversibles, contribuant ainsi à maintenir la santé et la productivité des vignobles (Hnatiuc et al. 2023) (Kerkech et al. 2020).
- 3- **Détection des maladies foliaires comme le mildiou** : Le capteur peut identifier les premiers signes de mildiou (*Plasmopara viticola*) sur les feuilles, tels que les taches huileuses et la moisissure blanche sur la face inférieure des feuilles. Une détection rapide permet d'appliquer les traitements nécessaires, en préventif, pour mieux maîtriser l'infection et limiter les pertes de récolte, améliorant ainsi la gestion des maladies foliaires dans les vignobles (Kerkech et al. 2020) (Kerkech et al. 2020).
- 4- **Évaluation de la vigueur de la vigne** : Le capteur optique analyse la couleur et la densité du feuillage pour évaluer la vigueur des vignes, fournissant des données précises sur la croissance et la santé des plants. Ces informations sont cruciales pour la gestion des apports en

nutriments et en eau, optimisant ainsi les pratiques de culture et améliorant la productivité globale des vignobles (Hnatiuc et al. 2023) (Kerkech, Hafiane, Canals 2020).

- 5- **Détection de l'enherbement** : Le capteur peut également différencier les plantes adventices (mauvaises herbes) des vignes, permettant une gestion précise de l'enherbement. Cette capacité aide à optimiser les pratiques de désherbage, réduisant la compétition pour les ressources entre les vignes et les mauvaises herbes, et assurant une meilleure santé des vignes (Kerkech, Hafiane, Canals 2020).

C. 2 - Avantages du capteur optique de Chouette Vision

Selon les concepteurs, leur capteur optique offre plusieurs avantages significatifs pour la gestion des vignobles modernes. Ce capteur fournit des diagnostics rapides et précis, favorisant des interventions dans un temps réduit. Cela aide les viticulteurs à réagir immédiatement aux problèmes détectés, **minimisant ainsi les impacts** négatifs sur les cultures. De plus, les données collectées par le capteur peuvent être couplées aux systèmes de gestion de vignobles existants, facilitant ainsi l'analyse et la visualisation des données.

En détectant les problèmes à un stade précoce, le capteur permet de réduire les coûts liés aux traitements et aux pertes de production. Une détection précoce signifie moins de recours à des traitements coûteux et une **diminution des pertes** dues à des maladies ou à des stress environnementaux non contrôlés. La surveillance continue et précise améliore également la gestion globale du vignoble, conduisant à une meilleure qualité des raisins et des vins produits. Les vignes reçoivent les soins nécessaires au bon moment, optimisant ainsi leur santé et leur productivité.

C. 3 - Intégration à Fombrauge

De par le peu de passages du TED en 2021, le capteur Chouette, arrivé lui aussi en 2021, a pu être réellement déployé en 2022-2023. Cette caméra, pratique d'utilisation, n'a pas besoin de paramètres ou de mise en route ; **son autonomie** est une de ses grandes qualités pour son utilisation à la parcelle.

Concernant l'utilisation de son interface Web, il est plus compliqué à prendre en main et à intégrer au sein de l'ITK. Instauré comme partenariat à ses débuts, cette collaboration s'est vue évoluer : c'est actuellement une **prestation d'abonnement**, souscrite par Fombrauge à hauteur de **3 000€ par an** pour le traitement de données pour **10Ha**. Parallèlement, la propriété veut continuer à faire avancer le développement du capteur, et pour ce faire, elle réalise à **titre expérimental**, des relevés et des protocoles de recherches. Ces derniers sont intéressants pour Chouette, qui souhaite les développer et parvenir *in fine* à les commercialiser. Il s'agirait notamment du **comptage de manquants** ou encore la détection de maladies au niveau des grappes, mesures réalisées avec une **caméra latérale** (cf. [Image 5](#)).



Image 5 : Position de la caméra latérale de Chouette sur le TED

En somme, la propriété de Saint-Emilion du Groupe Bernard Magrez, est fière de posséder des outils qui contribuent à l'amélioration de ses pratiques agricoles de précision même si cela suppose un effort pour les prendre en main correctement.

3 - Les utilisations actuelles à Fombrauge

Le Château, équipé du robot TED depuis 2018, souhaite l'utiliser à 100% de ses capacités et qu'il prenne une part intégrante du travail du sol. Dans cet objectif, il est impératif de réaliser un travail en amont, car il est nécessaire de cartographier correctement et soigneusement les parcelles que l'on souhaite dédier au robot afin que **l'utilisation du robot soit optimale**.

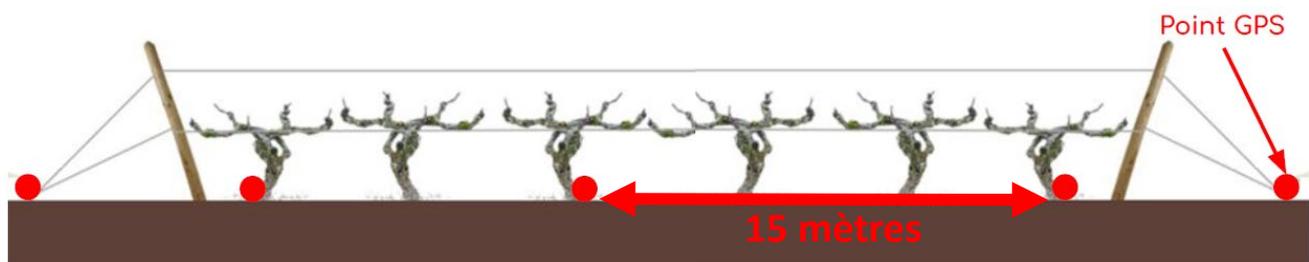
A - Cartographie du parcellaire : vers une utilisation optimisée du robot

A.1 - Les étapes de la cartographie

Il s'agit ici de l'étape primordiale si l'on veut profiter à 100% des capacités du TED et surtout ne pas endommager voire arracher de ceps, ce qui serait problématique.

A.1.a - Obtention des points GPS

Nous avons essayé deux modes d'acquisition pour les points GPS. Le premier procédé était **à pied** et le second a fait appel à un pilote de drones. Le principal avantage du drone est « Le gain de temps ». De fait, alors qu'il faut environ **2h pour parcourir un hectare** à pied, le drone survole pendant cette **même durée 10 ha**. Cependant le protocole initial de Naïo Technologie repose sur la prise de points à pied donc nous allons la détailler grâce au schéma ci-dessous (cf. [Schéma 2](#)).



[Schéma 2 : Représentation du protocole de prise de points par Naïo Technologies](#)

Ce schéma explique que la prise de points doit se faire à l'amarre, au premier pied, puis tous les 15 mètres, afin d'obtenir un tracé proche de la réalité. Ces points GPS sont réalisés avec l'antenne présente sur le robot, à savoir une antenne RTK de chez **Septentrio**. Celle-ci est vissée sur une béquille afin d'être le plus près du sol (cf. [Image 6](#)) et ainsi éviter un décalage souvent présent avec les perches avec niveau à bulle. Afin d'activer cette antenne nous sommes en possession de l'application « Naïo Map » qui se présente comme ci-dessous (cf. [Image 7](#)).

Cette application, facile de prise en main, permet de relever aisément et d'envoyer les données au support de Naïo Technologie afin de réaliser la carte.



Image 7 : Béquille créée pour la prise de données cartographiques



Image 7 : Représentation de l'interface de l'application Naïo Maps

A.I.b - L'outil EasyMapping pour la création

Cette interface (cf. [Annexe 13](#)) utilisée par Naïo permet de corriger et d'ajuster la prise de points afin de créer la carte définitive.

EasyMapping permet non seulement d'apporter une **précision centimétrique** aux corrections mais elle permet aussi d'organiser l'ordre des rangs, ce qui peut être judicieux dans le cas d'une **parcelle atypique**.

Il est de mise de se poser directement les bonnes questions quant au passage du robot et de l'automatisation de la parcelle. De ce fait, il est nécessaire d'**anticiper les pièges** ou défauts de la parcelle, ainsi l'appui d'un homme connaissant la parcelle et qui a déjà travaillé en tracteur dedans est primordial afin de **concevoir la meilleure carte** possible.

A.I.c - Les tests terrains

Après avoir sauvegardé notre travail sur EasyMapping, nous devons maintenant tester la carte sur le robot. Actuellement, il est possible de **transférer directement**, via le modem du robot, la carte sur le robot ce qui accentue la sensation d'automatisation du processus.

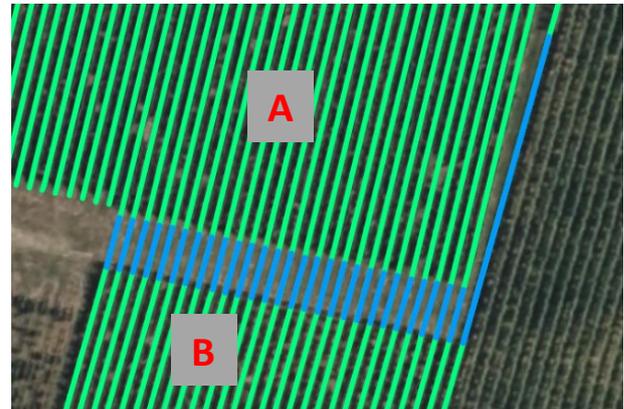
C'est lors des premiers passages qu'il est important d'être attentif et déceler les erreurs dans les rangs, les demi-tours ou plus généralement, la qualité de la carte. Il va de soi que les cartes ayant des défauts seront corrigées sur EasyMapping le plus promptement, voire en direct depuis un ordinateur portable afin d'optimiser le travail et le temps alloué à la création de ladite carte.

A. 2 - Les plus de la cartographie

Si l'on veut réellement automatiser sa parcelle et le travail du robot, il est essentiel d'utiliser tous les accessoires à notre disposition. C'est pourquoi la création de la carte peut nécessiter quelques ajouts. Ces derniers peuvent être de 3 types. Nous retrouvons les **chemins de demi-tour (CDDT)**, les **zones de délestage (ZDD)** et les **chemins sinueux**. CDDT et ZDD sont les plus couramment utilisés, permettant de contourner beaucoup de problèmes d'automatisation.



[Image 8 : Représentation d'un chemin de demi-tour sur EasyMapping](#)



[Image 9 : Représentation des zones de délestages sur EasyMapping](#)

Les CDDT se créent directement avec le robot et permettent de **faciliter un demi-tour** ou de faire rejoindre le rang suivant si celui-ci n'est pas accolé au premier, c'est le cas présent dans l'image ci-dessus (cf. [Image 9](#)).

Les ZDD en bleue sur l'image (cf. [Image 8](#)) ci-dessus sont utiles lorsque nous cherchons à relever les outils afin de ne pas travailler le sol. Au sein du château ils sont efficaces lorsque nous cherchons à travailler plusieurs parcelles physiques en une seule numérique. On a donc le TED qui va relever les outils à la fin de la parcelle A et va les rabaisser au premier point GPS de la parcelle B tout en **évitant l'allée entre les deux**.

Les chemins sinueux quant à eux se créent eux aussi avec le robot et sont avantageux pour ne plus conduire le robot à la parcelle. On peut donc enregistrer le chemin pour nous **rendre du garage à une parcelle ou entre deux parcelles**, ce qui est un gain de temps et de concentration. Cependant il faut rester vigilant que rien n'obstrue ce chemin comme un trou, une barrière ou même un piéton.

A. 3 - Les surfaces à Fombrauge

Avec seulement **3Ha**, le domaine a commencé à utiliser le TED à des fins expérimentales et de développement donc la surface ne pouvait être conséquente. De plus le robot étant le support de stage et de recherche sur sa qualité de travail il était préférable de limiter sa surface. Rapidement nous sommes arrivés à **4.5Ha**, ce qui a perduré pendant longtemps. Mais peu utilisé, le robot ne remplissait pas toutes ses promesses.

Actuellement nous sommes à **8.5Ha**, soit proche du double. Cette démarche est liée à l'envie d'utiliser pleinement le robot. C'est pourquoi depuis les vendanges 2023, il a accompli tous les passages de l'itinéraire technique (ITK) de des parcelles à proximité du château (cf. [Annexe 14](#)) l'objectif étant d'augmenter progressivement la surface réalisée par le robot, même si des parcelles restent



problématiques du fait des différents accès qu'il faudrait contrôler. La formation aux outils numériques, comme Naïo Maps et EasyMapping, a pour objectif de poursuivre cette autonomie de la propriété et cela faciliterait l'augmentation des parcelles. Le château veut atteindre **10Ha** de cartographié en 2025 et **15Ha** d'ici 2027.

B - Un robot qui s'adapte à l'équipement

B. 1 - Le travail du sol avec nos outils

Un des avantages que l'on peut attribuer au TED, c'est sa capacité d'adaptation aux équipements présents sur une exploitation. Même si le premier outil du robot, des lames interceps, a été développé pour lui, nous avons pu tout de même, l'équiper avec des outils que nous avons, à savoir des disques émotteurs, des doigts Kress et griffes inter-rang.

Certaines accommodations artisanales (cf. Image 10) ont ainsi permis, par le savoir-faire et la connaissance de nos employés polyvalents, de **faciliter le changement d'outils** et surtout leur ajustement. Tout cela favorise grandement l'augmentation de l'utilisation du robot au sein de l'exploitation.



Image 11 : Installation de disques émotteurs sur le TED



Image 10 : Prototype de lames interceps Clemens sur le TED

B. 2 - Support de nouveaux outils

Cette polyvalence d'utilisation se retrouve dans la faculté d'adaptation de nouveaux outils. En effet, sa barre porte-outils « classique » permet d'être un **support d'innovation**. Nous avons pu développer des interceps mécaniques avec la société Clemens (cf. Image 11). Nous retrouvons également la société Belhomme qui a repensé ses outils speedways hydrauliques pour les confectionner avec un système à l'azote, le robot n'étant pas doté de système hydraulique comme certains de ses concurrents.

Par ailleurs la société Naïo Technologie travaille en partenariat avec de nombreuses marques afin de concevoir des **outils entraînés électriquement** pour mieux répondre à la demande croissante, comme des tondeuses, lames interceps ou mêmes des rogneuses (cf. Vitis-import), ces outils étant principalement adaptés pour des systèmes hydrauliques.



De plus, le robot TED est un excellent support numérique, se **couplant facilement** avec différents systèmes comme des capteurs embarqués. Comme vu dans les paragraphes précédents, ces derniers peuvent être de toute utilité car ils permettent de repenser le monde de la viticulture en ayant toujours de la visibilité sur sa vigne malgré absence de l'Homme dans la parcelle.

D'autre part on peut affirmer que le TED n'est pas seulement un outil de travail mécanique, en réalité il permet de **relier différents acteurs** par des interactions complexes et stratégiques, à la fois dans le processus de **production** mais aussi de **commercialisation du vins** (cf. [Annexe 15](#)). On retrouve dans ce schéma organisationnel, le constructeurs Naïo Technologies ainsi que le revendeur exclusif en France, CLAAS, qui sont intimement liés. Cependant, grâce au Château Fombrauge ils communiquent avec d'autres sociétés, ici RVS, pour continuer de visualiser les nouveaux équipements qui peuvent être installer sur le robot.

Son intégration au Château Fombrauge a aussi des répercussions directes sur la **stratégie de commercialisation et de vente des vins**. En contribuant à la qualité et à la durabilité de la production, il renforce la réputation du domaine. Sa présence est un **argument marketing fort**, qui, mis en avant par les équipes de communication peut démontrer l'engagement du Château Fombrauge dans l'innovation et l'excellence. Cela permet non seulement de se différencier sur le marché, mais aussi de séduire une clientèle de plus en plus soucieuse des pratiques environnementales. En somme, le robot viticole est un **levier stratégique** qui non seulement optimise la production, mais aussi valorise le vin sur les marchés internationaux, contribuant ainsi au succès commercial du Château Fombrauge.

Tout ceci nous amène à visualiser qu'au sein du château, nous parvenons à utiliser le robot à sa juste valeur en **mettant à profit le TED à 100%** des capacités commercialisées par Naïo. Cela étant, sous l'impulsion du Groupe Bernard Magrez, nous voulons optimiser le support robotique afin qu'il **surpasse son potentiel**. Et c'est possiblement en lui ajoutant des capteurs comme ceux proposés par la société Chouette, que nous parviendrons à notre objectif.

Synthèse de la Partie 2

- La robotique viticole automatise les tâches pour assister les tractoristes.
- Le Château Fombrauge participe au développement de capteurs pour optimiser la gestion de ses parcelles, répondant à ses besoins techniques : Choix de Chouette Vision.
- Le partenariat avec Naïo Technologies permet au Château de bénéficier de solutions robotiques adaptées à ses pratiques.
- L'innovation technologique est cruciale pour maintenir la compétitivité du Château Fombrauge sur le marché.

Partie 3 - Déploiement de deux nouveaux services au sein du domaine permettant de cartographier la pression sanitaire et les pieds improductifs.

1 - Détection du mildiou en viticulture

A - Présentation et impact du mildiou de la vigne

Le mildiou de la vigne, causé par le champignon *Plasmopara viticola*, est l'une des maladies les plus **dévastatrices** pour les vignobles. Son cycle de vie commence par la **germination des spores** en conditions humides et chaudes. Les spores envahissent les tissus végétaux, se multiplient et génèrent de nouvelles spores qui se propagent par la pluie et le vent. La propagation du mildiou est favorisée par des températures modérées (10-25°C) et une humidité élevée (cf. [Annexe 16](#)).

Saint-Émilion, région viticole renommée, est particulièrement vulnérable au mildiou en raison de ses conditions climatiques. Les printemps et étés humides et chauds **favorisent la propagation** de la maladie. Comme nous l'avons vu, la viticulture joue un rôle économique majeur dans cette région, où la qualité et la réputation des vins sont essentielles pour le marché international.

A. 1 - Signes et symptômes du mildiou

Le mildiou se manifeste par plusieurs symptômes distincts. Les symptômes foliaires sont discernables par des **taches huileuses jaunes** sur la face supérieure des feuilles et le développement de **moisissures blanches** sur la face inférieure (cf. [Image 12](#)). Le mildiou peut aussi se déclarer sur grappe en provoquant une déformation et décoloration des grappes, des baies ratatinées et couvertes de moisissures blanches. Au stade suivant, les baies vont **se nécroser et sécher** entraînant une perte significative de rendement.



Image 12 : Symptômes foliaires, sur vigne, du mildiou (vignevin)

A. 2 - Méthodes de détection de la maladie

Traditionnellement l'identification des symptômes du mildiou est basée sur l'**inspection visuelle** et l'**expérience des viticulteurs**, via des visites régulières dans les vignobles afin de détecter les symptômes précoces de la maladie, ainsi que des formations spécifiques pour identifier les symptômes et les conditions propices à la propagation du mildiou.

Les avancées technologiques offrent de nouvelles méthodes pour la **détection précoce** du mildiou notamment des capteurs optiques ou drones assistés par une IA qui va analyser et détecter la présence de symptômes issus de la maladie.

B - Importance de la maîtrise de la maladie pour les exploitations viticoles à Saint-Émilion

B. 1 - Impact économique de la non-détection du mildiou

En viticulture, il est capital de constater au plus tôt les maladies afin de **réduire au minimum les pertes** économiques. Une détection précoce permet de mettre en place les traitements appropriés avant que la maladie ne se propage de manière étendue, ce qui permet de diminuer les dégâts aux cultures et les dépenses liées aux interventions tardives.

La non-détection du mildiou peut entraîner une réduction significative du rendement, allant parfois jusqu'à la **perte totale** de la production. Étant donné que les traitements sont principalement **préventifs**, et que peu de solutions curatives existent, le vigneron se doit d'être très attentif pour correctement contrôler la propagation de la maladie. La vigne étant un organisme résilient, les baies non touchées par la maladie seront certes productives mais leur qualité pourrait être altérée et se répercuter sur le produit fini, et ainsi sur son prix de revient.

B. 2 - Gestion et prévention des infections

La gestion efficace du mildiou repose sur des stratégies de lutte intégrée. Pour le matériel végétal, il est capital d'avoir des pratiques culturales **limitant les conditions de développement** de l'oomycète et particulièrement l'humidité. Celle-ci peut se contrôler en limitant les herbes hautes avec de la tonte ou bien en effeuillant au niveau des grappes, ce qui permet de sécher les grappes de la rosée ou des pluies. De plus, le vigneron doit indéniablement surveiller constamment son vignoble pour mieux anticiper les traitements préventifs nécessaires, en fonction des prévisions météorologiques et des labels environnementaux auxquels il prétend.

B. 3 - Conséquences sur la réputation et la certification

La détection et la gestion efficace du mildiou sont essentielles pour **maintenir les certifications des vins de Saint-Émilion** et par voie de conséquence, leur réputation. En effet, la qualité constante des vins est primordiale pour assurer des **bonnes notes de la presse spécialisée** et maintenir une image de marque valorisante. Cela permet de renforcer la fidélité de clients professionnels et des particuliers.

En conclusion, la détection précoce et la gestion efficace du mildiou sont cruciales pour les exploitations viticoles de Saint-Émilion, garantissant la qualité des vins, la rentabilité économique et la réputation mondiale de la région.

C - Mise en place de la méthodologie

Comme nous avons pu le démontrer dans au début de cette étude, la question de l'autonomisation des parcelles suscite des problématiques quant au suivi du vignoble. Nous avons également évoqué les besoins et les choix des outils utilisés, le robot TED et le capteur de Chouette Vision.

Nous savons que le vignoble Bordelais est **nettement atteint** par la présence du mildiou et nous l'avons stipulé, il faut un suivi méticuleux des parcelles pour éviter la propagation de cette maladie.

Cependant, qui dit « autonomie » dit « absence d'être humain ». En effet, la volonté de n'avoir personne qui surveille le robot, signifie également l'**absence d'un opérateur** pour examiner les feuilles ou les grappes.

Pour résoudre cette problématique, nous avons souhaité mettre en place une méthode afin de surveiller *Plasmopara viticola* dans nos parcelles.

C. 1 - La prise de données grâce au passage du robot

C.1.a - La planification des passages

Un des avantages de la technologie Chouette est que le capteur s'allume lorsque le robot est mis sous tension et s'active lorsqu'on déclenche une mission sur une parcelle. Ce fonctionnement permet de rendre automatique la saisie des photos et donc d'**accumuler beaucoup de données** au fur et à mesure des passages dans les parcelles.

Cette facilité de prendre des images se couple parfaitement avec les capacités du robot, à savoir le travail mécanique du sol. Nous sortons le robot dès que les conditions climatiques et les caractéristiques du sol le permettent. Réalisant seulement **4 à 5 passages par parcelle**, dû à nos équipements, nous avons autant de passages de caméra afin d'acquérir de la donnée. Le capteur est initialement conçu pour des tracteurs avec des vitesses de travail allant jusqu'à **10Km/h**, alors que le robot ne peut excéder **4.5Km/h** : le capteur peut donc **fonctionner lors de tous les travaux**.

De plus, nous procédons à des passages exclusivement dédiés à la caméra lorsque nous jugeons pertinent d'avoir des **données complémentaires**. Pour la première fois cette année, nous avons essayé d'optimiser le robot et de réaliser la **totalité des surfaces cartographiées** avec chaque outil utilisé.

C.1.b - Les caractéristiques du relevé de données

La position verticale de la caméra (cf. [Partie 2.1.C.1](#)), associée à une capacité grand angle lui permet d'observer à la fois les **2 inter-rangs et le rang travaillé** (cf. [Image 13](#)) . On visualise donc les apex ainsi que les pousses latérales.



Image 13 : Photo capturée par la caméra verticale et analysée par l'IA de Chouette

La date de passage n'a pas d'incidence sur les données car la société Chouette réalise des analyses différentes en fonction des dates et des stades de développement. Nonobstant, les images sont traitées avec une **IA développée et entraînée par Chouette** et les images peuvent être impactées par les conditions de capture. Les travaux de nuit, aux heures matinales ou tardives vont provoquer des luminosités qui pourront créer des **faux-positif ou faux-négatif** et de ce fait impacter la fiabilité des analyses.

A noter que la caméra latérale n'est pas commercialisée et ne fournit pas encore de données certifiées et valides, mais pourrait être utile pour examiner le développement de maladie sur le feuillage et les grappes.

C. 2 - La détection de sporée - Projet Visa

Pour poursuivre le protocole de détection de mildiou, nous associons plusieurs observations terrains. Nous commençons par l'œil humain, puis le passage du capteur Chouette et nous terminons avec le projet VISA, mené par l'UMT Seven et l'IFV (cf. [Image 14](#)).

Ce projet collaboratif, a pour but de déceler les **comportements des spores de mildiou** à l'échelle de la placette, de la parcelle, de l'exploitation et même de l'appellation. Le principe est de relever de façon trihebdomadaire des prélèvements issus d'une parcelle, proche du château.



[Image 14](#) : Capteur actif du Projet VISA - Château Fombrauge

Ces données sont visibles sur une interface faisant l'historique du château et des autres propriétés des appellations voisines. Grâce à celles-ci, on peut notifier l'**apparition de spores** et possiblement de conditions favorables au développement du mildiou. En associant ce projet avec nos OAD (cf. [Annexe 4](#)), nous **ajustons nos dates de traitements** et spécialement la première, annonciatrice d'un rythme plus ou moins soutenu pour les futurs traitements.

C. 3 - Visualisation des symptômes

Chouette met à disposition une interface web (Chouette View - cf. [Annexe 17](#)) permettant de visualiser l'ensemble des analyses proposées. Les données sont analysées seulement si **80%** de la parcelle a été réalisée et si les images sont émises sous **3 jours**. Bien entendu, en cas de dysfonctionnement des antennes 4G ou toute autre spécificité, il est possible de faire une demande de traitement de photos, si toutefois cela s'avère pertinent.

Lorsqu'un passage est réalisé pour la détection de taches de mildiou et que les analyses ont été faites, le château reçoit par mail un « Bilan de santé » des parcelles examinées, signifiant qu'il est possible de visualiser les résultats sur Chouette View. On peut en effet constater les **présences de taches** et vérifier celles-ci avec les photos prises par le capteur (cf. [Image 15](#)). On remarque des carrés qui permettent d'apercevoir les taches considérées comme étant des symptômes du mildiou. Il est néanmoins primordial que l'opérateur possède des **connaissances agronomiques**, afin de reconnaître



et d'analyser correctement les images, dans le but de certifier de la **véracité** de la détection de pathogènes sur les feuilles.



Image 15 : Photo accessible sur Chouette View pour le contrôle des tâches détectées sur le feuillage

L'ensemble des données stockées sur l'interface est utile au château. Les données sont vouées à être contrôlées et comprises pour en **tirer le meilleur profit**.

Nous travaillons avec ce capteur pour visualiser la **performance et la pertinence de nos traitements**. Il faut vérifier le nombre de symptômes observés et leur évolution, pour s'assurer qu'il n'y ait pas de **nouvelle contamination** ou de développement de la maladie.

D - Interprétation des résultats

D. 1 - Résultats de la détection – millésime 2024

La cartographie (cf. [Image 16](#)) que nous obtenons permet de remarquer une hétérogénéité de la déclaration de symptômes dans l'ensemble des parcelles arpentées par le robot. On constate également qu'il ne **s'agit pas d'une zone particulière** et que des parcelles mitoyennes ne se contaminent pas entre elles.

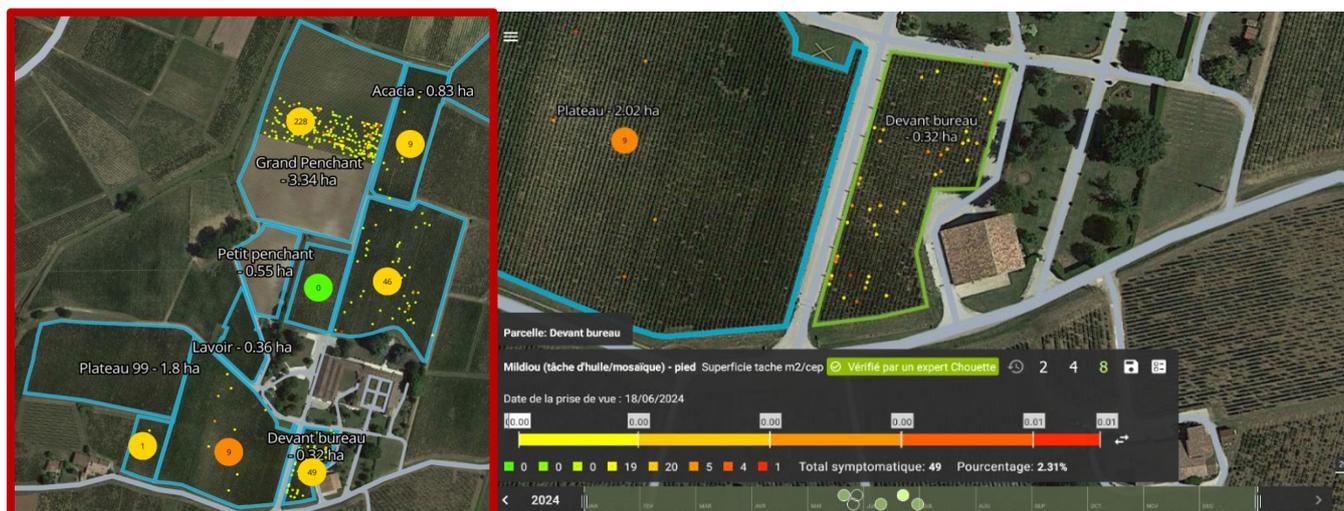


Image 16 : Cartographie de la détection de taches symptomatiques - Château Fombrauge

Les résultats sont pourtant à nuancer. Pour exemple, la représentation ci-dessus empêche de se rendre compte de l'**évolution des manifestations de mildiou**. En analysant le tableau des résultats en fonction des dates de passages du robot (cf. [Tableau 3](#)), il est aussi difficile d'évaluer l'évolution des symptômes sur la grande partie des parcelles, à **cause des conditions climatiques**

compliquées cette année ainsi que des défaillances techniques (cases grises). On remarque que l'évolution n'a pu être étudiée que sur la parcelle « Grand Penchant ».

Nom de la parcelle		Grand Penchant	Derrière Château	Acaccia	Devant Bureau	Vieille Vigne	Plateau Gresta	Plateau 99
Surface (Ha)		1,76	1,93	0,83	0,32	2,02	0,29	1,8
Nombre de tâches observées	début juin	51	46	9				
	début juillet	228			49	9	1	
	différence	177	-	-	-	-	-	-

Tableau 3 : Evolution des tâches détectées pour les parcelles robotisées.

Cependant, on estime qu'aux dates de prélèvements des images, les 6^{ème} et 8^{ème} traitements étaient respectivement réalisés en début juin et début juillet. Entre ces dates, les données issues du Projet VISA ont **annoncé des fortes présences de spores** ainsi que des **pluies contaminatrices** pouvant expliquer l'augmentation du nombre de taches capturées sur les photos. Sur le tableau, on constate cependant une faible présence de taches, **59 pour 2.63 Ha**, soit **1/3** de la détection sur Grand Penchant où seulement **0.6Ha** ont été cartographiés. Ceci nous permet d'avancer plusieurs hypothèses concernant la **qualité de la pulvérisation** ou bien d'un facteur qui serait à l'origine de cette multiplication, celui de la **vigueur potentiellement**.

D. 2 - Validité des résultats

Afin de voir la pertinence des résultats présentés par la société et au regard de ce que nous percevons au Château Fombrauge, il est nécessaire de vérifier la fiabilité des résultats.

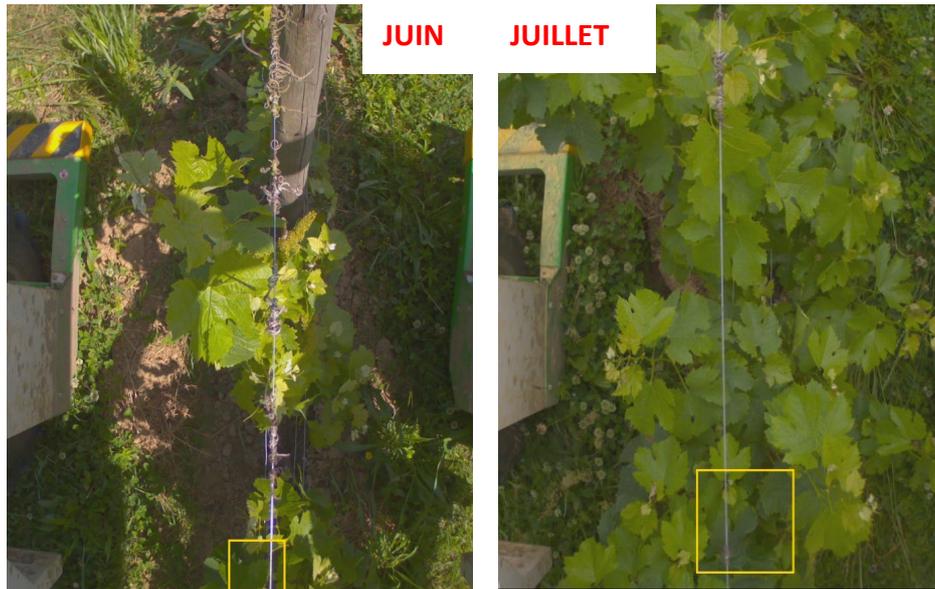
D.2.a - Comparaison du capteur au relevé visuel

Lors des premiers passages en juin, l'opérateur qui accompagnait le robot n'a pas fait de relevé exhaustif des taches, cependant il a pris des **placettes témoins** afin de les comparer aux cartes créées par le capteur. Puis il a refait la même opération en juillet lors du deuxième relevé (cf. [Tableau 4](#)). Bien que les résultats possèdent une **grande variabilité**, on peut observer des performances de détection moins stables, avec plusieurs 0 en juin, or les feuilles **semblaient bien visibles** pour la caméra.

Grand Penchant	date	Opérateur	Capteur	Taux de détection	Grand Penchant	date	Opérateur	Capteur	Taux de détection
Placette 1	début juin	2	2	100%	Placette 1	début juillet	5	5	100%
Placette 2	début juin	4	2	50%	Placette 2	début juillet	6	5	83%
Placette 3	début juin	2	1	50%	Placette 3	début juillet	5	4	80%
Placette 4	début juin	3	0	0%	Placette 4	début juillet	3	1	33%
Placette 5	début juin	2	1	50%	Placette 5	début juillet	2	0	0%
Derrière Château					Devant Bureau				
Placette 1	début juin	4	2	50%	Placette 1	début juillet	3	3	100%
Placette 2	début juin	2	2	100%	Placette 2	début juillet	2	2	100%
Placette 3	début juin	2	4	200%	Placette 3	début juillet	3	2	67%
Placette 4	début juin	3	1	33%	Placette 4	début juillet	1	0	0%
Placette 5	début juin	3	0	0%	Placette 5	début juillet	2	2	100%
Acaccia					Vieille Vigne				
Placette 1	début juin	3	0	0%	Placette 1	début juillet	1	1	100%
Placette 2	début juin	1	1	100%	Placette 2	début juillet	0	0	-
Placette 3	début juin	2	1	50%	Placette 3	début juillet	2	1	50%
Placette 4	début juin	1	0	0%	Placette 4	début juillet	1	0	0%
Placette 5	début juin	2	0	0%	Placette 5	début juillet	1	1	100%
				52%					65%

Tableau 4 : Comparaison de la détection de taches symptomatiques entre l'opérateur et le capteur de Chouette - Juin et Juillet 2024

A l'inverse, nous avons obtenu de meilleurs résultats pour le passage en juillet, avec un meilleur taux général de détection. Nous pensons que le feuillage plus développé (cf. [Image 17](#)) allait **réduire la visibilité des taches**, mais après la **forte pression sanitaire** évoquée plus haut, les taches ont dû être **plus facilement observés** par l'IA.



[Image 17 : Comparaison d'un pied en juin et juillet](#)

N'ayant pas pu repasser le robot dans les parcelles en fin juillet, nous n'avons pas pu obtenir de 3^{ème} relevé afin d'avoir des résultats sur un **feuillage entièrement développé**. Néanmoins, il est probable que les taux de perception auraient été plus faibles, la maladie **se déclarant sur les pousses** d'entre-cœurs pouvant être masquées par le feuillage établi.

D.2.b - Fiabilité du capteur Chouette => comparaison vigueur

Soucieux d'avoir un outil performant sur la détection de maladies fongiques, nous avons comparé un autre type d'analyse qui peut se rapprocher du développement du mildiou. Même si nous sommes conscients que les IA et les travaux ne sont pas identiques, nous avons jugé bon de comparer les **capacités de traitement d'images** grâce à l'**indice de vigueur**. En effet, les vignes vigoureuses donnent une végétation abondante à feuilles de plus grande taille. La présence de cette densité génère un microclimat humide et ombragé, ce qui diminue la circulation de l'air et ralentit le séchage des feuilles après les précipitations permettant l'apparition du pathogène.

De plus, une parcelle à **vigueur élevée** présente souvent une **période de croissance du végétal plus longue** prolongeant sa **vulnérabilité** au mildiou. Autrement dit, des pousses nouvelles et tendres se forment constamment, offrant au pathogène de nouvelles surfaces à infecter sur une plus longue période.

Afin de comparer les cartes de vigueur de Chouette, nous avons travaillé avec la société de conseils viti-vinicole RVS. Le château collabore avec eux depuis de nombreuses années et leurs analyses sont **fiables et éprouvées**. Ils cartographient la vigueur grâce à l'**indice NDVI**, mesuré à l'aide d'un **GreenSeeker**, outil premièrement utilisé en grande culture, s'appliquant tout à fait à la viticulture.

En confrontant les deux cartographies (cf. [Image 18](#)), on observe des **tendances similaires** sur l'ensemble des données disponibles. Visuellement, nous constatons que les zones à vigueur forte et faible sont sensiblement identiques malgré les **quelques différences** décelées sur les zones de **vigueur intermédiaires**.

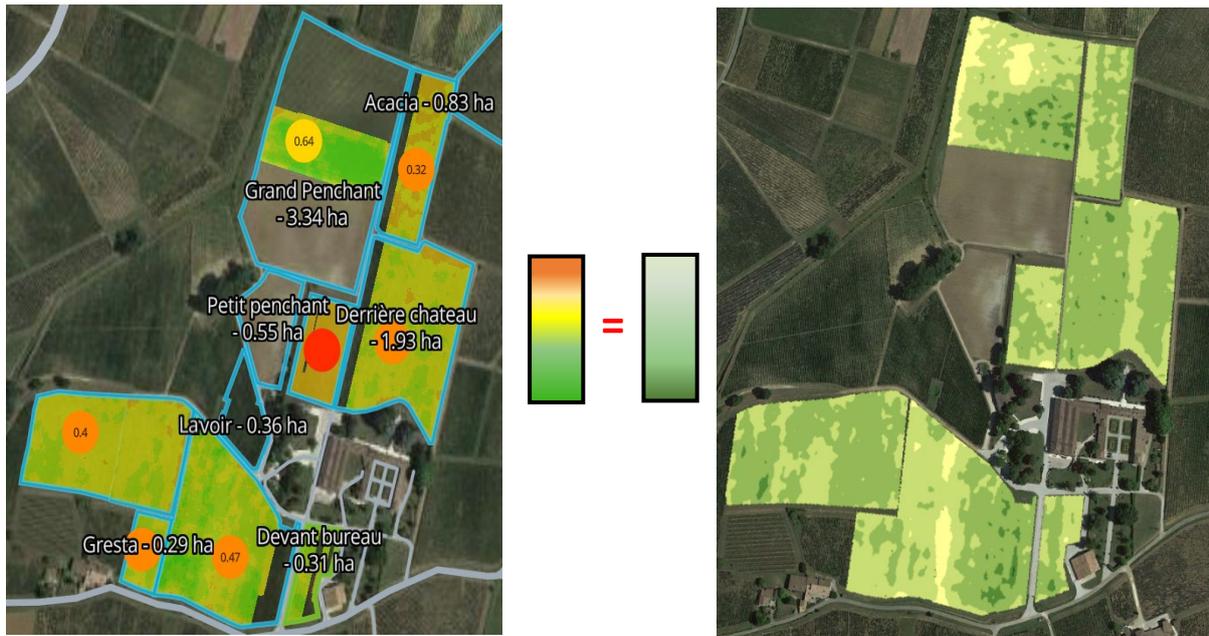


Image 18 : Cartographie de la comparaison de vigueur entre les indices de Chouette et de RVS

Afin de confirmer cela, nous avons exécuté une **analyse chiffrée**, en réalisant quelques tests statistiques pour comparer les surfaces par catégorie. Comme celles de RVS sont fixes, nous avons dû procéder à l'échelonnage de nos catégories sur les données de Chouette. L'indice de mesure étant la largeur du feuillage, nous partons de **0 à 30 cm** pour une vigueur « Faible » puis nous prenons un **pas de 10 cm** jusqu'à la catégorie « Forte » qui est à **plus de 60 cm**. Cette dernière largeur correspond à la largeur de travail du rognage soit une taille maximum.

zone_de_vigueur	Parcelle	surface_RVS	surface_Chouette	différence
1	Plateau 99	0	0,09	-0,09
2	Plateau 99	0,53	1,21	-0,68
3	Plateau 99	1,22	0,46	0,76
4	Plateau 99	0,02	0,01	0,01
5	Plateau 99	0	0	0
1	Grand Penchant	0,32	0,29	0,03
2	Grand Penchant	0,79	0,35	0,44
3	Grand Penchant	0,68	0,62	0,06
4	Grand Penchant	0,08	0,25	-0,17
5	Grand Penchant	0	0,36	-0,36
1	Vieille Vigne	0,17	0,13	0,04
2	Vieille Vigne	0,89	0,61	0,28
3	Vieille Vigne	0,8	0,83	-0,03
4	Vieille Vigne	0,09	0,31	-0,22
5	Vieille Vigne	0	0,07	-0,07
1	Devant Bureau	0,01	0,04	-0,03
2	Devant Bureau	0,15	0,22	-0,07
3	Devant Bureau	0,13	0,04	0,09
4	Devant Bureau	0,01	0	0,01
5	Devant Bureau	0	0	0

zone_de_vigueur	Parcelle	surface_RVS	surface_Chouette	différence
1	Derrière Château	0,01	0,11	-0,1
2	Derrière Château	0,45	1,18	-0,73
3	Derrière Château	1,37	0,56	0,81
4	Derrière Château	0,02	0	0,02
5	Derrière Château	0	0	0
1	Acaccia	0	0,26	-0,26
2	Acaccia	0,38	0,38	0
3	Acaccia	0,47	0,21	0,26
4	Acaccia	0	0	0
5	Acaccia	0	0	0
1	Terasse	0,01	0,15	-0,14
2	Terasse	0,29	0,2	0,09
3	Terasse	0,2	0,15	0,05
4	Terasse	0	0	0
5	Terasse	0	0	0
1	Gresta	0	0	0
2	Gresta	0,22	0,13	0,09
3	Gresta	0,08	0,15	-0,07
4	Gresta	0	0,01	-0,01
5	Gresta	0	0	0

Tableau 5 : Surfaces par zones de vigueur issues de RVS et Chouette

Nous avons débuté l'analyse de nos données (cf. [Tableau 5](#)) par des tests d'**homogénéité des variances**, le test de Levene et celui de Bartlett : malheureusement, les deux résultats étaient opposés, car le premier certifiait l'homoscédasticité ($p\text{-value} = 0.2174$) quand le deuxième la niait ($p\text{-value} = 3.295 \times 10^{-5}$). Nous avons donc procédé au test ANOVA et un test non-paramétrique, celui de Kruskal-Wallis. Dans les deux cas, il est démontré qu'il n'y a **pas de différence de surfaces mesurées** par les deux capteurs ($p\text{-value} = 1$ et 0.9999). En dernier lieu, nous avons réalisé un test de corrélation de Spearman, plus approprié en raison de la non-normalité des données, afin d'évaluer la



compatibilité des mesures entre les deux capteurs. La p-value de 1.502×10^{-9} indique une **corrélation significative et relativement forte** ($\rho = 0,79$). Les formules, de chaque test, sont visualisable en [Annexe 21](#).

En conclusion de cette analyse, on peut consentir une **certaine fiabilité** des résultats issus des cartes Chouette et donc du poids de leurs données, mais en raison de l'hétérogénéité des variances révélée par le test de Bartlett, ces résultats doivent être **interprétés avec prudence**. Parallèlement, on peut rapprocher les cartes de vigueur et de détection de taches, et nous remarquons que les zones vigoureuses sont bien des zones à forte pression sanitaire sachant que nous avons des parcelles de Cabernet Franc et de Merlot, pouvant jouer sur la colorimétrie et la densité du feuillage.

D. 3 - Retour sur les déboires terrains rencontrés

Cette année a été **couronnée de soucis techniques** et de problématiques climatiques influant sur le nombre et la qualité des relevés de données. À cause des pluies répétées, associées à nos sols argileux, il a été difficile de multiplier les passages. Dans de telles conditions, il est important de prendre en compte le tassement du sol occasionné par le robot ainsi que les risques d'accidents sur les ceps en cas de « faux pas » du TED. Ces **passages limités** durant les premiers stades foliaires qui sont sensibles au mildiou, et pertinents avec la caméra verticale, ont **nettement impacté les résultats** et leur interprétation.

Par ailleurs, nous avons également subi des complications techniques sur le robot et l'équipement optique. Concernant le robot, des **problèmes de direction et de batteries** ont principalement amputé les sorties terrains. Il a fallu pour chaque panne des diagnostics et des interventions de la part de Naïo et de Claas qui ont retardé son utilisation. De surcroît, une **défaillance sur l'antenne** a immobilisé le robot. Même si les fournisseurs ont par la suite fourni un équipement de prêt, cela nous a empêché, une fois de plus, d'enchaîner les parcelles avec le robot.

Concernant la caméra de Chouette, deux soucis ont été prédominants. Le premier est l'émission des données très limitée de par la faible couverture réseaux de la propriété. Le second provient d'une **bulle d'eau qui s'est infiltrée** au niveau de l'objectif et a impacté l'entièreté d'un passage sur toutes les parcelles.

Tous ces freins techniques et technologiques ont largement **bouleversé** le calendrier initial de prises de données. Ne dépendant pas directement des fournisseurs, tel que Naïo ou Chouette, les désagréments que nous avons subis étaient pour certains **longs à visualiser**, analyser et donc à réparer.

Bien que ces contraintes aient perturbé nos activités sur le terrain, il est tout aussi primordial de focaliser nos efforts sur des **pratiques garantissant la durabilité** et la productivité du vignoble. Parmi celles-ci, la **détection et la gestion des pieds de vigne morts ou manquants (PMM)** jouent un rôle majeur, car elles permettent d'avoir une meilleure compréhension de l'état de santé du vignoble et d'ajuster les interventions en conséquence.

2 - Comptabilisation et géolocalisation des pieds improductifs

A - Détection des pieds manquants : stratégies et Importance

Les vignes présentant des pieds manquants ou morts représentent un défi important en viticulture. Ces absences peuvent être causées par **divers facteurs** comme les maladies, les parasites, les conditions climatiques extrêmes, ou des dégâts suite aux pratiques culturales. Les PMM se réfèrent



aux pieds de vigne qui sont morts et manquants, et sont **exprimés en pourcentage** par rapport à la densité initiale de plantation d'une parcelle. Par exemple, une parcelle initialement plantée à une densité de **6000 pieds par hectare** avec 1200 PMM présente un taux de 20 % de PMM, taux caractérisé dans la plupart des appellations comme le seuil maximum à ne pas dépasser, sous peine de **déclasser la parcelle**.

A. 1 - Importance de la comptabilisation des PMM

A.1.a - Évaluation de la santé du vignoble

Compter avec précision le nombre de pieds de vigne manquants ou morts est indispensable pour évaluer la santé globale du vignoble. Cela permet aux viticulteurs de détecter les problèmes potentiels et de mettre en place des mesures préventives ou correctives. En surveillant ces chiffres, ils peuvent ajuster leurs pratiques culturales pour **maintenir une densité de plantation optimale**, assurant ainsi une croissance saine des vignes.

A.1.b - Planification de l'arrachage et de la replantation

La comptabilisation précise des PMM joue un rôle essentiel dans la **planification de l'arrachage et de la replantation**. Cela permet aux viticulteurs de décider du moment opportun pour arracher la parcelle, ou remplacer les pieds défailants, évitant ainsi des périodes de sous-production. La tenue de ce registre est définie par l'article D. 644-22 du Code rural.

A.1.c - Implications économiques

Les PMM ont des implications économiques significatives sur le coût de revient et la rentabilité de l'exploitation. Ils entraînent une **réduction du rendement par hectare**, car une densité de plantation initiale non maintenue diminue la quantité totale de raisins récoltés. Moins de raisins signifie une production de vin réduite et, par conséquent, des pertes de revenus directes. Les viticulteurs doivent alors investir davantage pour maintenir la rentabilité.

Les travaux de complantation, incluant l'arrachage des pieds morts, la préparation du sol et la replantation de nouvelles vignes, représentent une dépense considérable. De plus, les opérations de taille et d'entretien sont plus complexes et nécessitent davantage de main-d'œuvre, donc plus coûteuse.

En résumé, la présence de pieds de vigne manquants ou morts dans une parcelle a un impact négatif sur la rentabilité. Cela se traduit par une réduction du rendement, une augmentation des coûts opérationnels associés à la replantation et à l'entretien, et une hausse des coûts de main-d'œuvre. Les viticulteurs doivent donc relever le défi de maintenir une densité de plantation optimale pour **assurer la viabilité économique** de leur exploitation tout en préservant la qualité des raisins et du vin produit. Une gestion proactive et précise des PMM est essentielle pour optimiser la production et garantir la durabilité du vignoble.

Le Château Fombrauge n'étant pas exempt de cette problématique, a décidé d'améliorer la détection de ses PMM afin de simplifier l'ensemble des travaux qui y sont associés.

B - Mise en place de la méthodologie

B. 1 - Les prémisses du développement

B.1.a - Origine de l'idée au sein du pôle R&D

A la naissance de ce projet, il s'agissait d'une conversation ordinaire entre l'ancien Directeur du pôle R&D M. Lecourt, et M. Massé chef de culture de Fombrauge. Ils discutaient sur cette problématique



de comptage de manquants lorsque l'idée a émergé de le faire en interne, avec un basique « **Compteur d'articles** ». Cette volonté de développement et de recherche s'ancre tout à fait dans la dynamique du groupe ainsi que dans celle du château où on retrouve cette intention de constamment innover.

B.I.b - Réflexion sur l'outil

Partant d'un compteur de ligne de production, nous pensions au début simplement poser le capteur sur le robot et relever le nombre d'éléments comptabilisés. Malheureusement, cela n'a pas été aussi simple. Il a fallu prendre en compte toutes **les imperfections qu'une parcelle**, menée sans herbicides, pouvait compter. En effet, dans l'idéal, nous aurions seulement relevé les pieds, les poteaux et possiblement les amarres, mais la réalité comporte des herbes hautes, des marquants, des mottes de terre qui peuvent rendre la prise de données compliquée.

C'est après avoir assisté aux **cours sur le codage en Arduino** que le capteur a pu évoluer. Il s'agissait désormais de concevoir un prototype capable d'**acquérir des données**, de les **géolocaliser** et de les **stocker**. Ce capteur « Low-Cost » pourrait alors déterminer les pieds productifs, les complants, les poteaux ainsi que les manquants. Il permettrait aussi de réaliser un **jumeau numérique des cartes** du robot TED et de les **mettre à jour à chaque passage** du robot pour analyser la qualité du travail du TED et donc compter les PMM.

B.I.c - Les différents facteurs de prises en compte

Afin que le capteur puisse produire un rendu final clair, il faut prendre en compte différents facteurs importants.

➤ Facteurs robotiques

Le comportement du robot est le facteur de réussite de ce compteur embarqué. Dans la mesure où il s'agit d'un outil programmé, son comportement sera le même à chaque extrémité et à l'intérieur du rang. Grâce à ça on peut chiffrer :

- **La vitesse dans le rang,**
- **La vitesse d'accélération et de décélération,**
- **Les zones de demi-tour.**

➤ Facteurs parcellaires

La connaissance du parcellaire est primordiale pour formater les données et les comprendre. La traçabilité et l'historique du Château Fombrauge sont irréfutables et permettent pour chaque parcelle de savoir :

- **Le nombre de pieds à la plantation,**
- **La densité de la parcelle,**
- **Le nombre de poteaux,**
- **L'espacement entre les pieds,**
- **L'espacement entre un pied et un poteau.**

Une fois ces facteurs pris en compte, il faut déterminer l'« **Entité** » qui sera catégorisée par la suite comme pied, marquant ou poteau. Pour arriver à cela, nous utilisons un capteur codé en Arduino (cf. [Annexe 18](#) & [19](#)). Nous allons détailler son fonctionnement en quelques points :



- Il est composé d'un capteur ultrason qui rend compte d'une **distance** : celle-ci permet de juger si un élément passe entre le capteur et le neutre (environ 1m). Si un élément se situe au niveau du rang, il sera **toujours à la même distance** du capteur, permettant ainsi de classer s'il s'agit d'un pied ou non.
- Selon le code réalisé, à chaque fois qu'un élément est proche du capteur (entre 10 cm et 50 cm), il **renverra un « 1 »**. Connaissant le **diamètre moyen** d'un tronc et la vitesse d'avancement, on peut déterminer un **nombre de « 1 » suffisant** pour caractériser un tronc.
- Cependant les troncs et les pieds peuvent avoir un **diamètre similaire**, il faut donc comparer la distance qui sépare l'« **Entité A** » avec l'« **Entité** » précédente et suivante. En effet, nous connaissons les facteurs parcellaires et robotiques ainsi que le temps entre les deux points (relevé de l'heure de chaque point), ce qui permet d'obtenir des distances entre les Entités ($d^1 = \text{distance } A-A^{-1}$ et $d^2 = \text{distance } A-A^{+1}$) et on les catégorise grâce au schéma ci-dessous (cf. [Schéma 3](#))

L'objectif final de ce matériel étant d'obtenir un **résultat compréhensible et pertinent**, un protocole a été rédigé en interne mais n'a pas encore pu être mis en pratique. C'est pourquoi nous avons travaillé avec Chouette pour tester leur caméra et leur protocole de comptage de manquants.

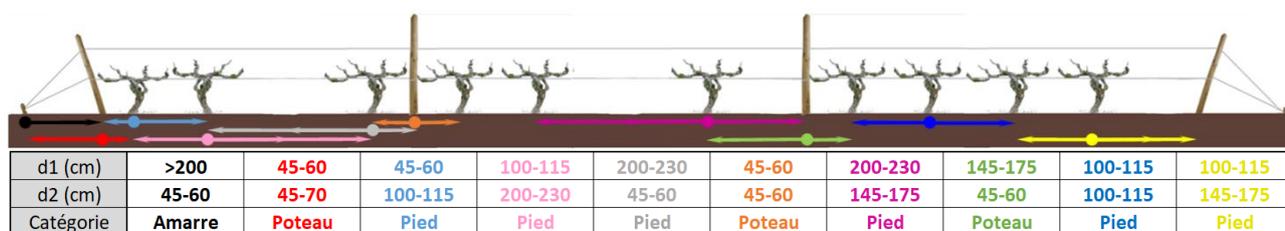


Schéma 3 : Représentation des mesures permettant de catégoriser les "Entités" en fonction de celles autour.

B. 2 - Le Projet de Chouette – Démarche et développement

Lors de la signature du devis pour l'analyse des images par Chouette, il a été question d'**optimiser cette dépense** en participant activement au développement de leur **projet de recherche**. Dans le but de comprendre correctement les attentes des deux parties, plusieurs entretiens ont été programmés. Du côté du Château Fombrauge, son chef de culture voulait en effet travailler avec la caméra latérale de chouette afin de **comptabiliser les PMM** mais aussi de commencer à travailler sur la **détection de maladies sur grappe**. Ce nouveau capteur est un dispositif conçu actuellement seulement pour la reconnaissance de PMM et c'est ce protocole que nous avons mis en place au sein de la propriété après la pose de ce deuxième matériel.

En contact direct avec les équipes du projet, dans lequel s'ancre le mémoire d'Alexandre Milazzo, nous avons pu échanger lors d'entretiens et de visites, des **attentes clients**, mais aussi de leurs **perspectives de résultats**. Selon le protocole terrain établi par Chouette, la prise de données à pied sur des rangs témoins s'alterne, avec le passage des différents capteurs pour retranscrire des résultats de PMM en décembre. Ce sont des spécificités que nous avons prises en compte et incorporées à notre protocole de détection de PMM pour se servir des mêmes témoins et vérifier la véracité du capteur Low-Cost (cf. [Annexe 20](#)).

C - Interprétation des résultats

C.1 - Résultats intermédiaires et attendus de Chouette

C.1.a - Les résultats fournis actuellement

Au regard des dates normales de restitution de résultats, en décembre, l'équipe de Chouette nous a tout de même transmis des **résultats intermédiaires** que l'on peut retrouver sur leur plateforme. On y voit les rangs composés de points où ceux de couleur rouge sont représentatifs de pieds à complanter (cf. [Image 19](#)). Cette carte permet de **chiffrer le nombre de manquants** même si on remarque que des rangs ne possèdent pas d'analyses ce qui pourrait accroître le nombre de pieds manquants. Cette carte est exclusivement sur le Web et ne permet pas une utilisation pratique pour des prestataires, cependant la possibilité de se **géolocaliser est utile** si l'on veut constater en direct l'absence du cep.



[Image 19](#) : Cartographie des pieds à complanter (droite) et la photo prise par la caméra verticale - Parcelle Devant Bureau

C.1.b - Les attentes finales du client

Au cours de nos échanges avec Chouette, un des sujets clés était les attentes client sur la visualisation des données, le nombre, **leur utilité et leur évolution**. Il fallait bien sûr que ceux-ci s'accordent avec leurs objectifs. À la fin des conversations, une idée est ressortie : concevoir une application (cf. [Image 20](#)) qui permettrait de voir les pieds manquants (points rouges) ainsi que les rangs des parcelles où ils se situent (rangs rouges). Cette application pourrait contenir toutes les informations sur le pied :

- Date de visualisation de PMM
- Numéro de rang
- Date d'arrachage
- Date de complantation
- Premier arrosage
- Date de mise en production
(calculé avec année de replantation +3)
- Cépage
- Age



Image 20 : Visualisation de l'interface attendue par le château pour les résultats de PMM issus des capteurs Chouette

Ce point rouge pourrait alors évoluer en bleu une fois le pied de vigne replanté mais improductif, et passer vert une fois productif changeant de ce fait la couleur du rang. Cette carte interactive et évolutive pourrait permettre **un réel suivi** des complants dans une propriété viticole.

C. 2 - Les attentes du capteur Low-Cost

Concernant le capteur développé en interne, l'objectif est de concevoir une carte KMZ utilisable en premier lieu sous Google Earth. C'est en effet un outil dont le château se sert beaucoup lors de la visualisation de carte et qui est donné tantôt aux tractoristes pour l'épandage tantôt aux ouvriers à pied pour des relevés terrains. L'aspect devra être **proche de celui attendu par Chouette** (cf. [Image 20](#)) et comporter les points et les informations complémentaires. La carte ne sera pas interactive mais sera mise à jour à chaque passage du robot et donc du capteur.

Pour que le projet soit viable, le point névralgique est le **bon stockage des données** afin d'obtenir un historique que l'on pourra utiliser lors de **rapports de complantation** et de santé du vignoble, lesquels peuvent être réclamés par les institutions lors de la déclaration de récolte ou lors de présentation du Château pendant des réunions du Groupe Bernard Magrez.

C. 3 - Les utilisations au Château Fombrauge

C.3.a - L'importance pratique

Ces cartes et ces données créées seront très utiles pour la propriété de par leur simplicité et pour le **gain de temps** engendré lors de tâches comme :

- L'arrachage des pieds improductifs par les prestataires,
- La complantation faite par le Château,
- La pose de marquants pour protéger le complant,
- L'arrosage fait jusqu'à 3 fois par an sur les 3 premières années en fonction de la pluviométrie,
- L'attachage fait tous les ans afin de maintenir une bonne pousse et l'intégrité du pied,
- La taille s'il est nécessaire de réaliser un passage différent du reste de la parcelle.

Que ce soit pour les prestataires ou les employés, il est intéressant d'avoir, sur une tablette ou un smartphone, une carte permettant de **localiser**, et de se rendre au pied manquant ou complant afin d'être plus **productif et rentable**.

C.3.b - L'importance économique

En parallèle de rendre la gestion des complants plus rapide, un outil comme ceux évoqués plus haut pourrait permettre de **diminuer le coût d'un complant**. Dans notre étude, nous avons pris en exemple la parcelle « Plateau 99 » composée de **120 rangs sur 2Ha**. Cette année, nous avons complanté **124 plants** que nous avons géolocalisé manuellement. Au lieu de parcourir **60 rangs** afin de couvrir tous les rangs (2 rangs par passage) sans savoir où étaient les plants, il suffisait d'en faire **28**.

On retrouve dans le [Tableau 6](#) l'impact de ce changement sur le coût d'un complant avant sa mise en production au bout de 3 ans. On y remarque un net gain sur le temps passé dans la parcelle et donc une **économie potentiel de 7% sur la facturation**.

								Coût main d'œuvre sans géolocalisation	Coût main d'œuvre avec géolocalisation	
								Nombre de passages	12	12
								Temps par passages (min)	49	24
								Temps total (heures)	9,8	4,8
								Tarif horaire - brut chargé	147,00 €	72,00 €
								Coût au complant	1,19 €	0,58 €
Prix	Plant	Arrache/Préparation du trou	Marquants (2)	Terreau	Prix intermédiaire	Arrosage	Taille (au pied)	Gain économique sur le temps optimisé	0,60 €	
	1,50 €	2,24 €	1,60 €	0,10 €		2,50 €	0,50 €			
Coût évolutif du complant	1,50 €	3,74 €	5,34 €	5,44 €	5,44 €	7,94 €	8,44 €	Gain sur le Coût du complant final	7%	

Tableau 6 : Pourcentage de gain économique de la géolocalisation des complants - Plateau 99 (2024)

Cependant, ces chiffres varieront à chaque parcelle et dépendront de la disposition des rangs ainsi que du nombre de complants. Selon nos résultats, nous pouvons estimer que **plus le pourcentage de complants dans la parcelle est petit, plus les gains seront importants**. Ces gains sont essentiels lors de la **négociation des tarifications des travaux**. Souvent facturé plus cher à l'heure, notre utilisation de la géolocalisation des complants permettrait d'obtenir exclusivement des tarifs au plant.

Synthèse de la Partie 3

- Le Château Fombrauge a réalisé divers protocoles afin de visualiser l'efficacité du capteur Chouette et spécialement axé sur la détection de taches et la catégorisation de PMM.
- Comparé à un capteur fiable (GreenSeeker) la technologie de Chouette semble performante.
- La prise de données a été troublée par des incidents climatiques et technologiques.
- En plus de la possible utilisation du capteur Chouette, la propriété tente de développer en interne un outil Low-Cost pour subvenir à un besoin dans la gestion de ses complantations.

Discussions

1 - Bilan du travail réalisé

La robotique offre de nombreux axes de développement viticole au Château Fombrauge. Il a été difficile de cerner un seul sujet et une seule expérience, d'où le choix de **tenter de mettre en commun plusieurs expérimentations**. Aux prémices de ce projet, il a été utile de procéder à un état des lieux des technologies présentes sur la propriété, de discerner leur utilisation, leur objectif et enfin de réfléchir à la pertinence de les traiter dans un projet de fin d'étude. Ces équipements étaient inscrits dans la poursuite de marche en avant du pôle R&D encadré par M. Julien Lecourt. A mon arrivée au château, il fut désigné comme l'un des encadrants de mon apprentissage. A son départ, à mi-parcours de mon contrat d'apprentissage, sa **mission de contact avec les prestataires** et fournisseurs ainsi que les objectifs de chaque matériel est revenue au directeur et chef de culture de Fombrauge, et par ricochet, à moi-même en ma qualité d'apprenti.

Dans ce contexte de changement, il a été important de **rencontrer toutes les parties prenantes** du projet, les sociétés Naïo Technologies, Claas et Chouette Vision, et de **prendre part aux décisions** sur les ambitions du domaine concernant le robot ainsi que l'avenir des différents capteurs. Mes missions ont donc été diversifiées et ponctuées de formations externes, afin de **gagner en autonomie** sur le rôle qui m'a été attribué par mes responsables. Mes tâches comprenaient l'agrandissement du parcellaire cartographié mais aussi la **formation interne d'autres employés** pour la création des données GPS et l'utilisation du TED. Pour ce faire, il m'a été demandé de rédiger plusieurs types de protocoles, actions que j'avais déjà réalisées pour des expérimentations sur la taille et la pesée de bois.

Ces technologies sont parfois **difficiles à cerner** ou sont **idéalisées**. Il est nécessaire que tous les employés du Château Fombrauge saisissent leur nécessité et leur utilité. C'est pourquoi une de mes actions était de **présenter ces outils** au personnel du chai, de l'œnotourisme et de l'administration afin qu'ils puissent comprendre l'objectif de ces investissements et que possiblement ils l'évoquent lors des visites professionnelles ou dans la sphère privée.

2 - Contraintes et limites

Problèmes liés aux capteurs

Les retours de cette étude ont montré que le procédé de la détection de mildiou est **plutôt pertinent sur les premiers stades foliaires** mais se révèle moins adapté par la suite quand la nécessité devient alors celle de visualiser la présence de maladie sur grappe. Par ailleurs, nous savons que Chouette arrête la détection de mildiou début août pour basculer sur les maladies de dépérissement, ce qui peut s'entendre d'un point de vue végétal. Toutefois les prises de vues faites par la caméra verticale, pourraient être suppléées par la caméra latérale afin d'observer la propagation et l'impact de la maladie sur grappe, mais la question sur l'aspect et la représentation des données reste un problème quant à la qualité de leur interprétation par le client.

Une des limites de l'étude a été le problème de **cohabitation des capteurs** GreenSeeker et Chouette. Tous deux branchés sur le robot sur le même flux électrique, les données du capteur Chouette ont été erronées suite à un **dysfonctionnement du boîtier**, ce qui a engendré un biais non-négligeable dans la comparaison des données de vigueur. En effet, le protocole initial voulait que l'on passe les



deux capteurs à un **même instant « T »** afin de **neutraliser le paramètre de la date de passage**. Cette défaillance technique devra être corrigée dans le cas où l'analyse voudrait être retentée.

Problèmes liés au robot

Cette étude a principalement été impactée par des soucis liés aux capteurs et leur prise de données. Néanmoins, le robot de chez Naïo Technologies a aussi été la cause de dysfonctionnements dans la réalisation du protocole.

Contraint de faire appel aux techniciens pour acter différentes observations, le robot a été **immobilisé un certain temps** dans l'année pour des problèmes liés aux roues, à l'antenne ou même aux batteries. Bien que tout ceci ait pu être réglé, nous avons subi d'autres anomalies techniques lors de nos passages.

Dans un premier temps, nous pouvons déplorer des **connectiques fragiles** concernant la direction des roues, ou une résistance altérée ayant limité le bon fonctionnement du robot. Ce dernier point devra être résolu si l'entreprise veut que le robot soit à **100% efficace et autonome**.

Dans un second temps, nous relevons des **arrêts fréquents** lors des passages, dûs à une faible couverture réseau mais aussi à des ballants trop importants provoquant une position incertaine du compas et donc un arrêt du robot. Ces nombreux arrêts pourraient **entacher les travaux sur le capteur Low-Cost**, qui est actuellement calibré sur la vitesse du TED. De ce fait, si un arrêt se produit, on aura une décélération et une nouvelle accélération et dont il faudra tenir compte dans l'**évolution du fonctionnement** de ce capteur.

3 - Perspectives d'évolution

Le but de cette étude était d'utiliser le TED comme support de capteurs embarqués afin de déceler des éléments problématiques dans la gestion d'un vignoble. Il s'agit indubitablement de la **finalité de la robotique agricole**. Il est donc important de continuer à **déployer et développer** de tel capteurs.

La propriété s'est engagée dans une démarche de progrès et il est important pour elle de continuer ce process, encore imparfait, d'autant que les équipements actuels demandent du temps pour s'améliorer et **aboutir à une version définitive**.

Ce projet pourrait être porté à nouveau lors d'un apprentissage, ou stage afin de parfaire l'expérimentation et répondre complètement aux problématiques du Château. De nouvelles sociétés, dont les outils proposés sont pertinents, pourraient-elles aussi intégrer le projet.

Concernant les capteurs actuels, la question de la **pérennité des données** est primordiale. Dans un souci de traçabilité, de construction de dossier de classement ou bien de présentation interne au Groupe Bernard Magrez, il peut s'avérer utile de réfléchir aux **modalités de stockage des données**, ainsi qu'à un support visuel exploitable facilement. Ainsi pourrait-on imaginer des cartes et des bilans réalisés sur une interface telle que **Power BI**, outil qui a été travaillé et conçu par Paulin Rocque lors de son projet de fin d'étude l'an passé au pôle R&D du Groupe Bernard Magrez, et **relier ainsi les deux projets** pour construire un programme complet à usage interne, au profit de l'ensemble des salariés du groupe.

Conclusion

La pénibilité du travail et la complexité pour trouver des employés viticoles sont des contraintes favorisant, plus ou moins directement, le **développement des technologies robotisées** dans le secteur agricole. Par ailleurs, on remarque une vraie **fluctuation des pressions sanitaires** sur les vignobles démontrant la nécessité de maintenir une surveillance accrue de l'état de santé des parcelles. Les travaux réalisés dans ce projet d'ingénieur ont eu pour but de mettre en évidence **l'impact de l'ajout de capteurs embarqués sur un outil robotisé**, en faisant l'état des lieux des besoins du château, ainsi que de présenter les outils présents sur le domaine et leurs utilisations. Actuellement, malgré des obstacles qui subsistent et que des désaccords puissent apparaître, la robotique offre des **perspectives prometteuses** pour l'avenir de la viticulture. Elle propose des solutions novatrices pour faire face aux défis actuels du secteur, en favorisant une production plus durable et plus efficace, tout en optimisant l'utilisation des ressources et en réduisant la dépendance à une main-d'œuvre de plus en plus rare.

La détection de maladies et la géolocalisation des pieds improductifs sont deux problématiques qui **nécessitent une attention particulière** au regard de leur répercussion sur une production. Un bon repérage des zones présentant des symptômes de maladie peut permettre une modification de la stratégie phytosanitaires. En parallèle, une représentation précise des pieds morts ou manquants permet un gain de temps, et donc financier, non négligeables au sein d'une propriété viticole.

Ce mémoire a permis de mettre en exergue l'influence des capteurs embarqués dans la gestion d'un vignoble : on remarque que les **résultats sont mitigés** et que ces outils **méritent un perfectionnement** pour répondre entièrement aux besoins et aux attentes d'un exploitant. Toutefois, il s'agit d'un axe fondamental de la robotique et de l'automatisation des travaux viticoles.

Ce projet se veut comme un **travail préliminaire** des possibles évolutions de la technologie au sein du vignoble.

Les travaux de recherche pour la caractérisation des pieds atteints de mildiou et la catégorisation des pieds improductifs sont en **constante évolution** et des **améliorations sont envisageables**. La position des capteurs, leur fonctionnement et les Intelligences Artificielles deviendront de plus en plus performants à l'avenir, et pourront être de nouveaux analysés pour aider les exploitants agricoles dans leurs prises de décisions stratégiques et financières, afin de **développer et de pérenniser leurs entreprises**.

Bibliographie

- «  Comptage / Contrôle : Pieds de Vignes Manquants (PMM) ». Consulté le 29 mars 2024. <https://www.agribio-drone.com/filieres/viticulture/comptage-pieds-vigne-manquants/>.
- « Agriculture : le rôle clé de la robotique | vie-publique.fr ». Consulté le 28 mars 2024. <https://www.vie-publique.fr/en-bref/285381-agriculture-le-role-cle-de-la-robotique>.
- agrilor_admin. « Comment réussir sa complantation de vignes ? » *AGRILOR* (blog), 21 septembre 2021. <https://agrilor.fr/reussir-sa-complantation-de-vignes/>.
- Bellvert, J., M. Mata, X. Vallverdú, C. Paris, et J. Marsal. « Optimizing Precision Irrigation of a Vineyard to Improve Water Use Efficiency and Profitability by Using a Decision-Oriented Vine Water Consumption Model ». *Precision Agriculture* 22, n° 2 (1 avril 2021): 319-41. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09718-2>.
- Biarnès, Anne, Patrick Andrieux, Jean Marc Barbier, Aurélien Bonnefoy, Claude Compagnone, Xavier Delpuech, Christian Gary, Aurélie Metay, Jean-Pierre Rellier, et Marc Voltz. « Evaluer par modélisation des stratégies de réduction des usages d’herbicides dans les bassins versants viticoles ». *Innovations Agronomiques* 57 (2017): 141-52. <https://doi.org/10.15454/1.5137823967929834E12>.
- Bubola, Marijan, Sara Rossi, Kálmán Zoltán Váczy, Ádám István Hegyi, Martina Persic, Goran Zdunić, Ena Bestulić, Fumica Orbaníć, Zsolt Zsofi, et Sanja Radeka. « Modification of Cv. Merlot Berry Composition and Wine Sensory Characteristics by Different Leaf Area to Fruit Ratios ». *Applied Sciences* 13, n° 9 (2023): 5465-. <https://doi.org/10.3390/app13095465>.
- Casteran, P., Philippe Leclair, et Roger Pouget. « Comparaison de Différentes Techniques d’entretien Du Sol Dans Le Vignoble Bordelais Durant Une Longue Période ». *OENO One* 9, n° 1 (31 mars 1975): 7-15. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.1975.9.1.1665>.
- Christen, Maxime. « Château Fourcas Dupré: zonage pédologique, état des lieux et plan de gestion du vignoble ». *VITI. Sciences Agro*, 2002.
- Clem. « Préserver son vignoble : la technique de la complantation ». *Dico du vin, le dictionnaire du vin*, 13 décembre 2018. <https://dico-du-vin.com/la-technique-de-la-complantation/>.
- Combe, Juliette. « Validation agronomique d’un outil d’estimation précoce du rendement viticole ». *VITI. Sciences Agro*, 2016.
- « Comment suivre le risque gel ? » Consulté le 2 mai 2024. <https://www.vignevin.com/article/comment-suivre-le-risque-gel/>.
- « Consommation | FranceAgriMer - établissement national des produits de l’agriculture et de la mer ». Consulté le 11 août 2024. <https://www.franceagrimer.fr/filieres-Vin-et-cidre/Vin/Eclairer/Etudes-thematiques/Consommation?moteur%5BfiltreDate%5D=0&moteur%5BfiltreTypeContenu%5D=bilan&moteur%5BfiltreFiliere%5D=1508&recherche-search=>.



CHÂTEAU
FOMBRAUGE

Bernard Magrez



CymDrones. « Viticulture de précision ». Consulté le 29 mars 2024.
<https://www.cymdrones.com/viticulture-de-precision/>.

« Définition d'un plan de restructuration du vignoble prenant en compte les enjeux environnementaux, sociaux, sociétaux, économiques et commerciaux du Château Luchey-Halde - Bordeaux Sciences Agro ». Consulté le 25 mars 2024.
https://babordplus.hosted.exlibrisgroup.com/primos-explore/fulldisplay/33PUBD_Alma_Unimarc71109649940004671/33PUBD_BXSA_VU1.

Deliere, Laurent, Marie Rougier, Emeric Emonet, Emeric Pillet, Xavier Burgun, David Lafond, Héloïse Mahé, Raphael Metral, Eric Serrano, et Marie Thiollet-Scholtus. « Réseau DEPHY EXPE : Synthèse des résultats à mi-parcours à l'échelle nationale - filière Viticulture ». Technical Report. Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 2016. <https://hal.science/hal-02016730>.

Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte) (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) (s. d.). Consulté le 28 mars 2024.

Döring, Johanna, Matthias Frisch, Susanne Tittmann, Manfred Stoll, et Randolf Kauer. « Growth, Yield and Fruit Quality of Grapevines under Organic and Biodynamic Management ». *PloS One* 10, n° 10 (2015): e0138445-e0138445. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138445>.

Drappier, Julie, Cécile Thibon, Amélie Rabot, et Laurence Geny-Denis. « Relationship between wine composition and temperature: Impact on Bordeaux wine typicity in the context of global warming—Review ». *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 59, n° 1 (2 janvier 2019): 14-30. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1355776>.

Elman Bahar, Alain Carbonneau and Ilknur Korkutal. « The Effect of Extreme Water Stress on Leaf Drying Limits and Possibilities of Recovering in Three Grapevine (*Vitis Vinifera* L.) Cultivars », 10 janvier 2011. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.778>.

« Enquête pratiques culturelles en viticulture 2019 - Principaux résultats | Agreste, la statistique agricole ». Consulté le 1 mai 2024. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2315/detail/>.

« Etude technico-économique de la restructuration du vignoble en vue d'une augmentation de la production de 1er vin : extension de la réflexion au développement de la vente de vin du domaine auprès des particuliers - Bordeaux Sciences Agro ». Consulté le 25 mars 2024.
https://babordplus.hosted.exlibrisgroup.com/primos-explore/fulldisplay/33PUBD_Alma_Unimarc7167008950004671/33PUBD_BXSA_VU1.

Ferro, Massimo Vincenzo, et Pietro Catania. « Technologies and Innovative Methods for Precision Viticulture: A Comprehensive Review ». *Horticulturae* 9, n° 3 (mars 2023): 399. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030399>.

FIRAteam. « Les robots au service de la vigne », 13 juin 2020. <https://www.agricultural-robotics.com/fr/actualite/robots-autonomes-viticulture>.



France, Chambres d'agriculture. « Des robots parmi les vignes », 26 mars 2024. <https://chambres-agriculture.fr/actualites/toutes-les-actualites/detail-de-lactualite/actualites/des-robots-parmi-les-vignes/>.

France Inter. « La vigne et le vin face au changement climatique », 17 avril 2024. <https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/la-terre-au-carre/la-terre-au-carre-du-mercredi-17-avril-2024-8999385>.

Fuentes, Sigfredo, Eden Tongson, et Claudia Gonzalez Viejo. « New Developments and Opportunities for AI in Viticulture, Pomology, and Soft-Fruit Research: A Mini-Review and Invitation to Contribute Articles ». *Frontiers in Horticulture* 2 (11 octobre 2023). <https://doi.org/10.3389/fhort.2023.1282615>.

Greenshield. « VineMapper ». Consulté le 18 mars 2024. <https://www.greenshield.fr/vinemapper>.

Guide du viticulteur en Bourgogne. « Registre des Pieds Morts ou Manquants (PMM) ». Consulté le 29 mars 2024. <https://www.guide-viticulteur.com/node/525>.

Hnatiuc, Mihaela, Simona Ghita, Domnica Alpetri, Aurora Ranca, Victoria Artem, Ionica Dina, Mădălina Cosma, et Mazin Abed Mohammed. « Intelligent Grapevine Disease Detection Using IoT Sensor Network ». *Bioengineering* 10, n° 9 (septembre 2023): 1021. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10091021>.

Hussenet, Loïc. « Détection de manquants en viticulture ». DRONES IMAGING, 14 avril 2023. <https://www.dronesimaging.com/comptage-automatise-de-pieds-de-vigne-pour-la-detection-des-manquants/>.

IFV Occitanie. « Robots et capteurs : le vignoble 2.0 ». Consulté le 18 mars 2024. <https://www.vignevin-occitanie.com/nos-recherches-2/viticulture-de-precision/robots-et-capteurs/>.

« ISVV - Le millésime 2023 à Bordeaux... » Consulté le 2 mai 2024. <https://www.isvv.u-bordeaux.fr/fr/actualites/le-millesime-2023-a-bordeaux.html>.

Jones, Gregory V., et Robert E. Davis. « Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France ». *American Journal of Enology and Viticulture* 51, n° 3 (1 janvier 2000): 249-61. <https://doi.org/10.5344/ajev.2000.51.3.249>.

Kerkech, Mohamed, Adel Hafiane, et Raphael Canals. « VddNet: Vine Disease Detection Network Based on Multispectral Images and Depth Map ». *Remote Sensing* 12, n° 20 (janvier 2020): 3305. <https://doi.org/10.3390/rs12203305>.

Kerkech, Mohamed, Adel Hafiane, Raphael Canals, et Frederic Ros. « Vine Disease Detection by Deep Learning Method Combined with 3D Depth Information ». In *Image and Signal Processing*, édité par Abderrahim El Moataz, Driss Mammass, Alamin Mansouri, et Fathallah Nouboud, 82-90. Cham: Springer International Publishing, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51935-3_9.

Konan, Marie Yvette Elisee. « Vins en péril: dans le Bordelais, l'arrachage est une fausse bonne solution ». The Conversation Media Group, juin 2023. <https://hal.science/hal-04159255>.

Korkutal, I., A. Carbonneau, et E. Bahar. « Effects of Early Water Stress Levels on Berry Set and Berry Development in Merlot Cv. (*Vitis Vinifera* L.) ». *African Journal of Biotechnology* 10, n° 71 (2011): 15921-32. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2513>.



CHÂTEAU
FOMBRAUGE

Bernard Magrez



Korkutal, Ilknur, Elman Bahar, et Alain Carbonneau. « Early water stress effects on pollen viability, berry set and embryo development in cv. “Syrah” (*Vitis vinifera* L.) ». *Horticultural Science* 46, n° 4 (31 décembre 2019): 215-23. <https://doi.org/10.17221/110/2018-HORTSCI>.

« L_2006157FR.01002401.xml ». Consulté le 28 mars 2024. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A32006L0042>.

« Le remplacement des manquants ou complantation | Institut Français de la Vigne et du Vin ». Consulté le 25 mars 2024. <https://www.vignevin.com/publications/fiches-pratiques/le-remplacement-des-manquants-ou-complantation/>.

« Les pluies remontent les rendements de vin 2021 à Bordeaux, Champagne et Cognac ». Consulté le 25 avril 2024. <https://www.vitisphere.com//actualite-94992-les-pluies-remontent-les-rendements-de-vin-2021-a-bordeaux-champagne-et-cognac.html>.

Meier, Michael, Jürg Fuhrer, et Annelie Holzkämper. « Changing Risk of Spring Frost Damage in Grapevines Due to Climate Change? A Case Study in the Swiss Rhone Valley ». *International Journal of Biometeorology* 62, n° 6 (2018): 991-1002. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1501-y>.

Méraz, Patrick. « Rachat d'un vignoble: chronique d'une restructuration difficile ». VITI. Bordeaux Sciences Agro, 2006.

Metay, Aurélie, Léo Garcia, Elena Kazakou, et Guillaume Fried. « Effet des couverts sur la flore en viticulture ». *Agronomie, Environnement & Sociétés* 12, n° 1 (2022): 1. <https://doi.org/10.54800/prt789>.

mrudedame#utilisateurs. « La robotique agricole ». Text. mconche#utilisateurs, 6 mai 2021. Fr. <https://www.ensat.fr/fr/ensat/ateliers-du-developpement-durable/la-robotique-dans-l-agriculture.html>.

« Observatoire des usages du numérique en agriculture – Une action soutenue par la Chaire AgroTIC et l'Institut Convergences #DigitAg. », 16 mai 2023. <https://agrotic.org/observatoire/>.

Papy, Louis. « Le vignoble de Bordeaux et son climat ». *Annales du Midi* 78, n° 77 (1966): 191-99. <https://doi.org/10.3406/anami.1966.5034>.

Poblete-Echeverría, Carlos, et Javier Tardaguila. « Digital Technologies: Smart Applications in Viticulture ». In *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies*, édité par Qin Zhang, 1-13. Cham: Springer International Publishing, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89123-7_206-1.

POULAIN, Sylvain. « BIG DATA : Relevé drone sur une commune de 33km² ». *GISCAN* (blog), 18 septembre 2016. <https://gisscan.com/fr/bigdata-releve-drone-33km/>.

« Quatre choses à savoir sur la rentabilité des robots viticoles », 2 janvier 2024. <https://www.tema-agriculture-terroirs.fr/mon-viti/materiel/quatre-choses-a-savoir-sur-la-rentabilite-des-robots-viticoles-886986.php>.

Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée. « Aider les agriculteurs à sortir du glyphosate par l'enherbement – Europe en Occitanie », 5 février 2021. <https://www.europe-en-occitanie.eu/Aider-les-agriculteurs-a-sortir-du-glyphosate-par-l-enherbement>.



CHÂTEAU
FOMBRAUGE

Bernard Magrez



Rideau, Philippe. « Stratégie d'entreprise: achat et restructuration d'un vignoble du bordelais, le château de Cadillac ». VITI. Bordeaux Sciences Agro, 1991.

Rochard, J., C. Monamy, B. Pauthier, et A. Rocque. « Stratégie et équipements de prévention vis-à-vis du gel de printemps et de la grêle. Perspectives en lien avec les changements climatiques, projet ADVICLIM ». Édité par Jean-Marie Aurand. *BIO Web of Conferences* 12 (2019): 01012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191201012>.

Rochard, Joël. « Evolution des pratiques viticoles françaises : de la viticulture raisonnée à l'agroécologie ». *BIO Web of Conferences* 9 (2017): 01010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20170901010>.

« Satellites, drones, capteurs : l'imagerie au service du viticulteur | Réussir Vigne », 18 mars 2024. <https://www.reussir.fr/vigne/limagerie-au-service-du-viticulteur>.

Simonneau, Thierry T., Nathalie Ollat, Anne Pellegrino, et Eric Lebon. « Contrôle de l'état hydrique dans la plante et réponses physiologiques de la vigne à la contrainte hydrique ». *Innovations Agronomiques* 38 (2014): 13. <https://hal.inrae.fr/hal-02629834>.

« Stratégie de restructuration d'un vignoble sur le déclin : hiérarchisation des investissements et perspectives de rentabilité à court, moyen et long termes - Bordeaux Sciences Agro ». Consulté le 25 mars 2024. https://babordplus.hosted.exlibrisgroup.com/primos-explore/fulldisplay/33PUBD_Alma_Unimarc7166980190004671/33PUBD_BXSA_VU1.

« Structure et histoire simplifiées - SIGES Aquitaine - ©2024 ». Consulté le 11 août 2024. <https://sigesaqi.brgm.fr/Structure-et-histoire-simplifiees.html>.

Terre-net. « Quel avenir pour les robots en grandes cultures ? » Consulté le 28 mars 2024. <https://www.terre-net.fr/materiels-agricoles/article/843116/quel-avenir-pour-les-robots-en-grandes-cultures>.

VineView. « Détection des Pieds Manquants ». Consulté le 29 mars 2024. <https://vineview.fr/produits/detection-des-pieds-manquants/>.

VineView. « Notre technologie ». Consulté le 29 mars 2024. <https://vineview.fr/notre-technologie/>.

« Viticulture. Hausse de la production viticole en 2023, mais des ventes en net repli sur le début de la campagne de commercialisation | Agreste, la statistique agricole ». Consulté le 1 mai 2024. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/SynVit24418/detail/>.

« Vrai-faux sur les robots viticoles », 28 février 2022. <https://www.tema-agriculture-terroirs.fr/mon-viti/materiel/vrai-faux-sur-les-robots-viticoles-886984.php>.

Zito, Sebastien, Julien Pergaud, Yves Richard, Thierry Castel, Renan Le Roux, Iñaki García de Cortázar-Atauri, Hervé Quenol, et Benjamin Bois. « Projected Impacts of Climate Change on Viticulture over French Wine Regions Using Downscaled CMIP6 Multi-Model Data: This Article Is Published in Cooperation with the 22nd GiESCO International Meeting, Hosted by Cornell University in Ithaca, NY, July 17-21, 2023. » *OENO One* 57, n° 2 (20 juin 2023): 431-46. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7441>.

ANNEXES

ANNEXE 1 : CARTE DE L'ORIENTATION TECHNICO-ECONOMIQUE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES (OTEX) DOMINANTE PAR COMMUNE

ANNEXE 2 : CARTOGRAPHIES DE COURBES DE NIVEAUX ET LOCALISATION DE FOSSES PEDOLOGIQUES

ANNEXE 3 : CARTOGRAPHIES DES SOLS DU CHATEAU FOMBRAUGE – ZONE NORD ET ZONE SUD

ANNEXE 4 : VARIATION DES PLUIES ET DES TEMPERATURES DU CHATEAU FOMBRAUGE (2014-2024) ET D'UNE PARCELLE TEST (PLATEAU 99) – OAD DECITRAIT ET DEMETER

ANNEXE 5 : SCHEMAS EXPLICATIFS DE L'APPARITION DES DIFFERENTS GELS

ANNEXE 6 : ORGANIGRAMME DU CHATEAU FOMBRAUGE EN 2024

ANNEXE 7 : REPARTITION DES CEPAGES AU CHATEAU FOMBRAUGE - ZONE NORD ET ZONE SUD (SOURCE LAVILOG)

ANNEXE 8 : LISTE NON-EXHAUSTIVE DES ROBOTS VITICOLES ACTUELLEMENT SUR LE MARCHE

ANNEXE 9 : PHOTO DU ROBOT VITICOLE DE NAÏO TECHNOLOGIES, TED (V2)

ANNEXE 10 : DESCRIPTION DES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU TED (VUES LATERALES)

ANNEXE 11 : DESCRIPTION DES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU TED (VUES FRONTALES)

ANNEXE 12 : LISTE NON-EXHAUSTIVE DES CAPTEURS EMBARQUES EN DEVELOPPEMENT OU SUR LE MARCHE

ANNEXE 13 : ACCUEIL DE L'INTERFACE DE EASYMAPPING

ANNEXE 14 : CARTOGRAPHIE DES PARCELLES CARTOGRAPHIEES POUR LE ROBOT AU SEIN DU CHATEAU FOMBRAUGE

ANNEXE 15 : SCHEMA RELATIONNEL DES PARTIES PRENANTES SUITE A L'ARRIVE DU ROBOT TED – ÉTAT DES LIEUX 2024

ANNEXE 16 : SCHEMA DU CYCLE DE VIE DU MILDIOU (VIGNEVIN)

ANNEXE 17 : INTERFACE WEB DE CHOUETTE VIEW (SANS ANALYSE)

ANNEXE 18 : PHOTOGRAPHIE DU CAPTEUR LOW-COST, CODE EN ARDUINO AVEC LE DETAIL DES COMPOSANTS + IMAGE 3D DU CAPTEUR FINAL

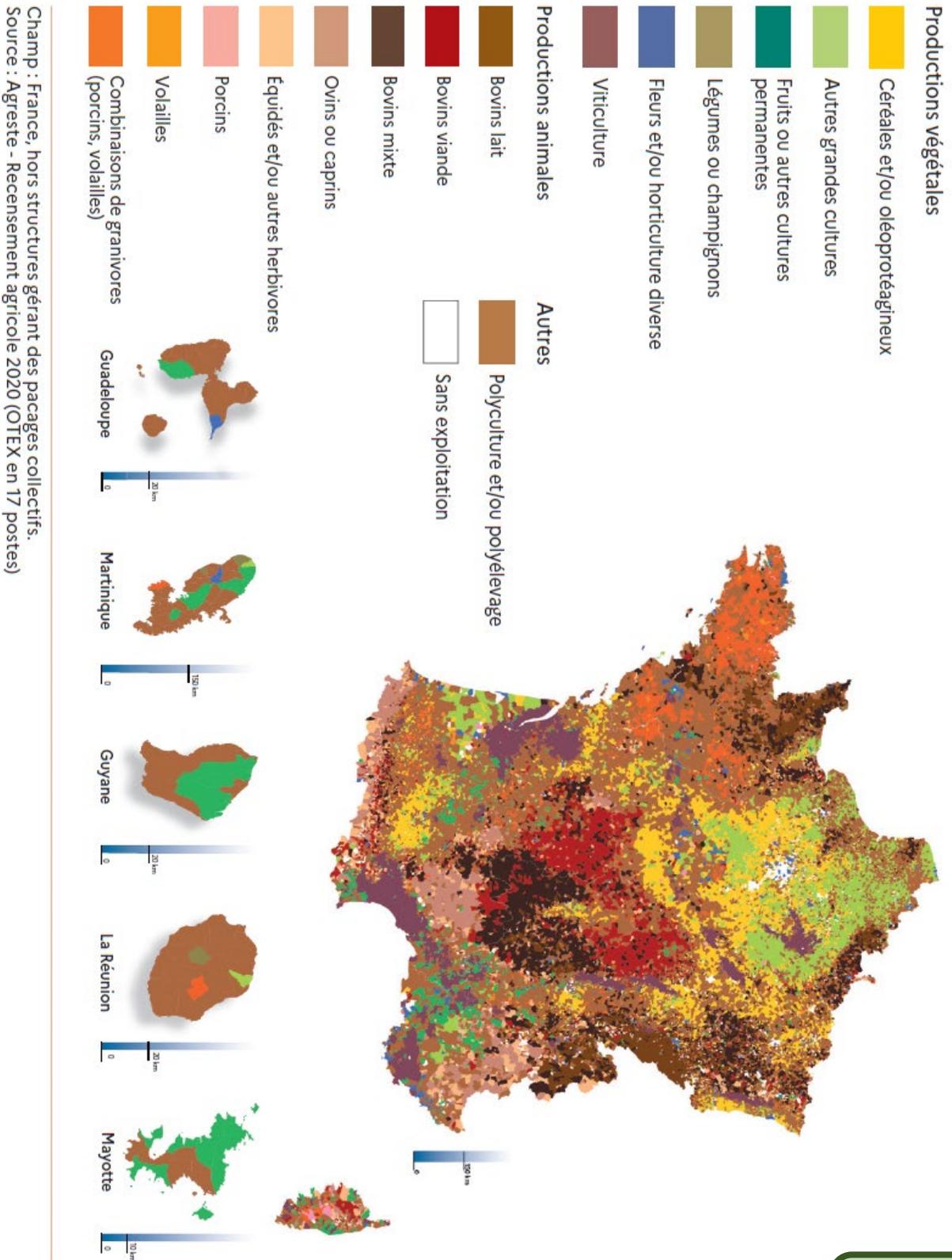
ANNEXE 19 : CODE ARDUINO DU CAPTEUR LOW-COST

ANNEXE 20 : PROTOCOLE SIMPLIFIE DU COMPTAGE DE PMM

ANNEXE 21 : FORMULE DE L'ENSEMBLE DES TESTS STATISTIQUES UTILISES POUR LA CORRELATION DES CARTES DE VIGUEUR



Annexe 1 : Carte de l'Orientation technico-économique des exploitations agricoles (OTEX) dominante par commune



[Retour au texte](#)

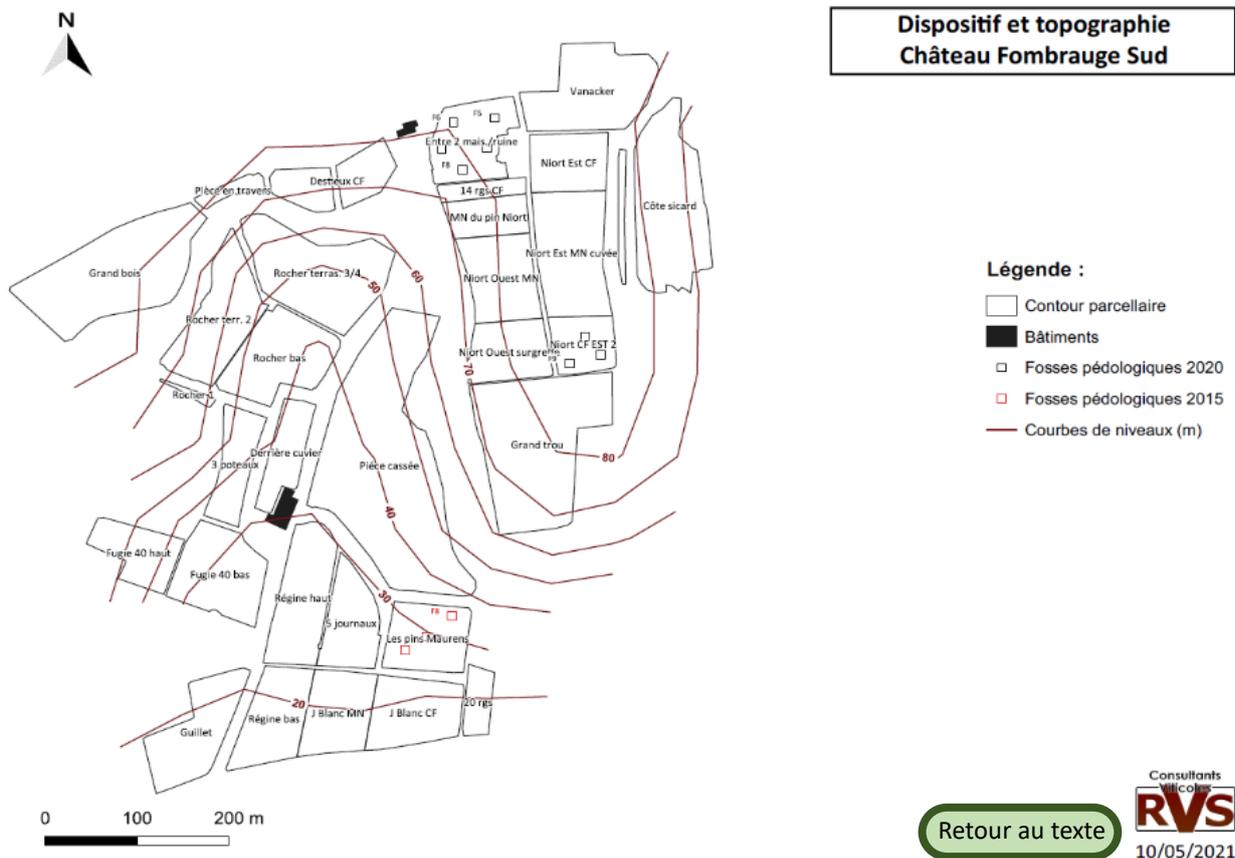
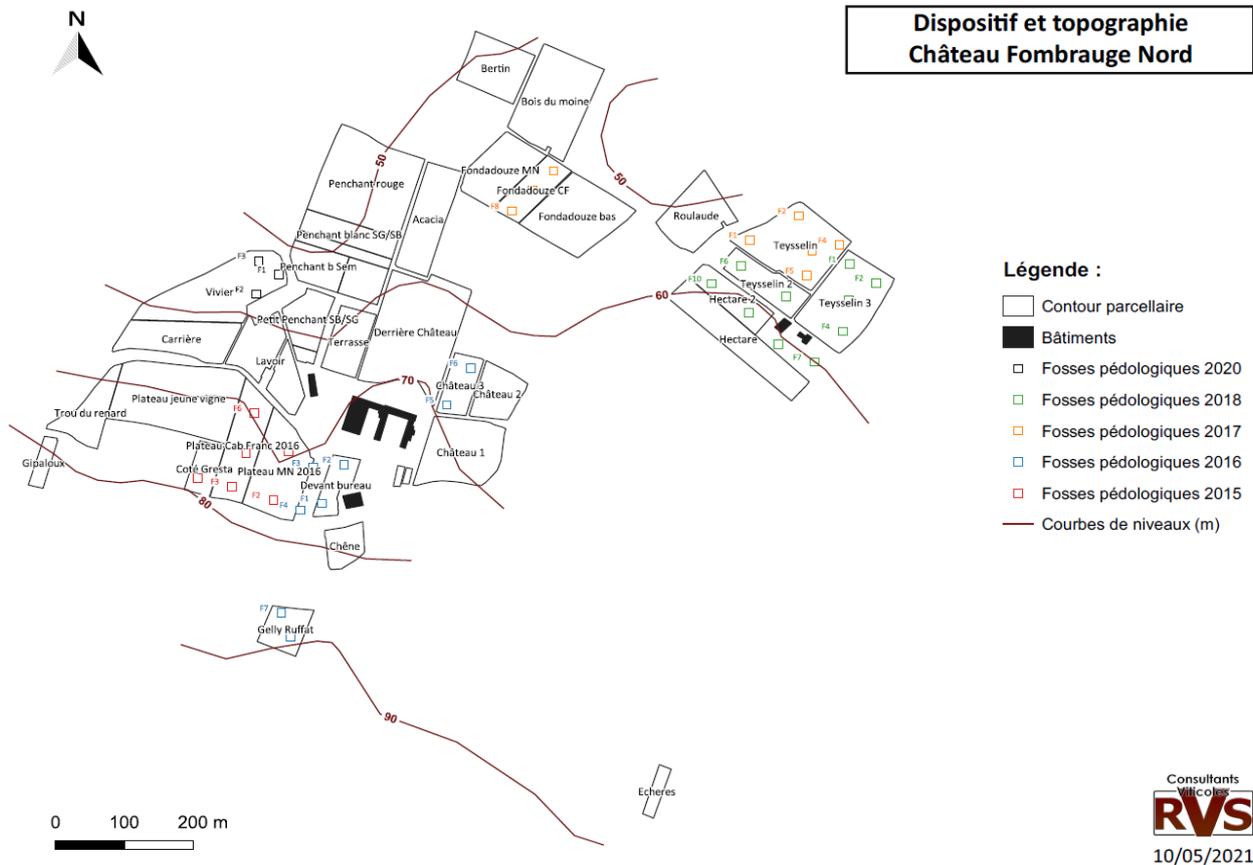


CHÂTEAU
FOMBRAUGE

Bernard Magrez

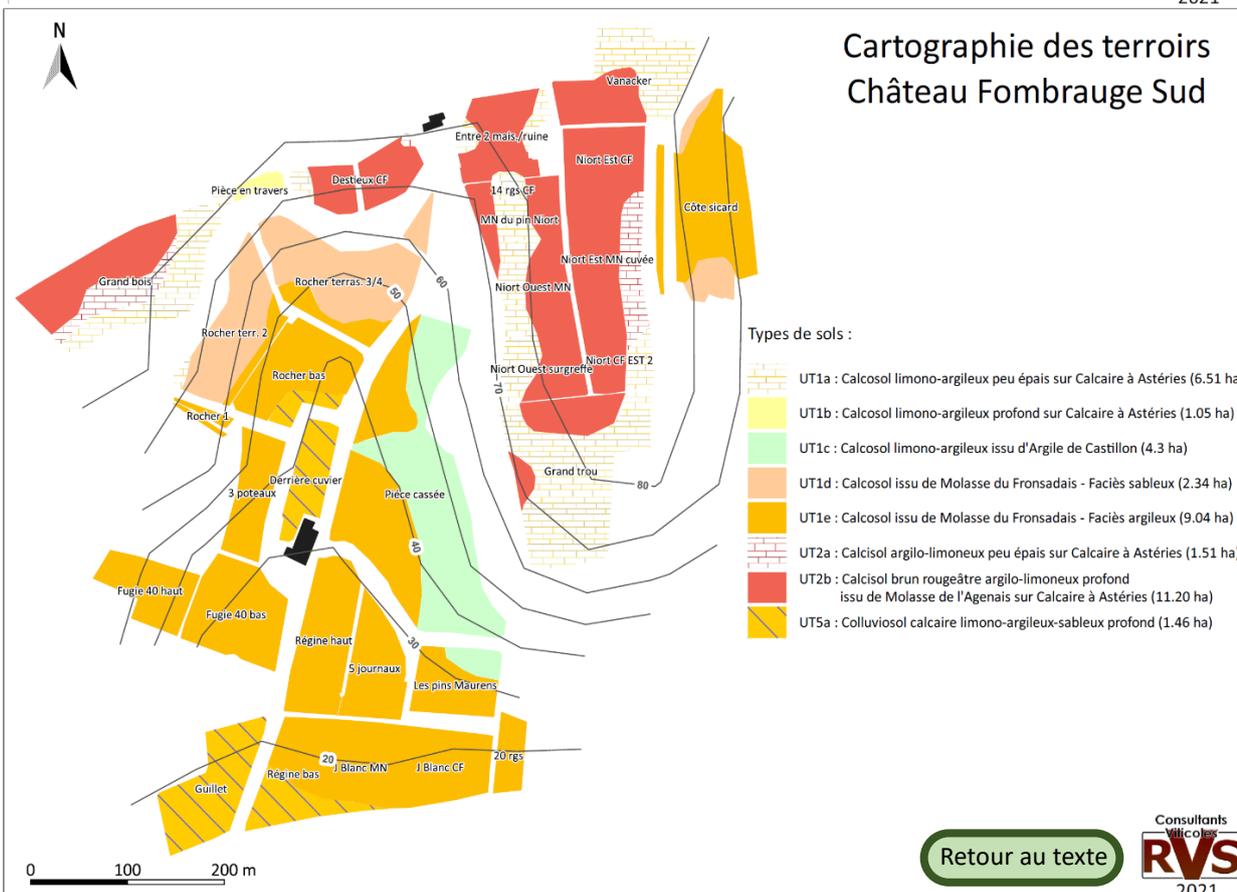
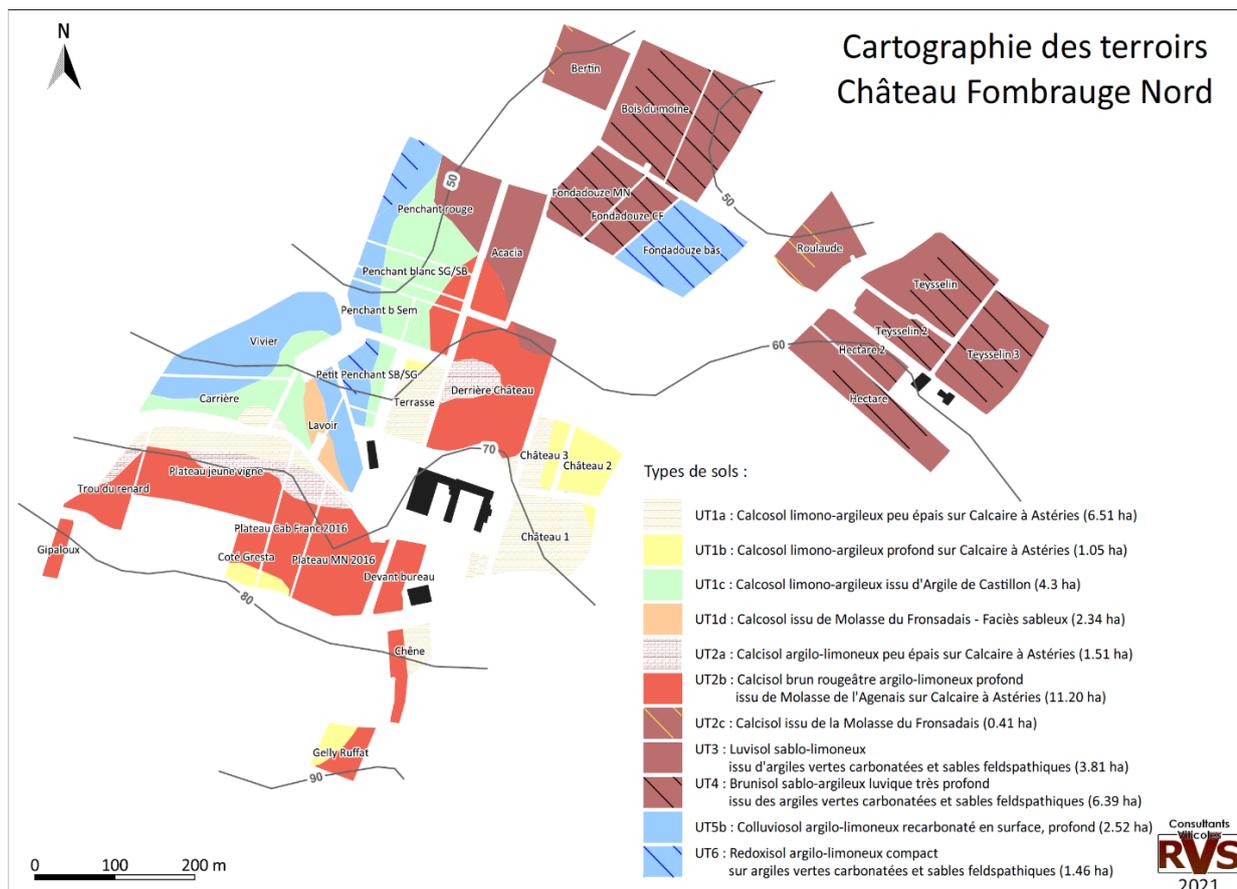


Annexe 2 : Cartographies de courbes de niveaux et localisation de fosses pédologiques



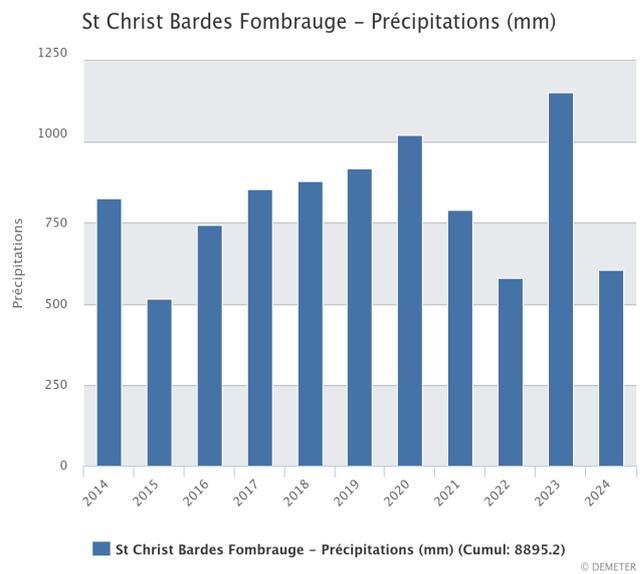
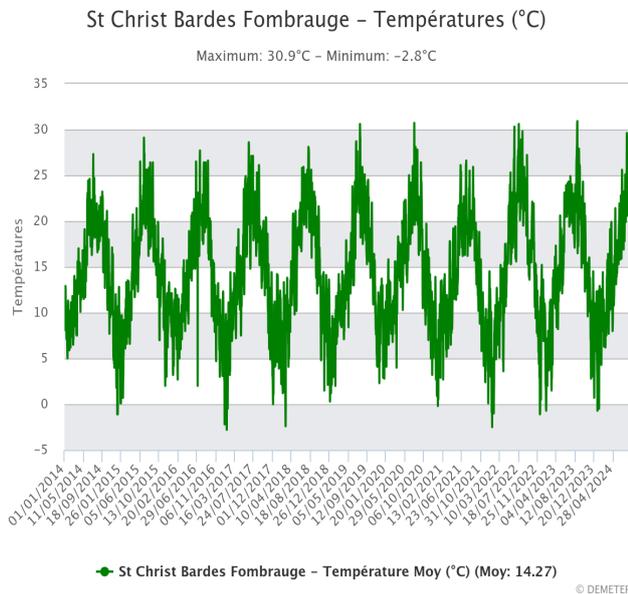


Annexe 3 : Cartographies des sols du Château Fombrauge – Zone Nord et Zone sud



[Retour au texte](#)

Annexe 4 : Variation des pluies et des températures du Château Fombrauge (2014-2024) et d'une parcelle test (Plateau 99) – OAD Décitrait et Démeter



Partie 1

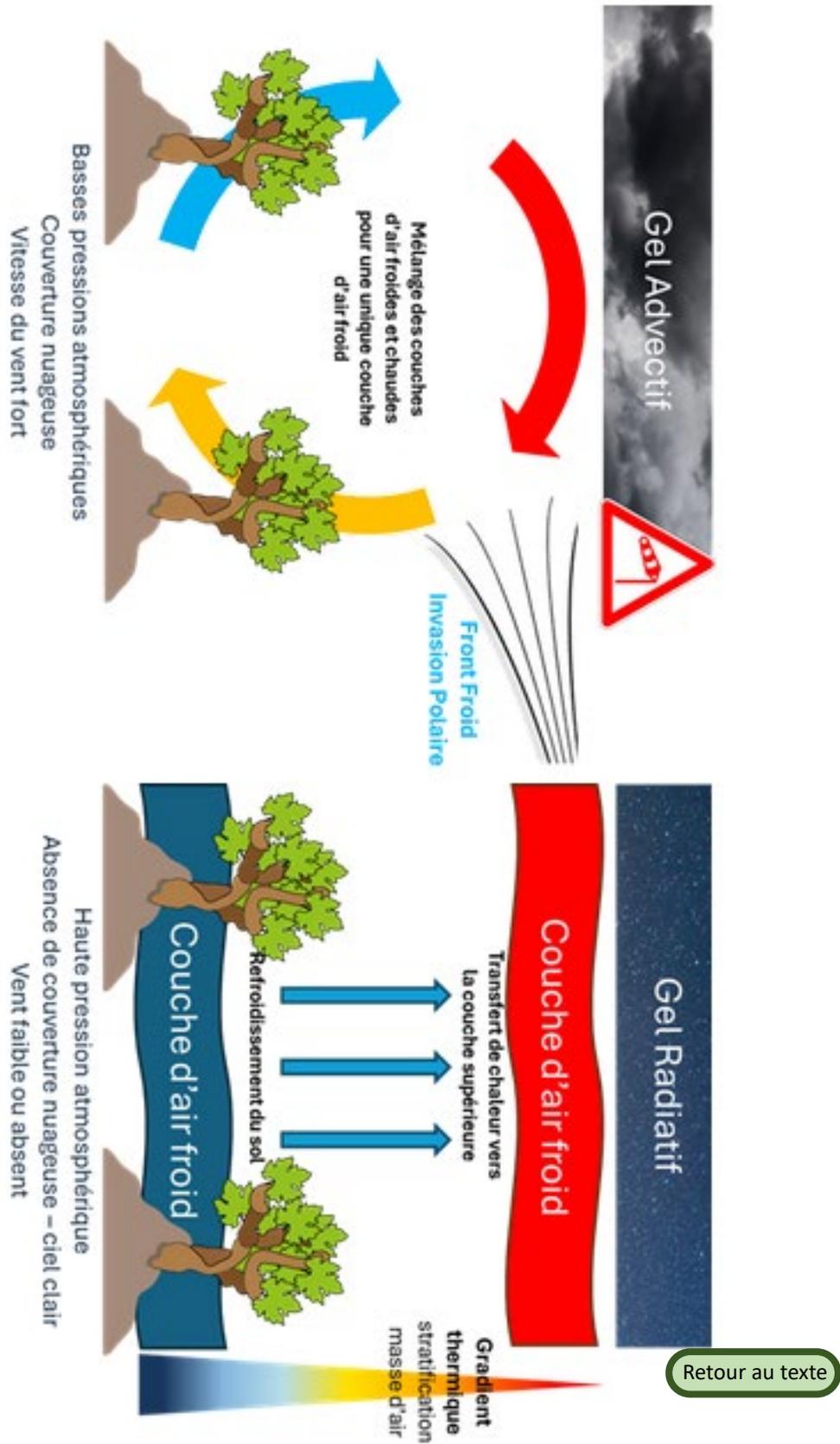
Partie 3

[Retour au A.2.a](#)

[Retour au A.2.b](#)

[Retour au C.3](#)

Annexe 5 : Schémas explicatifs de l'apparition des différents gels





CHÂTEAU
FOMBRAUGE

Bernard Magrez



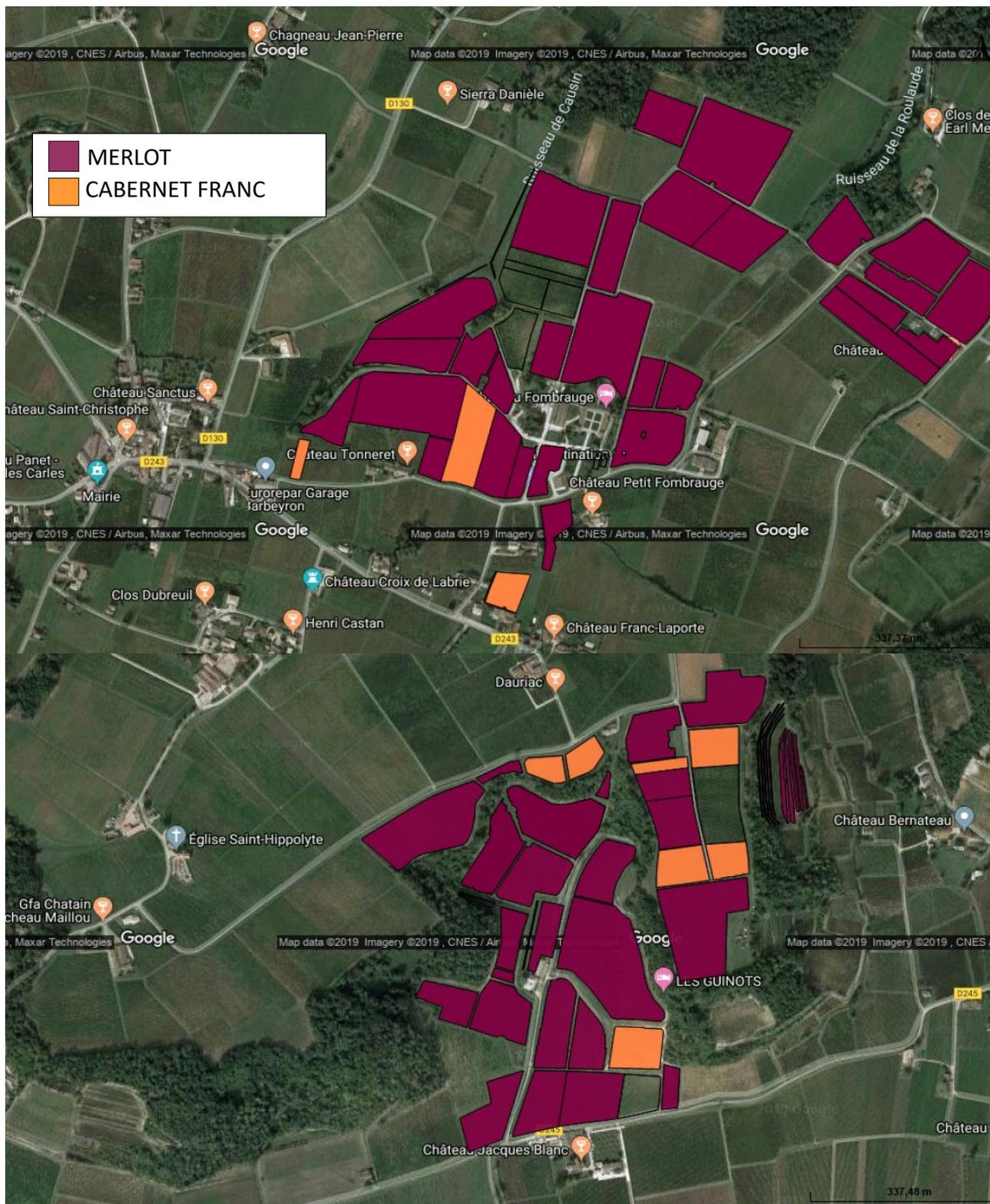
Annexe 6 : Organigramme du Château Fombrauge en 2024

Données supprimées : Non conforme RGPD"

[Retour au texte](#)



Annexe 7 : Répartition des cépages au Château Fombrauge - Zone nord et Zone sud (source Lavilog)



[Retour au texte](#)



Annexe 8 : Liste non-exhaustive des robots viticoles actuellement sur le marché

Catégorie	Nom du Robot	Caractéristiques	Avantages
Robots de Pulvérisation	Yanmar YV01	<ul style="list-style-type: none"> Poids : 1 tonne Carburant : Essence Puissance : 25,3 chevaux Réservoir : 200 litres Pente max : 45% Autonome Compact Utilisation : Pulvérisation de précision 	<ul style="list-style-type: none"> Navigation facile dans les pentes et ruelles étroites Pulvérisation précise Réduction de l'impact environnemental (YANMAR)
	Kubota Kfast	<ul style="list-style-type: none"> Pulvérisateur automoteur et autonome Conçu pour vignes et vergers 	<ul style="list-style-type: none"> Solution autonome pour la pulvérisation Améliore l'efficacité du traitement (FuturFarming)
	Maschio Gaspardo ICARO X4	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation : Traitement aux UV-C Présenté par la start-up Free 	<ul style="list-style-type: none"> Technologie UV-C pour traiter les vignes Alternative écologique aux méthodes traditionnelles (WikiAgri)
Robots de Désherbage et Travail du Sol	Pellenc RX-20	<ul style="list-style-type: none"> Robot à chenilles Utilisation : Travail du sol sous le rang 	<ul style="list-style-type: none"> Idéal pour le désherbage mécanique et le travail du sol sous les rangs de vignes (Pellenc)
	Yanmar YV01 (version désherbage)	<ul style="list-style-type: none"> Équipé de perches pour le désherbage mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> Gestion précise et autonome des mauvaises herbes sous les rangs de vignes (Réussir)
	Naïo Technologies Jo	<ul style="list-style-type: none"> Chenillard Utilisation : Transport de matériel dans des parcelles morcelées 	<ul style="list-style-type: none"> Facilite les opérations logistiques dans les vignobles fragmentés (Naïo)
Robots de Transport	Plack Maschinenbau PRT 400R et 500R	<ul style="list-style-type: none"> Chenillards électriques Largeur : 70-90 cm Utilisation : Transport de charge 	<ul style="list-style-type: none"> Solution efficace pour transporter boîtes, travailleurs, outils de façons autonomes dans les vignobles (Plack maschinenbau)
Robots Multifonctions	Naïo Technologies Ted	<ul style="list-style-type: none"> Robot enjambeur Utilisation : Désherbage électrique ou mécanique autres travaux viticoles 	<ul style="list-style-type: none"> Polyvalence pour le désherbage autres travaux viticoles (rognage) (Naïo)
	Vitibot Bakus	<ul style="list-style-type: none"> Robot enjambeur Utilisation : Désherbage 	<ul style="list-style-type: none"> Flexibilité pour la pulvérisation et le transport de matériel (VitiBot)
	AgXeed AgBot 2.055 W3	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation : Viticulture et arboriculture 	<ul style="list-style-type: none"> Automatisation avancée pour diverses tâches agricoles (AgXeed)
	Exxact Robotics Traxx	<ul style="list-style-type: none"> Fonctionnement : Diesel Utilisation : Vignes étroites 	<ul style="list-style-type: none"> Solution compacte et efficace pour les vignes étroites (Exxact)
	Slopehelper	<ul style="list-style-type: none"> Électrique Utilisation : Vignes et Vergers en pente 	<ul style="list-style-type: none"> Travail dans des conditions difficiles en vignobles en pente Durable et écologique et très polyvalent (Slopehelper)



CHÂTEAU
FOMBRAUGE

Bernard Magrez



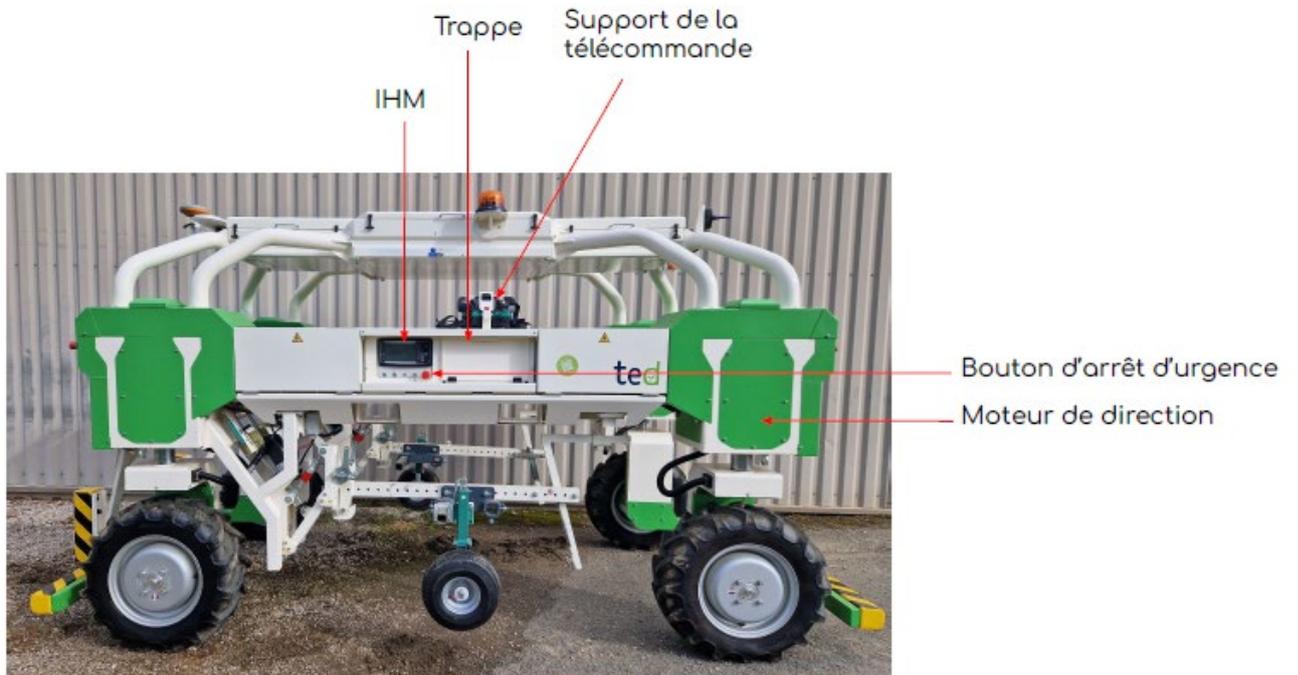
Annexe 9 : Photo du robot viticole de Naïo Technologies, TED (V2)



[Retour au C.2.a](#)

[Retour au C.3](#)

Annexe 10 : Description des principaux composants du TED (vues latérales)



Vue de gauche



Vue de droite



Annexe 11 : Description des principaux composants du TED (vues frontales)



Vue de face



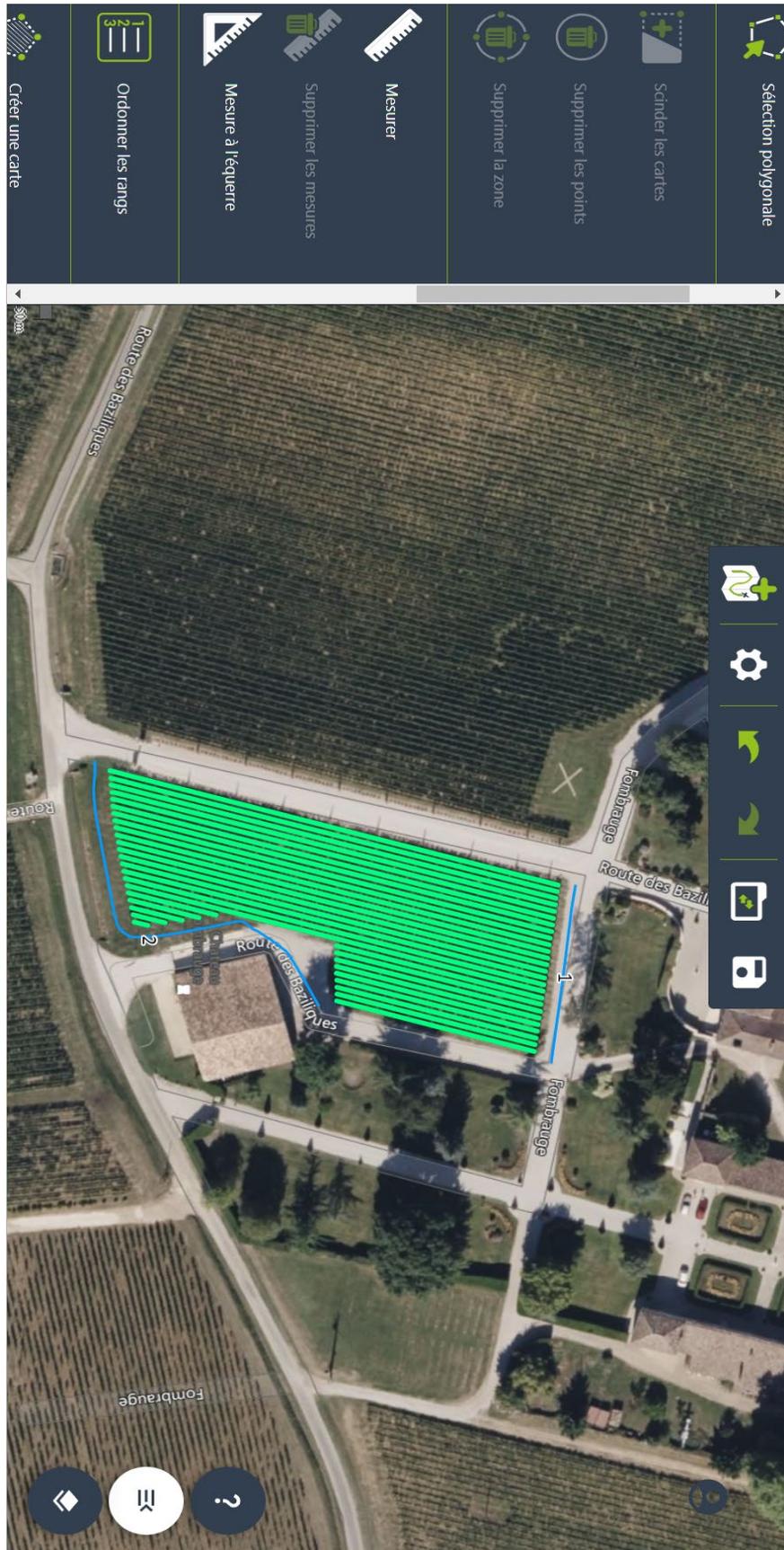
Vue arrière



Annexe 12 : Liste non-exhaustive des capteurs embarqués en développement ou sur le marché

Technologie/Projet	Mode d'acquisition	Principe	Avantages	Inconvénients	Tarifs
Bloomfield Robotics	Proxi-détection, Intelligence Artificielle	Caméra embarquée en stéréovision au niveau des grappes, comptage du nombre de grappe par pieds	- 10 ans d'expérience, passage de jour et de nuit, autonomie de 8 heures, 5 clichés/sec (vitesse d'avancement jusqu'à 6km/h) - Précision de 92.5%, objectif de l'entreprise	- Peu d'entraînement sur des vignes européennes (origine du vignoble américain sur des vignes effeuillées et irriguées)	2500€/mois
Chouette Vision	Proxi-détection, Intelligence Artificielle	Caméra embarquée sur drone, avion ou tracteur, comptage du nombre de pieds improductifs	- Détection des zones d'échantillonnage les plus représentatives (hétérogènes) grâce à la détection des pieds improductifs - Fiabilité de l'ordre de 80% selon l'entreprise	- Méthode qui nécessite encore beaucoup de comptage manuel sur le terrain pour pouvoir se servir de cette technologie	3000€/10ha par an
Deepplanet	Téledétection	Analyse des données NDVI satellitaires couplées à l'historique du domaine, service appelé VineSignal	- Surveillance du niveau de stress hydrique, du taux de sucre des baies, des attaques des maladies, du niveau de rendement potentiel	- Données ne s'appuyant pas sur des mesures à la vigne, doit être couplées avec les données historiques du domaine	3 formules : - 60€/ha/an, 30€/an 120€/ha/an
VineMapper - Greenshield	Proxi-détection, Intelligence Artificielle	Caméra embarquée, couplée à une IA	- Détection de diverses maladies grâce à un flash haute performance, à un rythme de deux images par seconde	- Non Observé	Non communiqué
3D Aerospace (Boîtier EHERMES)	Proxi-détection, Intelligence Artificielle	Boîtier connecté, géolocalisé, caméra embarquée qui scanne les deux côtés de la vigne	- Permet de scanner les deux côtés du rang de vigne en simultané - Différents modules : détection des manquants, des maladies et l'estimation de rendement - Nombre de grappes avec une précision de 83 à 87% après 3 passages	- Méthode reposant sur l'extrapolation avec les données historiques de rendement pour obtenir un tonnage à l'hectare	1000€/an pour le boîtier + 25€/an/ha
Ovalie Innovation	Proxi-détection, Intelligence Artificielle	Capteur détectant toutes les grappes, blanches, rouges et masquées par le feuillage de la vigne	- Précision de 90% ou plus selon les concepteurs	- Capteur non commercialisé, aucune information sur le fonctionnement précis de la technologie, fonctionnant à faible vitesse (rythme piéton)	Non commercialisé
GreenSeeker – RVS	Proxi-détection	Capteur géolocalisé destiné à la prise de vigueur	- Grande fiabilité de résultats	- Éprouvé en grande culture, nécessitant une accommodation particulière pour la vigne	300€ de matériel + 100€/Ha analysé
Vinbot (Agri-Ciência)	Proxi-détection	Projet européen d'un robot autonome pour l'estimation de rendement	Non communiqué	Non communiqué	Non commercialisé
Vinerobot (projet Européen Cave de Buzet)	Proxi-détection	Projet européen d'un robot autonome pour l'estimation de rendement (prototype)	Non communiqué	Non communiqué	Non commercialisé
VitisFlower (Université de la Rioja)	Proxi-détection	Application smartphone pour compter le nombre de fleurs sur des photos d'inflorescences de vigne	- 84 % des fleurs des captures ont été retrouvées - Précision de 94 % - Application testé sur 140 images d'inflorescences de 11 cépages	Mise en oeuvre sur le vignoble difficile : temps d'acquisition des données (piéton), différence de résultats selon l'appareil utilisé	Non commercialisé
Projet EARN (Vignerons de Tutiac, Vitinnov, Aquitaine Science Transfert)	Proxi-détection	Capteur embarqué sur tracteur, caméra couplée à une Intelligence Artificielle	Non communiqué	Non communiqué	Non commercialisé

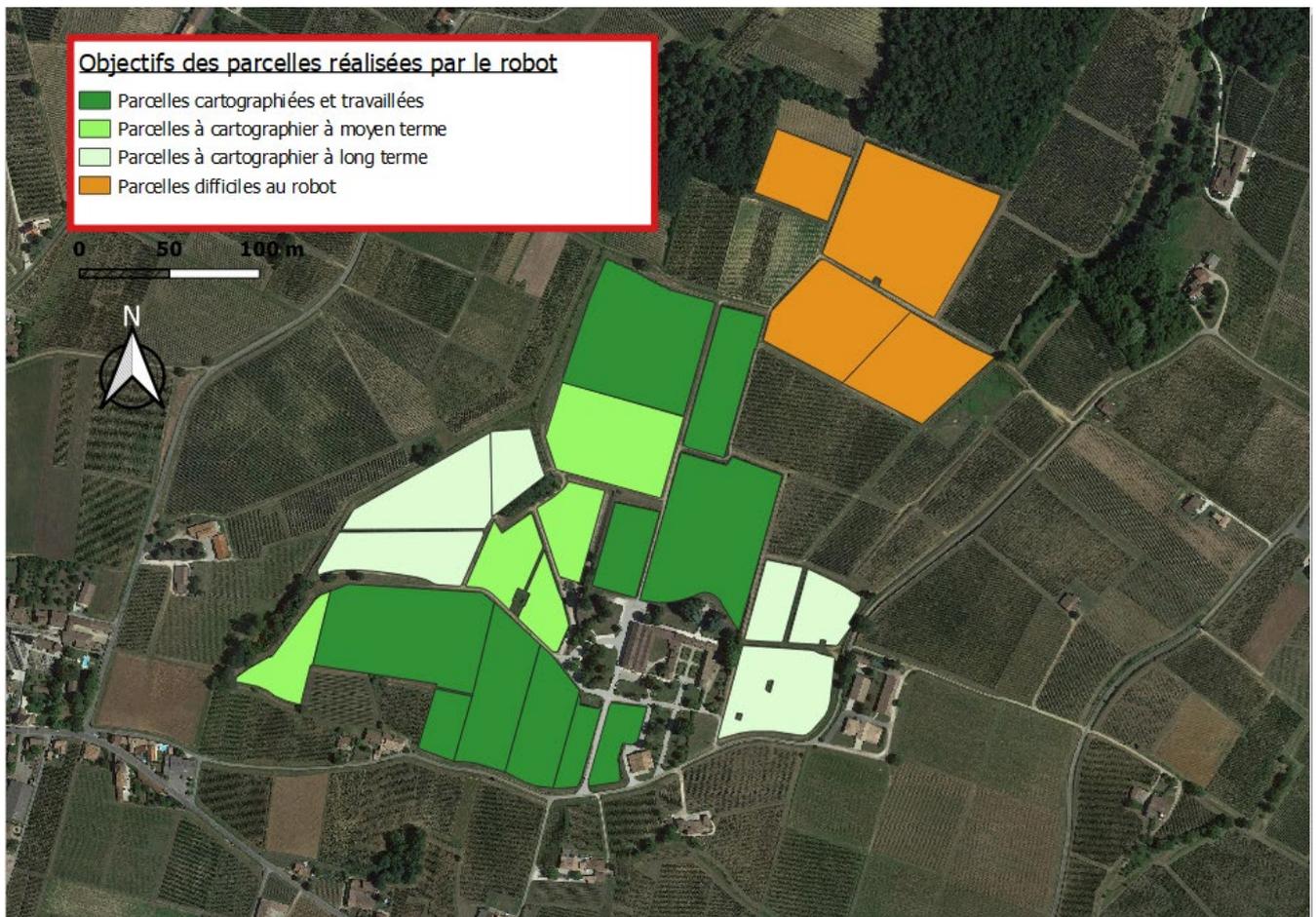
Annexe 13 : Accueil de l'interface de EasyMapping



[Retour au texte](#)

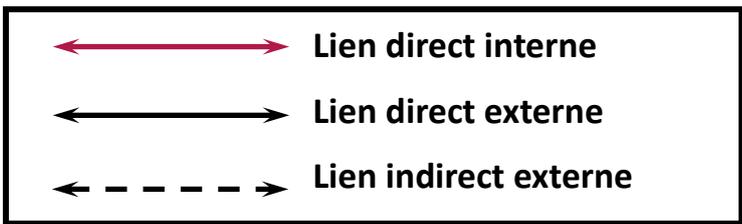
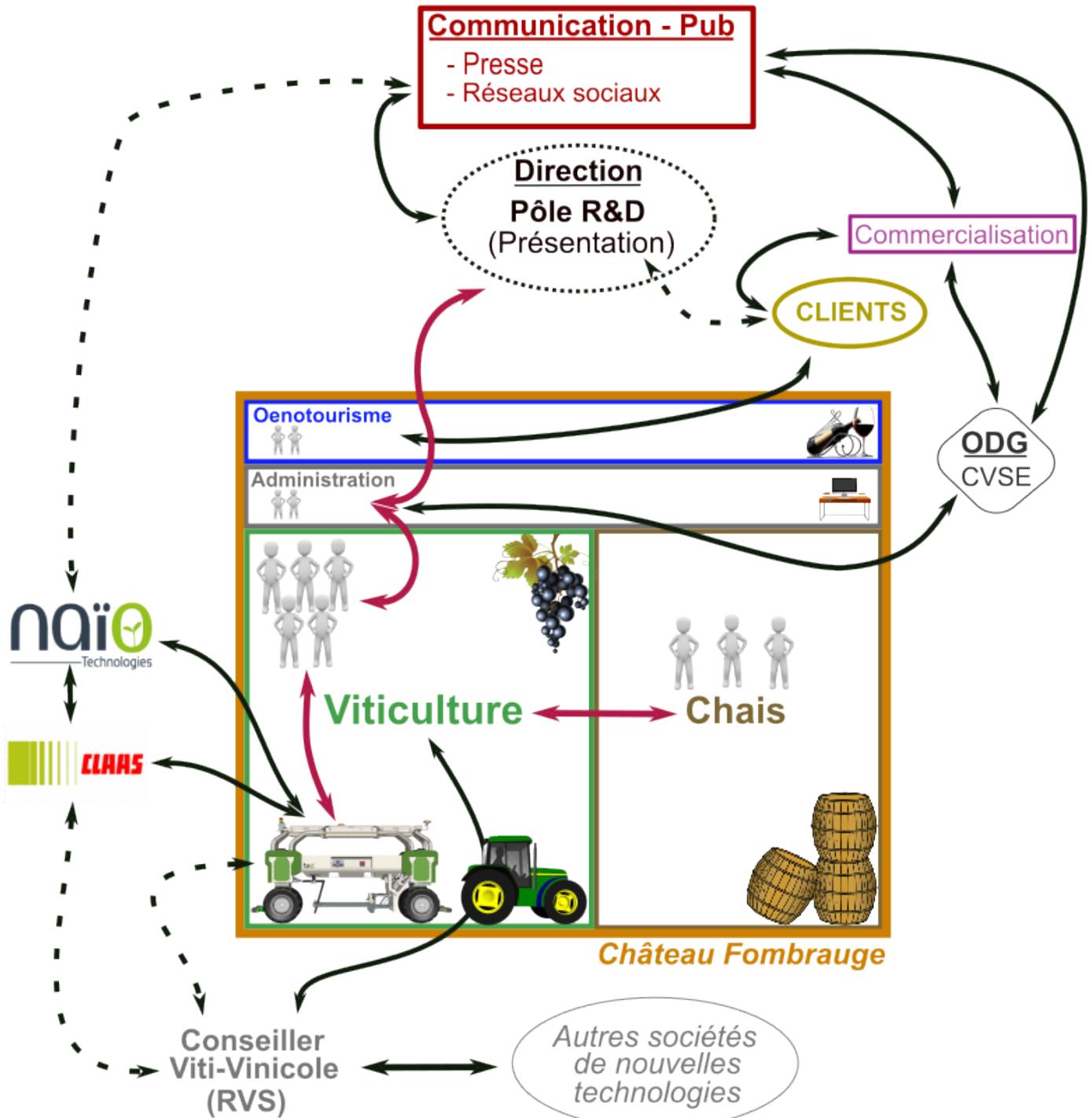


Annexe 14 : Cartographie des parcelles cartographiées pour le robot au sein du Château Fombrauge

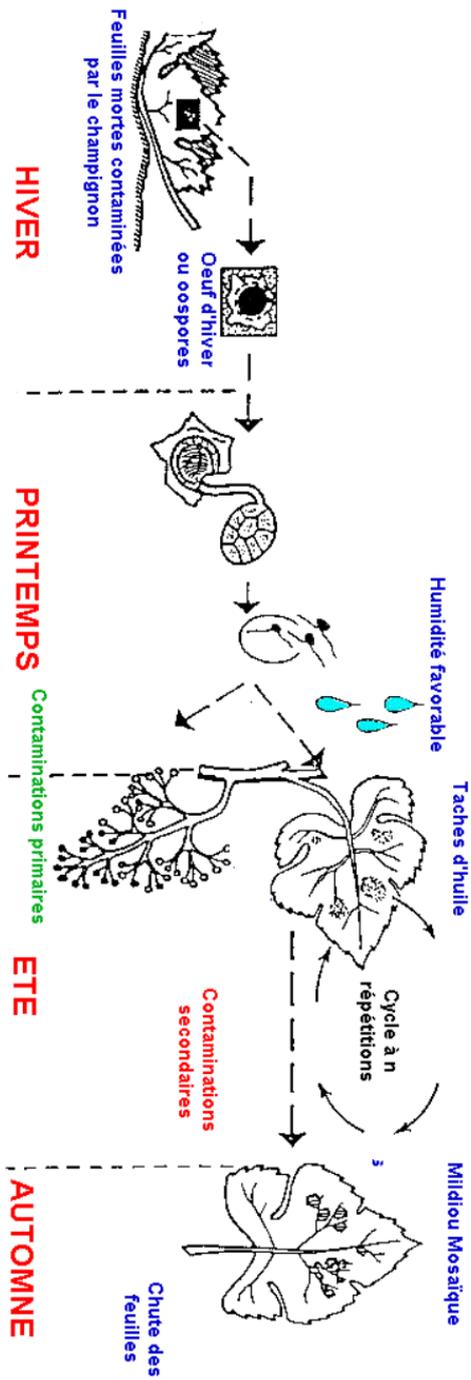




Annexe 15 : Schéma relationnel des parties prenantes suite à l'arrivée du robot TED – État des lieux 2024



Annexe 16 : Schéma du cycle de vie du Mildiou (Vignevin)



Annexe 17 : Interface web de Chouette View (sans analyse)

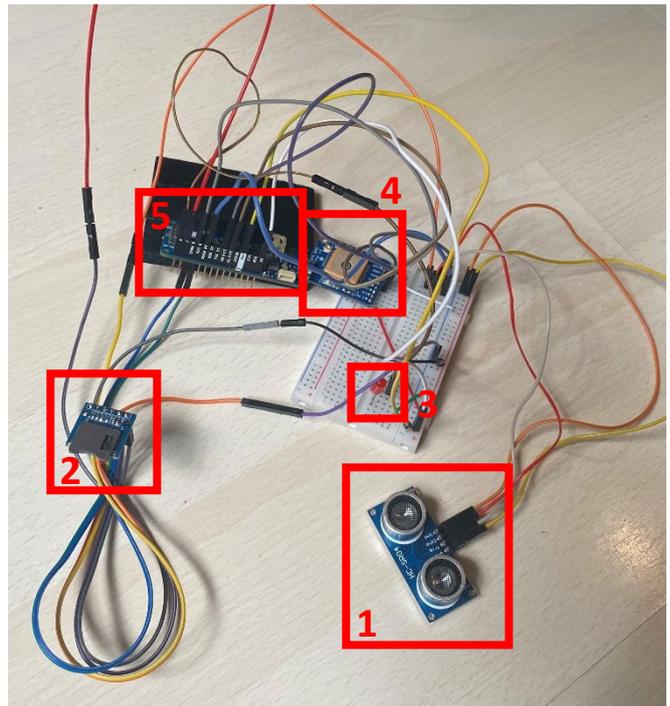
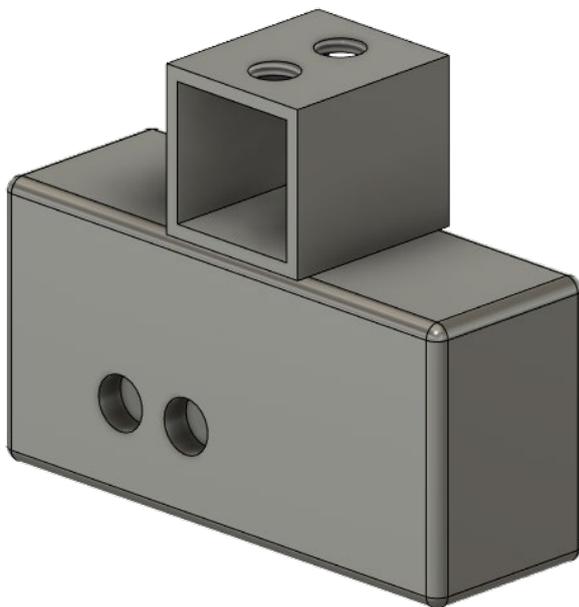


The screenshot displays the Chouette View web interface. At the top, a blue header contains the text "Château Fombrauge" and "12 Parcelles 16,63 ha". Below this is a sidebar menu with a dark background and white text, listing various land parcels. Each item in the menu includes a name, area, and year, followed by a red dot and a blue checkmark icon. The main area of the interface is a satellite map showing the layout of these parcels, which are outlined in light blue. The parcels are labeled with their names and areas: "Bois des moines - 2,33 ha", "Acacia - 0,83 ha", "Grand Penchant - 3,34 ha", "Derrière chateau - 1,93 ha", "Devant bureau - 0,32 ha", "Lavoir - 0,36 ha", "Devant bureau - 0,32 ha", and "Gresta - 0,29 ha". The map includes a scale bar for 100 meters and a "mapbox" logo in the bottom left corner. A "Retour au texte" button is located in the bottom right corner of the image.

Parcelle	Superficie (ha)	Année
Bois des moines	2,33	-
Acacia	0,83	1996
Grand Penchant	3,34	2000
Derrière chateau	1,93	1993
Devant bureau	0,32	2017
Fondadouze	2,35	-
Grand Penchant	3,34	2000
Gresta	0,29	1900

Retour au texte

Annexe 18 : Photographie du capteur Low-Cost, codé en Arduino avec le détail des composants + Image 3D du capteur final



Description :

- 1 : Capteur Ultrason
- 2 : Support de carte SD
- 3 : LED de contrôle
- 4 : Module GPS
- 5 : Carte Arduino MKR WIFI 1010

Annexe 19 : Code Arduino du Capteur Low-Cost

```
#include <Adafruit_GPS.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

// Utilisation de Serial1 pour la communication avec le GPS
Adafruit_GPS GPS(&Serial1);

// Définition des broches pour le capteur ultrasonique
const int capt_son_trig = 9;
const int capt_son_echo = 10;

// Définition des broches pour la LED et la carte SD
const int brocheLED = 13; // Utilisation de la broche 13 pour la LED
const int chipSelect = 10; // Pin CS de la carte SD
File myFile;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(brocheLED, OUTPUT);
  pinMode(capt_son_trig, OUTPUT);
  pinMode(capt_son_echo, INPUT);

  // Initialisation du GPS
  Serial1.begin(9600); // Initialisation de Serial1 pour le GPS
  GPS.begin(9600);
  GPS.sendCommand(PMTK_SET_NMEA_OUTPUT_RMCGGA);
  GPS.sendCommand(PMTK_SET_NMEA_UPDATE_1HZ);
  delay(1000);

  // Initialisation de la carte SD
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Erreur de démarrage de la carte SD");
    while (1);
  }

  // Ouvrir le fichier et écrire l'en-tête
  myFile = SD.open("Donnee_manquants.csv", FILE_WRITE);
  if (myFile) {
    myFile.println("Heure,Latitude,Longitude,Distance");
    myFile.close();
  } else {
    Serial.println("Erreur d'ouverture du fichier");
  }
}
```

```
void loop() {
  long duree, distance;

  // Mesurer la distance avec le capteur ultrason
  digitalWrite(capt_son_trig, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(capt_son_trig, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(capt_son_trig, LOW);

  duree = pulseIn(capt_son_echo, HIGH);
  distance = duree * 0.034 / 2;

  // Contrôler la LED en fonction de la distance
  digitalWrite(brocheLED, (distance > 0 && distance < 10) ? HIGH :
LOW);

  // Lire les données GPS
  char c = GPS.read();
  if (GPS.newNMEAreceived()) {
    if (!GPS.parse(GPS.lastNMEA()))
      return;
  }

  // Vérifier le fix GPS et enregistrer les données
  if (millis() > 5000 && GPS.fix) {
    Serial.print("Distance: "); Serial.println(distance);
    Serial.print("Latitude: "); Serial.println(GPS.latitude, 4);
    Serial.print("Longitude: "); Serial.println(GPS.longitude, 4);

    // Ouvrir le fichier pour écrire les nouvelles données
    myFile = SD.open("Donnee_manquants.csv", FILE_WRITE);
    if (myFile) {
      myFile.print(GPS.hour, DEC); myFile.print(":");
      myFile.print(GPS.minute, DEC); myFile.print(":");
      myFile.print(GPS.seconds, DEC); myFile.print(",");
      myFile.print(GPS.latitude, 4); myFile.print(",");
      myFile.print(GPS.longitude, 4); myFile.print(",");
      myFile.println(distance);
      myFile.close();
    } else {
      Serial.println("Erreur d'ouverture du fichier pour écriture");
    }
  }

  delay(100); // Petite pause pour éviter de saturer le processeur
}
```



Annexe 20 : Protocole simplifié du comptage de PMM

Étape 1 : Planification et préparation du comptage

Calendrier : Planifiez les activités en fonction des disponibilités des équipements :

- Personnel à pied : début mars, avant la disponibilité du capteur Low-Cost.
- Utilisation de la caméra embarquée par Chouette : en suivant, pour une collecte initiale de données.

Formation et préparation :

- Former le personnel à pied sur ce qu'il faut observer et comment utiliser éventuellement l'application MergeMap pour des notes simplifiées.
- Assurer la configuration correcte de la caméra embarquée par Chouette pour la reconnaissance des différents états des pieds de vigne.
- Configurer et tester le capteur Low-Cost pour garantir l'exactitude des données GPS.

Étape 2 : Collecte de données

Reconnaissance à pied (2 jours nécessaires) :

- Marcher dans chaque parcelle.
- Identifier et noter les pieds manquants, morts, les complants vivants et morts, selon le protocole de Chouette => 2 rangs par parcelle.

Surveillance par caméra embarquée (4 jours) :

- Effectuer des passages dans les parcelles avec la caméra pour enregistrer visuellement l'état des plants.
- Extraire les données préliminaires sur les pieds morts et les complants.

Utilisation du capteur Low-Cost :

- Codage en Arduino des séquences / temps de latence / création du jeu de données / émission des données
- Une fois disponible, passer le capteur dans la parcelle pour créer un jumeau numérique de la vigne.
- Enregistrer les données avec position GPS, les caractéristiques des pieds, et les comptages des pieds productifs et manquants.
- Extraire les données « brutes » et les reformater

Étape 3 : Traitement des données

Intégration et nettoyage des données :

- Compiler les données recueillies par le personnel, la caméra et le capteur dans un fichier CSV unifié.
- Nettoyer les données pour éliminer les doublons et corriger les erreurs.

Analyse sous R :

- Charger les données dans R.
- Effectuer des analyses statistiques pour comparer les méthodes de collecte de données et évaluer les pourcentages d'erreur.

Développement de requêtes PostGres :

- Créer des scripts SQL pour extraire et traiter les données du fichier CSV généré par le capteur.
- Préparer des requêtes pour obtenir les positions GPS, les caractéristiques des pieds, et les totaux nécessaires.

Étape 4 : Visualisation et rapport

Dernier passage Chouette – Restitution :

- Dernier passage à pied des opérateurs Chouette et prise de données avec la caméra latéral
- Résultats disponibles en décembre.

Utilisation de QGIS ou Power BI :

- Importer les données traitées.
- Créer des cartes interactives et des visualisations pour montrer la distribution et l'état des pieds de vigne.

Rapport final :

- Synthétiser les résultats de l'analyse.
- Rédiger un rapport détaillant les méthodes, les découvertes et les recommandations pour la gestion future de la vigne.

Étape 5 : Révisions et ajustements

- Sur la base des résultats obtenus, ajustez les méthodologies de collecte de données ou les paramètres des appareils pour de futures itérations.

Annexe 21 : Formule de l'ensemble des tests statistiques utilisés pour la corrélation des cartes de vigueur

Test de Bartlett

$$K^2 = \frac{(N - k) \ln(S^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(S_i^2)}{1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N - k} \right)}$$

- N : Nombre total d'observations.
- k : Nombre de groupes.
- n_i : Nombre d'observations dans le groupe i .
- S_i^2 : Variance de l'échantillon pour le groupe i .
- S^2 : Variance globale pondérée.

Test de Levene

$$W = \frac{(N - k)}{(k - 1)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k n_i (Z_i - Z_{..})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Z_{ij} - Z_i)^2}$$

- N : Nombre total d'observations.
- k : Nombre de groupes.
- n_i : Nombre d'observations dans le groupe i .
- Z_{ij} : Valeur absolue de la différence entre chaque observation et sa médiane de groupe.
- Z_i : Moyenne des Z_{ij} pour le groupe i .
- $Z_{..}$: Moyenne globale des Z_{ij} .

Test de Kruskal-Wallis

$$H = \frac{12}{N(N + 1)} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{R}_i - \bar{R})^2$$

- N : Nombre total d'observations.
- k : Nombre de groupes.
- n_i : Nombre d'observations dans le groupe i .
- \bar{R}_i : Rang moyen des observations dans le groupe i .
- \bar{R} : Rang moyen global.

Test ANOVA

$$F = \frac{\text{Variation entre les groupes (MSG)}}{\text{Variation à l'intérieur des groupes (MSE)}}$$

- Variation entre les groupes (MSG) :

$$MSG = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{k - 1}$$

- Variation à l'intérieur des groupes (MSE) :

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{N - k}$$

- Y_{ij} : Valeur de l'observation.
- \bar{Y}_i : Moyenne du groupe i .
- \bar{Y} : Moyenne globale.

Test de corrélation de Pearson

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

- X_i et Y_i : Valeurs des deux variables.
- \bar{X} et \bar{Y} : Moyennes des deux variables.