



**HAL**  
open science

# Localisation et compréhension des origines d'hétérogénéités intra-parcellaires de vigueur du Château Rieussec

Élise Rivière

► **To cite this version:**

Élise Rivière. Localisation et compréhension des origines d'hétérogénéités intra-parcellaires de vigueur du Château Rieussec. Agronomie. 2019. dumas-02978267

**HAL Id: dumas-02978267**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02978267>**

Submitted on 26 Oct 2020

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

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



**Mémoire de fin d'études**  
**présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome**  
**Option : Viticulture – Œnologie**

**Localisation et compréhension des origines d'hétérogénéités  
intra-parcellaires de vigueur**

**Par Elise RIVIERE**

**Année de soutenance : 2019**

**Organisme d'accueil : Château Rieussec**





**Mémoire de fin d'études**  
**présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome**  
**Option : Viticulture – Œnologie**

**Localisation et compréhension des origines d'hétérogénéités  
intra-parcellaires de vigueur**

**Par Elise RIVIERE**

**Année de soutenance : 2019**

**Mémoire préparé sous la direction de :**  
**Aurélie METAY**

**Présenté le : 06/11/2019**

**Organisme d'accueil : Château**  
**Rieussec**

**Organisme d'accueil : Château**  
**Rieussec**

**Maître de stage : Manuela BRANDO**

## REMERCIEMENTS

Cette expérience aura été riche tant d'un point de vue professionnel que personnel. Je tenais avant tout à remercier Manuela pour son rôle si formateur de maître de stage pendant ces six derniers mois. Tes conseils, ta rigueur et ta prise de recul m'ont toujours aidé à avancer. Avoir la chance d'effectuer un stage dans une structure avec autant de projets différents est précieux.

Merci à Jean d'avoir été à mes côtés tous les jours pour construire ce projet de stage. Travailler dans des conditions aussi agréables était réellement une source de motivation et de bonne humeur. Merci pour tous nos échanges, pour votre disponibilité et votre dynamisme sans lesquels ce stage n'aurait certainement pas été le même. Le tutoiement un jour, ne vous inquiétez pas, je n'oublie pas !

Je me souviens de la première fois où j'avais rencontré Manuela et Jean. Ils m'avaient dit : « Nous sommes un peu des fous du boulot, avec toujours l'envie d'aller plus loin ». Votre duo si joyeux et dynamique possède un atout qui m'a beaucoup marqué : le partage d'une passion. Cette dernière est source de motivation et la partager a été un plaisir.

Merci à Aurélie Metay pour son accompagnement en tant que tutrice pendant ces six derniers mois. Avancer à vos côtés a été pour moi source d'apprentissage et votre disponibilité et vos conseils m'ont toujours aidé.

Merci à Mathieu pour la précision et l'organisation de nos échanges durant ce stage, cela restera les deux mots-clés à ne pas oublier. Merci à l'ensemble des personnes travaillant au Château Rieussec qui ont contribué au bon déroulement de ce stage : Valérie et Camille pour nos échanges et votre aide, Bertrand pour ta compréhension et ta disponibilité, Patrick et Nicolas pour votre aide durant l'acquisition des mesures et l'ensemble du personnel pour votre gentillesse et votre bonne humeur.

Merci à Pierre pour son soutien et son aide si précieuse jusqu'à la fin de la rédaction de ce mémoire. Merci à mes parents et à ma famille qui me transmettent depuis de nombreuses années des valeurs humaines de simplicité et de joie de vivre qui m'apportent beaucoup.

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	
<b>SIGLES ET ABREVIATIONS</b> .....	
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b> .....	
<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>PARTIE 1 : Contexte, problématique et hypothèses d'étude</b> .....	<b>2</b>
1 Contexte de l'entreprise : un premier grand cru classé de Sauternes .....	2
1.1 Une amplitude de topographie sur l'ensemble du vignoble .....	2
1.2 Des sols diversifiés .....	2
1.3 Un matériel végétal diversifié, adapté et renouvelé .....	2
1.4 Itinéraires techniques au Château Rieussec .....	2
2 Contexte de l'étude.....	3
2.1 Origines et piliers de gestion des hétérogénéités de vigueur .....	3
2.2 La mesure du NDVI comme indicateur de vigueur.....	4
2.2.1 L'acquisition des valeurs NDVI .....	4
2.2.2 Démarche historique de réflexion sur l'outil de mesure.....	4
3 Problématique et hypothèses de l'étude .....	5
3.1 Problématique : interpréter et comprendre la localisation et les origines des hétérogénéités de vigueur.....	5
3.2 Hypothèses d'étude .....	5
3.2.1 La localisation des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur est possible à l'aide du NDVI et d'une expertise de terrain .....	5
3.2.2 Les hétérogénéités de vigueur sont liées à l'état hydrique de la vigne.....	5
3.2.3 Les hétérogénéités de vigueur sont liées au statut organique et minéral de la vigne et de son environnement. ....	6
<b>PARTIE 2 : Recherches scientifiques sur les facteurs de compréhension et d'explication des hétérogénéités de vigueur</b> .....	<b>6</b>
1 L'utilisation du GreenSeeker (NDVI) pour localiser les hétérogénéités de vigueur .....	6
1.1 L'acquisition des mesures NDVI à l'aide du GreenSeeker .....	6
1.1.1 La mesure du NDVI, principe et méthodes existantes .....	6
1.1.2 La mesure du NDVI par le GreenSeeker .....	7
1.2 Utilisation du NDVI comme outil d'aide à la décision .....	7
2 L'état hydrique de la vigne, un facteur explicatif de la variabilité intra parcellaire du vignoble ....	7
2.1 La résistivité comme outil d'aide à la décision pour caractériser les unités spatiales de sol.....	8
2.1.1 Principe de mesure de la résistivité .....	8
2.1.2 Paramètres de variabilité de la résistivité .....	8
2.1.3 Utilisation des données de résistivité.....	8
2.2 La réserve utile du sol comme indicateur de l'état hydrique de la vigne .....	8
2.2.1 Paramètres liés à la notion de réserve utile.....	9

2.2.2	Interprétation de la réserve utile pour le système vigne .....	9
2.3	Le suivi de l'état hydrique au cours d'un millésime .....	9
2.3.1	La relation entre l'état hydrique et le cycle de développement de la vigne.....	9
2.3.2	La mesure du potentiel de tige.....	9
3	La vigueur expliquée par l'équilibre entre l'état organique, azoté et minéral de la vigne .....	10
3.1	Eléments constitutifs de l'état azoté, organique et minéral .....	10
3.1.1	Besoins et formes d'azote disponibles pour la vigne.....	10
3.1.2	L'état organique du sol : disponibilité des éléments et processus biologiques associés	10
3.1.3	L'état minéral de la vigne liés à un équilibre entre éléments minéraux .....	11
3.2	Les mesures adaptées de l'état azoté, organique et minéral de la vigne.....	11
3.2.1	Mesure de l'état azoté de la vigne .....	11
3.2.2	Mesure de l'état organique et minéral de la vigne et de son environnement.....	12
	<b>PARTIE 3 : Matériels et méthodes .....</b>	<b>12</b>
1	Démarche globale de l'étude et le choix des variables de mesure utilisées .....	12
1.1	Démarche et choix de la zone d'étude.....	12
1.1.1	Prospection du parcellaire .....	12
1.1.2	Choix de la zone d'étude .....	12
1.1.3	Mise en place d'un essai Magnésie sur la zone d'étude .....	12
1.2	Choix des mesures et de leurs échantillonnages en fonction des variables de mesure utilisées	13
2	Stratégie d'analyse et de traitement des données de l'étude.....	13
2.1	L'utilisation des données NDVI.....	13
2.2	Création d'une base de données pour comprendre les origines des hétérogénéités de vigueur	13
2.3	Cartographie sur QGIS pour une représentation visuelle de certaines variables d'étude.....	14
3	Utilisation des données NDVI : définition des valeurs seuils et création d'une carte experte .....	14
3.1	Mise en place d'une nouvelle démarche d'analyse des données brutes en 2019 .....	14
3.2	Traitement des données brutes de 2019.....	14
3.2.1	Définition des valeurs minimales de NDVI à partir des manquants de 2018 et 2019 ...	14
3.2.2	Compréhension des valeurs NDVI.....	15
3.3	Méthode d'analyse des données nettoyées.....	15
3.3.1	Zonage scientifique des données .....	15
3.3.2	Classification visuelle du zonage .....	15
3.4	Définition des valeurs seuils de NDVI pour 2019 et choix de la carte finale .....	15
3.4.1	Choix des valeurs seuils de NDVI.....	15
3.4.2	Choix d'une carte finale pour cibler les utilisateurs .....	16
4	La vigueur expliquée par l'état hydrique : acquisition de données spatialisées .....	16
4.1	Mesure de la résistivité des sols pour caractériser leur hétérogénéité .....	16
4.2	Modélisation de la réserve utile dans le sol à partir de données pédologiques .....	16
4.2.1	Construction d'un patron spatial pour l'utilisation des données pédologiques de 2003	16
4.2.2	Modélisation de la réserve utile et du potentiel d'exploration pour les racines .....	17
4.3	Caractérisation de l'état hydrique du sol au cours du millésime 2019 .....	17
4.3.1	Mesures du stress hydrique au cours du millésime 2019 .....	17
4.3.2	Les paramètres clés du millésime 2019 et leur lien avec la contrainte hydrique.....	17

5	La vigueur expliquée par l'état organique, azoté et minéral .....	18
5.1	Caractérisation de l'état de nutrition azoté à deux échelles de mesure différentes .....	18
5.1.1	Mesure spatialisée avec le N-tester .....	18
5.1.2	L'état azoté à partir des analyses pétiolaires .....	18
5.2	Caractérisation de l'état de nutrition organique et minéral .....	19
5.2.1	Les analyses de sol comme indicateur de l'état de nutrition organique .....	19
5.2.2	Les ajustements d'apports foliaires en magnésium pour comprendre l'influence des carences .....	19
	<b>PARTIE 4 : Résultats.....</b>	<b>20</b>
1	Localisation des hétérogénéités de vigueur .....	20
1.1	Traitement des données brutes de 2019.....	20
1.1.1	Définition des valeurs minimales de NDVI à partir des manquants de 2018 et 2019... ..	20
1.1.2	Lien entre les valeurs NDVI et des indicateurs de vigueur .....	20
1.2	Méthode d'analyse scientifique des données nettoyées .....	21
1.3	Définition des valeurs seuils de NDVI pour 2019 et choix de la carte finale .....	21
1.3.1	Choix des valeurs seuils de NDVI.....	21
1.3.2	Choix d'une carte finale en fonction des objectifs souhaités .....	22
2	Approche globale de l'équilibre du système vigne .....	22
3	L'état hydrique relié au sol et à la vigueur .....	23
3.1	La résistivité des sols explicative des hétérogénéités intra-parcellaire de vigueur.....	23
3.2	Modélisation de la réserve utile dans le sol à partir de données pédologiques .....	23
3.2.1	Caractérisation spatiale de la réserve utile .....	23
3.2.2	Lien entre la réserve utile et les autres variables de l'état hydrique .....	24
3.3	Evolution de la contrainte hydrique au cours du millésime .....	24
3.3.1	Caractérisation de l'effet millésime à travers deux indicateurs de mesure.....	24
3.3.2	Lien entre ces deux indicateurs de mesures et la vigueur.....	24
4	L'état organique du sol responsable des hétérogénéités intra-parcellaire de vigueur .....	24
5	L'état azoté et minéral .....	25
5.1	L'état azoté de la vigne témoignant ou non des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur ....	25
5.2	L'état minéral de la vigne témoignant des hétérogénéités intra-parcellaire de la vigueur .....	25
5.3	Des apports foliaires de magnésie pour mieux comprendre le système vigne .....	26
	<b>PARTIE 5 : Discussion et perspectives d'optimisation des pratiques culturales.....</b>	<b>26</b>
1	Bilan sur l'étude .....	26
1.1	La localisation des hétérogénéités de vigueur .....	26
1.2	Hétérogénéités de vigueur : origines et réactions internes du système vigne.....	27
1.2.1	L'eau disponible pour la vigne explique les hétérogénéités de vigueur.....	27
1.2.2	L'état organique, azoté et minéral du sol et de la vigne : relations étroites à l'origine des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur .....	27
2	Limites et biais de l'étude.....	28
2.1	La mesure NDVI : une mesure d'expression végétative et non de vigueur .....	28
2.2	L'importance de l'effet millésime dans l'étude des origines des hétérogénéités de vigueur ....	28
2.3	Limite des outils de mesure des relations entre les hétérogénéités de vigueur et leurs origines	29
3	Perspectives d'évolution dans l'optimisation des pratiques culturales.....	29

3.1	Perspective d'optimisation de la modulation de dose .....	29
3.2	Perspective de modification du système de culture : les engrais verts .....	29
	<b>Conclusion.....</b>	<b>31</b>
	<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>32</b>
	<b>Annexes.....</b>	



## SIGLES ET ABREVIATIONS

AB	Agriculture Biologique
BD	BioDynamie
NDVI	Indice de végétation normalisé
U/ha	Unité par hectare
MO	Matière organique
CEC	Capacité d'échange cationique
C/N	Rapport carbone sur azote
ITK	Itinéraire technique
RU	Réserve utile
CAP	Chambre à pression
MPa	MégaPascal
Q3	Troisième quartile
Q1	Premier quartile
ANOVA	Analysis of Variances
ACP	Analyse en Composantes Principales
FTSW	Fraction d'eau du sol transpirante

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1 : Localisation de l'appellation Sauternes dans le vignoble Bordelais (gauche) et du Château Rieussec dans l'appellation Sauternes (droite) (Source : Dulong.com)
- Figure 2 : Les différents stades de développement de la pourriture noble (1 :sain – 2 et 3: dorés – 4 et 5 : pourri plein et confit – 6 : passerillé) (Source : academie-amorim.com)
- Figure 3 : Représentation de la topographie du Château Rieussec
- Figure 4 : Le parcellaire du Château Rieussec avec la répartition des cépages
- Figure 5 : Les différentes tailles du Château Rieussec (Sémillon et Sauvignon) (Source : vinovalie.com)
- Figure 6: Dissociation visuelle entre vigueur faible et forte au Château Rieussec
- Figure 7: Schéma descriptif de la relation entre la mesure de la donnée et la console Trimble de l'enjambeur (Source : trimble.com)
- Figure 8:Montage du dispositif sur l'enjambeur du GreenSeeker
- Figure 9:exemple de donnée NDVI acquise sur une parcelle du Château Rieussec (3 rangs sur 4 mesurés)
- Figure 10:Schéma bilan du contexte de l'étude (encadrés vert et marron : différents axes étudiés)
- Figure 11 : Interactions entre le rayonnement lumineux incident et la matière (Source : F.Pantin, SupAgro)
- Figure 12 : Evolution de la réflectance d'une feuille de vigne en fonction de la longueur d'onde étudiée (nm) (d'après Bourgeon, 2015)
- Figure 13 : Schéma du dispositif de mesure de la résistivité du sol (Source : Geocarta.net)
- Figure 14 : Comparaison entre les trois voies de résistivité sur une zone du parcellaire du Château Rieussec
- Figure 15 : Evolution du potentiel de tige en fonction de l'heure de la journée (d'après Choné et al., 2002)
- Figure 16 : Evolution de la conductance stomatique en fonction de l'indice de stress (d'après Möller et al., 2007)
- Figure 17 : Description des transports des minéraux au sein de la plante entre les organes sources et puits (Source : Medici, Montpellier SupAgro)
- Figure 18 : Evolution de l'état azoté du sol et de la vigne au cours du cycle végétatif (Source : fertilisation-edu.com)
- Figure 19 : Evolution du potassium au cours du cycle de développement (Source : A. Deloire, Montpellier SupAgro)
- Figure 20 : Pourriture grise sur raisins
- Figure 21 : Mesure avec le N-tester sur vigne
- Figure 22 : Zone d'étude choisie et placettes de mesure associées
- Figure 23 : Description de la localisation de l'essai magnésie avec une comparaison des dispositifs entre 2018 et 2019
- Figure 24 : Echelles de mesure effectuées lors de cette étude
- Figure 25 : Schéma explicatif du traitement des données NDVI de 2010 à 2018
- Figure 26 : Base de données de l'étude
- Figure 27 : Schéma explicatif du traitement des données en 2019
- Figure 28 : Dispositif de mesure du statut hydrique de la vigne à l'aide de la chambre à pression
- Figure 29 : Graphique de la somme des températures de base en fonction du temps pour les millésimes 2016, 2017, 2018 et 2019
- Figure 30 : Evolution du cumul de pluie pour chaque millésime
- Figure 31 : Différenciation entre le pétiole et le limbe d'une feuille de vigne
- Figure 32 : Valeurs Seuils de NDVI <sub>manquants</sub> pour chaque des parcelles (Source : Aspexit)
- Figure 33 : Premier niveau de corrélation entre NDVI et vigueur visuelle de terrain (Source : Aspexit)

Figure 34 : Représentation des corrélations entre les données NDVI, le zonage NDVI et les différents niveaux de vigueur visuelle

Figure 35 : Zonage pré-lissé obtenu après traitement des données par l'Aspexit (gauche) avec une moyenne de NDVI définie pour chaque parcelle (droite)

Figure 36 : Carte de vigueur visuelle superposée aux délimitations du zonage pré-lissé

Figure 37 : Deuxième niveau de corrélation entre NDVI et vigueur visuelle et détermination des valeurs seuils (Source : Aspexit)

Figure 38: Carte finale obtenue après fusion des deux zonages les plus précis

Figure 39: Variables corrélées avec la vigueur visuelle et possédant une p-value inférieure à 0.05 à partir de la totalité de la base de données

Figure 40 : ACP des variables propres à l'étude du statut hydrique

Figure 41: Corrélations significatives des variables de l'ACP Etat hydrique

Figure 42 : Troisième voie de résistivité obtenues sur l'ensemble du parcellaire (0-200cm)

Figure 43: Représentation de la réserve utile calculée sur la zone d'étude

Figure 44: Evolution du potentiel de tige au cours du cycle végétatif de la vigne

Figure 45: Graphique traçant l'évolution de l'allongement des rameaux (ADR) pour chaque placette de mesure en fonction du cycle végétatif

Figure 46:Corrélation significative entre l'aire sous la courbe de l'ADR et la vigueur visuelle

Figure 47: ACP des variables de l'état organique

Figure 48: Corrélations entre les variables de l'ACP Etat organique et la vigueur visuelle possédant une p-value inférieure à 0.05

Figure 49: Répartition des valeurs de N-tester au stade la Véraison

Figure 50 : Variables corrélées avec la vigueur visuelle et significatives (inférieure à 0.05 en p-value)

Figure 51 : Proposition de carte finale de vigueur avec deux classes de vigueur intermédiaires

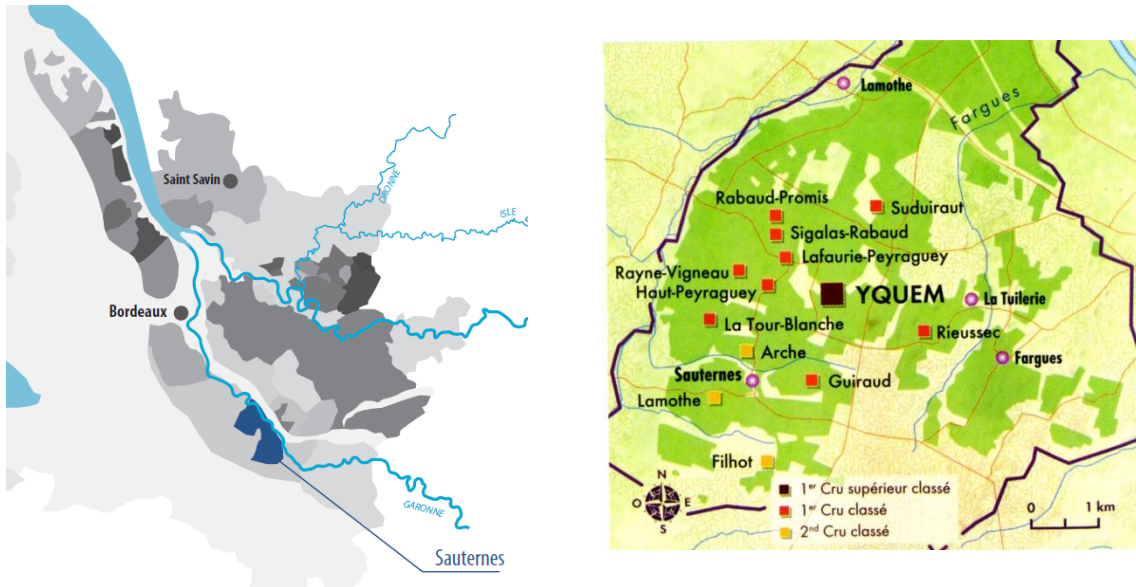
Figure 52 : Proposition d'une carte de préconisation associée

Tableau 1 : Description des piliers de gestion utilisés pour homogénéiser les hétérogénéités de vigueur

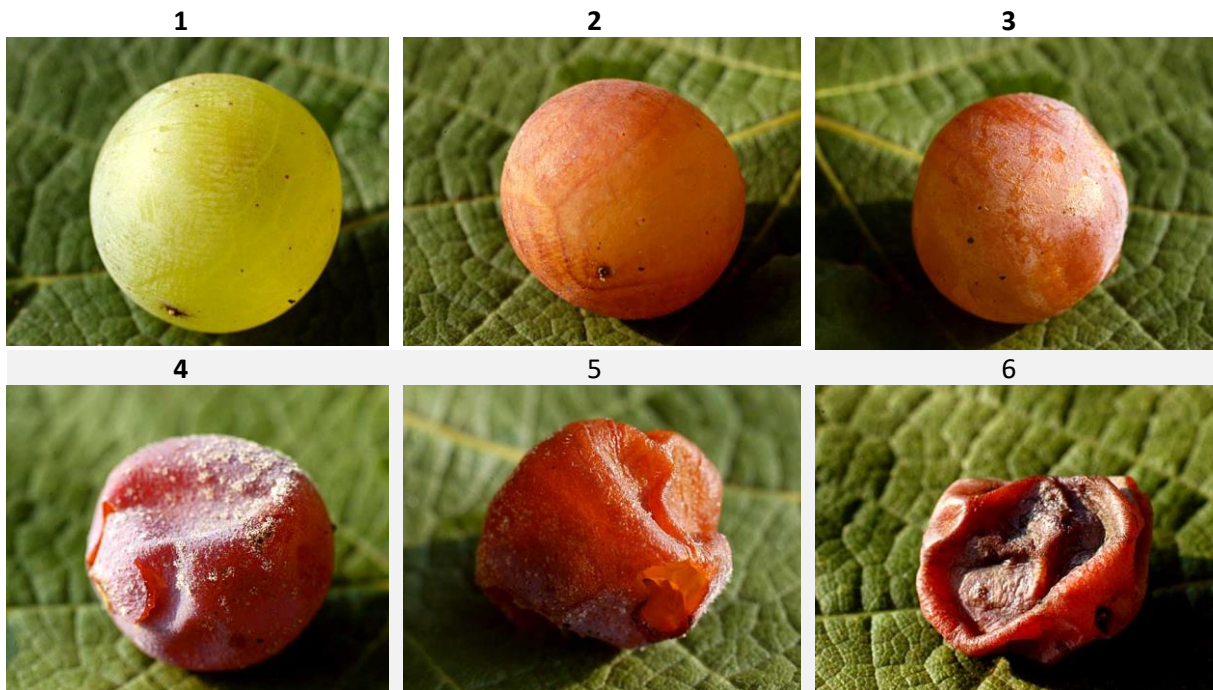
Tableau 2: Détails des trois méthodes possibles utilisées en proxidtection et télédtection pour mesure le NDVI

Tableau 3: Paramètres pris en compte pour choisir la zone d'étude

Tableau 4: Echelle de mesure associée à chaque mesure effectuée pour répondre à une hypothèse d'étude



**Figure 1** : Localisation de l'appellation Sauternes dans le vignoble Bordelais (gauche) et du Château Rieussec dans l'appellation Sauternes (droite) (Source : Dulong.com)



**Figure 2** : Les différents stades de développement de la pourriture noble (1 :sain – 2 et 3: dorés – 4 et 5 : pourri plein et confit – 6 : passerillé) (Source : academie-amorim.com)

## Introduction

Le Sauternais est une appellation du vignoble Bordelais (Figure 1) reconnue mondialement pour la qualité du vin liquoreux produit à l'aide d'un microclimat caractérisé par l'alternance de périodes humides et sèches favorables au développement du *Botrytis Cinerea*. La prolifération sur les baies de ce champignon induit leur évaporation et provoque ainsi la concentration en sucres à l'origine du goût spécifique de ces vins (Figure 2).

La croissance de la vigne est associée à trois notions fondamentales que sont la capacité de croissance, l'expression végétative et la vigueur (*Bourgeon*, 2015). Elle est, dans la littérature, plus généralement caractérisée par la croissance des rameaux et particulièrement leur longueur (Bouard, 1966; Champagnol, 1984; Huglin, 1986; Branas et al., 1946).

L'expression végétative, quant à elle, s'exprime à travers l'édification du végétal (sarments, feuilles, fruits et par l'accroissement annuel des racines et du tronc) (Champagnol, 1984) tandis que la vigueur témoigne de l'activité métabolique des organes en croissance. Elle se traduit par l'intensité de la respiration, de la protéosynthèse, du fonctionnement des méristèmes ou de la vitesse de croissance (Champagnol, 1984). Ainsi, les souches vigoureuses se rencontrent lorsque les conditions du milieu et les conditions internes à la plante sont optimales.

Le Château Rieussec, propriété des Domaines Barons de Rothschild (Lafite) depuis 2009, est situé sur les hauteurs de l'appellation aux côtés du célèbre Château d'Yquem (Figure 1). Inscrit dans une réelle dynamique de recherche et développement pour améliorer ses pratiques viticoles et vinicoles, ce domaine rencontre depuis une dizaine d'année de réelles problématiques de gestion d'excès et d'hétérogénéité de vigueur au sein du vignoble.

A l'heure actuelle, la dynamique d'évolution repose dans la compréhension du système vigne dans sa globalité pour être capable de trouver les piliers d'actions nécessaires à l'homogénéisation du vignoble. L'idée est donc à la fois d'être capable de localiser le plus précisément possible ces zones de vigueur hétérogènes, permettant par la suite de mieux comprendre les origines de ce comportement au sein même d'une parcelle.

C'est donc dans l'optique du maintien de la qualité des vins produits et dans l'innovation et l'amélioration des pratiques viticoles qu'une étude de ces hétérogénéités intra-parcellaires de vigueur a été mise en place. Le mémoire qui suit comportera une partie sur le contexte de l'entreprise et de l'étude pour ensuite présenter l'état de l'art propre aux notions qui seront abordées. La description du matériel et méthode ainsi que la présentation des résultats permettront de trouver des réponses à cette étude. La discussion mettra en relation ces résultats avec ce que nous savons de par les études scientifiques déjà réalisées sur le sujet pour pouvoir conclure sur cette expérimentation portant sur la vigueur du Château Rieussec.





Figure 3 : Représentation de la topographie du Château Rieussec

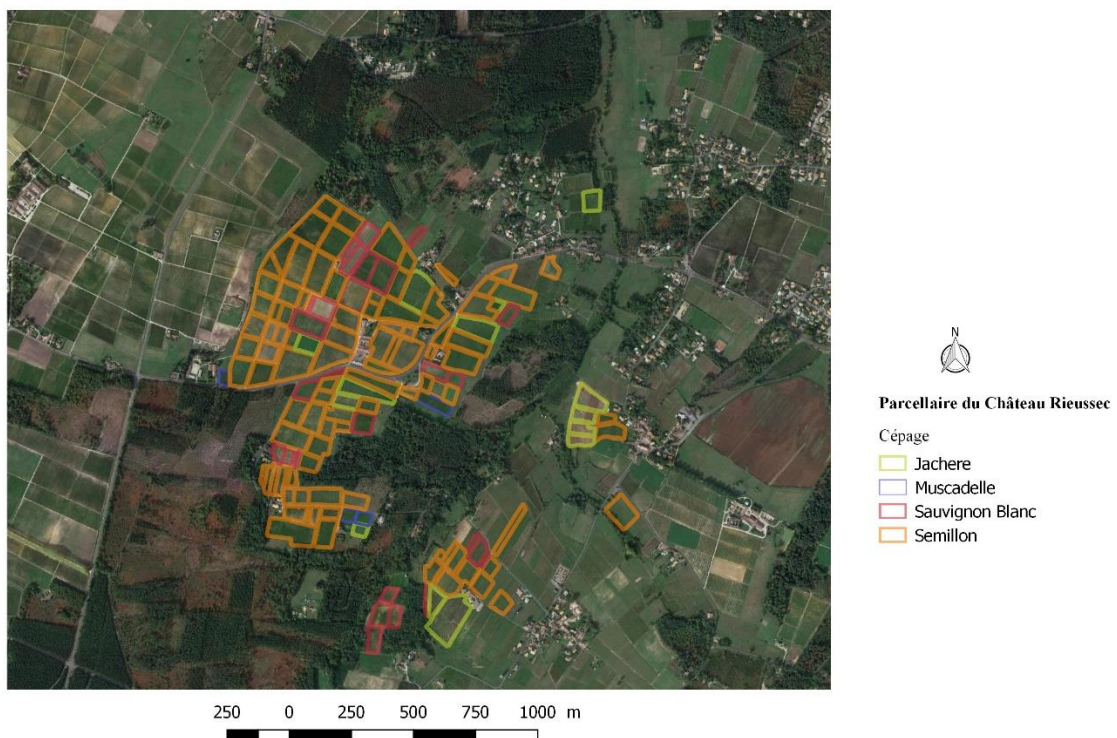


Figure 4 : Le parcellaire du Château Rieussec avec la répartition des cépages

# PARTIE 1 : Contexte, problématique et hypothèses d'étude

## 1 Contexte de l'entreprise : un premier grand cru classé de Sauternes

### 1.1 Une amplitude de topographie sur l'ensemble du vignoble

Au total, le vignoble du Château Rieussec représente 71.5 hectares de vignes répartis en 101 parcelles. La particularité du vignoble repose dans sa diversité pédologique mais aussi sur la topographie qui fluctue entre 44.5 et 67.5 mètres et qui, combinée aux expositions de plantation (nord-sud ou est-ouest), apporte beaucoup de diversité et crée ainsi un facteur non négligeable de variabilité du raisin produit sur le vignoble (Figure 3).

### 1.2 Des sols diversifiés

La carte des sols du Château Rieussec a été effectuée en 2003 à l'aide de fosses pédologiques ainsi qu'avec 567 sondages tarières pour définir au mieux les unités de sols (Annexe 1). Cette diversité pédologique est due à une forte proportion de sols gravelo-sableux à matrice argilo sableuse en sous-sol à des sols peu épais de versant sur des affleurements argileux ou marneux. La diversité des sols sur le Château Rieussec est responsable d'une forte hétérogénéité en intra et en inter parcellaire du végétal et du raisin.

### 1.3 Un matériel végétal diversifié, adapté et renouvelé

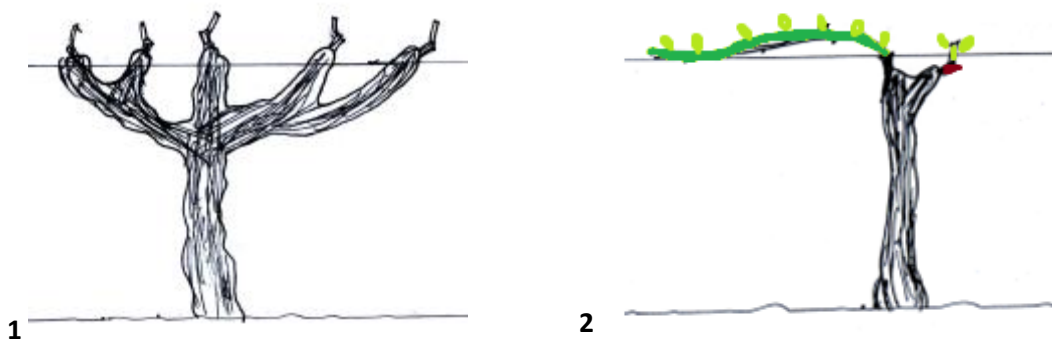
L'ensemble du parcellaire du Château Rieussec est réparti entre trois cépages : le Sémillon à 80.4 % (57.5 ha), le Sauvignon (12.4 ha) à 17.4 % et la Muscadelle à 2.2% (1.6 ha) (Figure 4). Deux types de vins sont produits : un vin blanc sec, le « R », et deux vins liquoreux, le second vin « Carmes de Rieussec » et le premier vin « Château Rieussec ».

Le matériel végétal présent sur le vignoble est divers et connu. Chaque association clone et porte greffe est réfléchié en fonction du sol : actuellement les clones 909, 173 ou bien 315 sont présents avec une majorité de 3309, 420A et de Riparia Gloire de Montpellier pour les portes greffes. Les vignes les plus anciennes ont 70 ans et en moyenne le vignoble à une trentaine d'années.

Divers essais sont conduits sur des zones particulières du vignoble afin de garder une dynamique de recherche et développement active et en perpétuelle évolution. A titre d'exemple, l'éclatement des baies est observable sur des vignes vigoureuses du vignoble portant le clone de Sémillon 315. La question du choix judicieux du matériel végétal a été soulevée et la mise en place d'un essai de sur-greffage a été effectuée en avril 2019. Ce type d'essai rentre à la fois dans des questions de restructuration du vignoble, de compréhension des origines d'hétérogénéité de vigueur en intra parcellaire mais aussi de sensibilité sanitaire.

### 1.4 Itinéraires techniques au Château Rieussec

L'ensemble des travaux du vignoble sont répartis entre manuels (91% des heures de travail) et mécaniques.



**Figure 5** : Les différentes tailles du Château Rieussec (Sémillon et Sauvignon) (Source : vinovalie.com)



**Figure 6**: Dissociation visuelle entre vigueur faible et forte au Château Rieussec

**Tableau 1** : Description des piliers de gestion utilisés pour homogénéiser les hétérogénéités de vigueur

Pilier de gestion	Objectif	Exemple appliqué
<b>Agriculture de précision</b>	Outil d'aide à la décision en modulation de dose (phytosanitaire et fertilisant)	Modulation de dose d'engrais en 2017 : <ul style="list-style-type: none"> <li>- 400T/ha de l'engrais MV100 sur les zones peu vigoureuses</li> <li>- 800 T/ha pour les zones de vigueur moyenne.</li> </ul>
<b>Itinéraire technique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gérer les excès de vigueur ;</li> <li>- améliorer la structure du sol.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- semis de couverts ;</li> <li>- taille ;</li> <li>- semis en intra-parcellaire.</li> </ul>



- **La taille** est pratiquée en éventail pour le Sémillon et la Muscadelle, ou dit en cot et en Guyot simple pour le Sauvignon (Figure 5).
- **Les travaux en verts** s'étalent sur l'ensemble du cycle végétatif : épamprage, relevages, palissage, effeuillages et échardage.

Parmi les travaux mécaniques, une dissociation est faite entre la protection phyto-sanitaire et les travaux d'entretien du végétal et du sol.

- **La protection phytosanitaire** se fait sur les 71.5 ha du vignoble. 66ha suivent un itinéraire technique Standard et raisonné (possibilité d'utiliser un produit de biocontrôle ou de type phytosanitaire si nécessaire), 5.5 ha suivent un itinéraire en agriculture Biologique depuis 2019 parmi lesquels 2.1 ha reçoivent des applications de bouse de corne et de silice, rentrant dans une démarche d'agriculture Biodynamique (dans les deux cas les produits sont homologués en AB et BD mais aucune certification n'est recherchée).
- **Les travaux d'entretien du végétal et du sol** au cours du cycle végétatif se dissocient entre le rognage pour la gestion de la canopée, le passage des interceps et des tondeuses pour entretenir les enherbements et les apports de fertilisation organo-minérale pour gérer au mieux les hétérogénéités du vignoble.

L'engrais est apporté à l'aide d'un épandeur de 21 mètres de large avec 6 tronçons de sorties permettant ainsi d'effectuer une gestion en intra parcellaire du vignoble.

En complément à cela, des ajustements d'engrais foliaires sont effectués au cours de la saison pour anticiper les carences magnésienne en fin de campagne sur le vignoble.

## 2 Contexte de l'étude

### 2.1 Origines et piliers de gestion des hétérogénéités de vigueur

Des apports de terre ont été effectués au moment de la restructuration de certaines parcelles, ce qui a créé des déséquilibres de vigueur très localisés responsables des hétérogénéités en intra parcellaire et en inter parcellaire observables à l'heure actuelle (Figure 6).

Par ailleurs, des apports importants de fumure ont eu lieu il y a de nombreuses années sur certaines parcelles (information d'échelle de temps et de quantités apportées non disponibles). C'est en partie sur ces parcelles que des excès de vigueur sont observés.

Cet historique des pratiques de fumure du Château Rieussec a donc induit au cours du temps l'apparition d'un vignoble hétérogène en intra parcellaire avec des zones majoritairement de forte vigueur.

En réponse à cela, deux piliers de gestion reliés entre eux ont été pensés depuis 2009: utiliser l'agriculture de précision, ce qui permet d'avoir accès à de nouvelles données à l'aide d'outils et méthodes adaptées au vignoble et de faire évoluer les itinéraires techniques au cours du temps (Tableau 1).

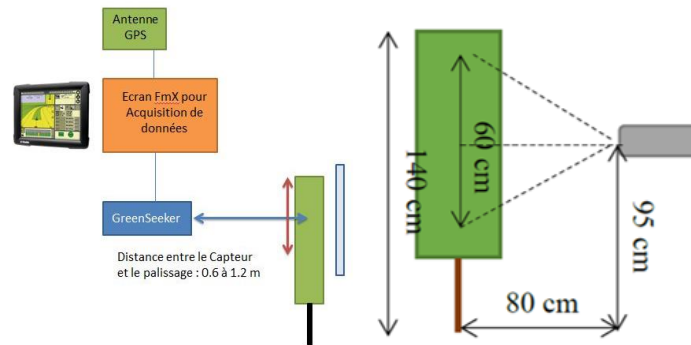


Figure 7: Schéma descriptif de la relation entre la mesure de la donnée et la console Trimble de l'enjambeur (Source : trimble.com)



Figure 8: Montage du dispositif sur l'enjambeur du GreenSeeker

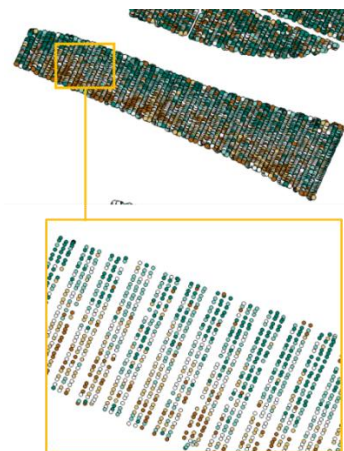


Figure 9: exemple de donnée NDVI acquise sur une parcelle du Château Rieussec (3 rangs sur 4 mesurés)

L'objectif pour 2020 est d'utiliser un semoir direct à partir duquel il sera possible d'effectuer des semis en intra-parcellaire plus précis pour répondre au mieux aux besoins de chaque zone hétérogène du parcellaire.

## 2.2 La mesure du NDVI comme indicateur de vigueur

Les hétérogénéités de vigueur étant observables au cours du temps, le but a été de comprendre la localisation précise de ces zones de vigueur différentes pour pouvoir moduler au mieux la fertilisation en aval. L'étude de l'expression végétative a été prise en compte dans un premier temps. Le Château Rieussec a donc décidé d'utiliser une méthode de proxidtection, le GreenSeeker (*Trimble Agriculture*), qui permet d'obtenir un indice de végétation normalisé (le NDVI) en mesurant l'expression végétative sur le plan vertical de palissage de la vigne (Figure 7).

### 2.2.1 L'acquisition des valeurs NDVI

Depuis 2010, l'acquisition des données NDVI par le GreenSeeker se fait à l'aide de trois capteurs positionnés sur châssis devant un enjambeur (Figure 8). Chaque capteur enregistre deux données par seconde soit 5000 données par hectare (paramétrage défini par l'équipe technique). La réalisation des mesures se fait une fois dans l'année, début juillet (choix de la période de mesure décidé par l'équipe technique lorsque les différences d'expression végétative de la vigne sont visibles) et dépend beaucoup des conditions météo et de la variété végétale étudiée (Rudniki, 2010).

Une console GPS (*Trimble*) est positionnée dans l'enjambeur effectuant la mesure NDVI avec le GreenSeeker et a pour but de positionner les données dans l'espace. L'ensemble des données acquises sont ensuite exploitables (Figure 7 et 9).

### 2.2.2 Démarche historique de réflexion sur l'outil de mesure

La mesure avec le GreenSeeker a été sujette à un paramétrage complexe entre 2009 et 2018 pour obtenir des données satisfaisantes avec en plus des problèmes techniques de capteurs défaillants. Une remise en question de cet outil de mesure par l'équipe technique a permis de soulever deux pistes de réflexion interne au Château Rieussec permettant d'assurer la fiabilité de l'outil :

- **l'amélioration de la donnée acquise par les trois capteurs** : pendant six années (de 2011 à 2016), l'acquisition des données NDVI par le GreenSeeker se faisait à l'aide de trois capteurs qui permettaient d'obtenir une unique mesure (ce qui n'était pas le cas lors du début de l'utilisation de l'outil en 2010). La donnée à un instant  $t$  était donc moyennée entre les trois capteurs et correspondait à une seule coordonnée GPS. C'est à partir de 2017 que les trois capteurs ont été de nouveau (comme en 2010) dissociés chacun par une position GPS précise dans l'objectif d'obtenir un résultat plus précis et représentatif de la réalité ;
- **l'approfondissement** de l'outil de mesure au vignoble : à travers la précision de la donnée, sa rapidité d'acquisition et d'analyse en aval. Pour cela, un essai de comparaison entre GreenSeeker, Avion Jaune, Avidordrone et Physiocap est mené en

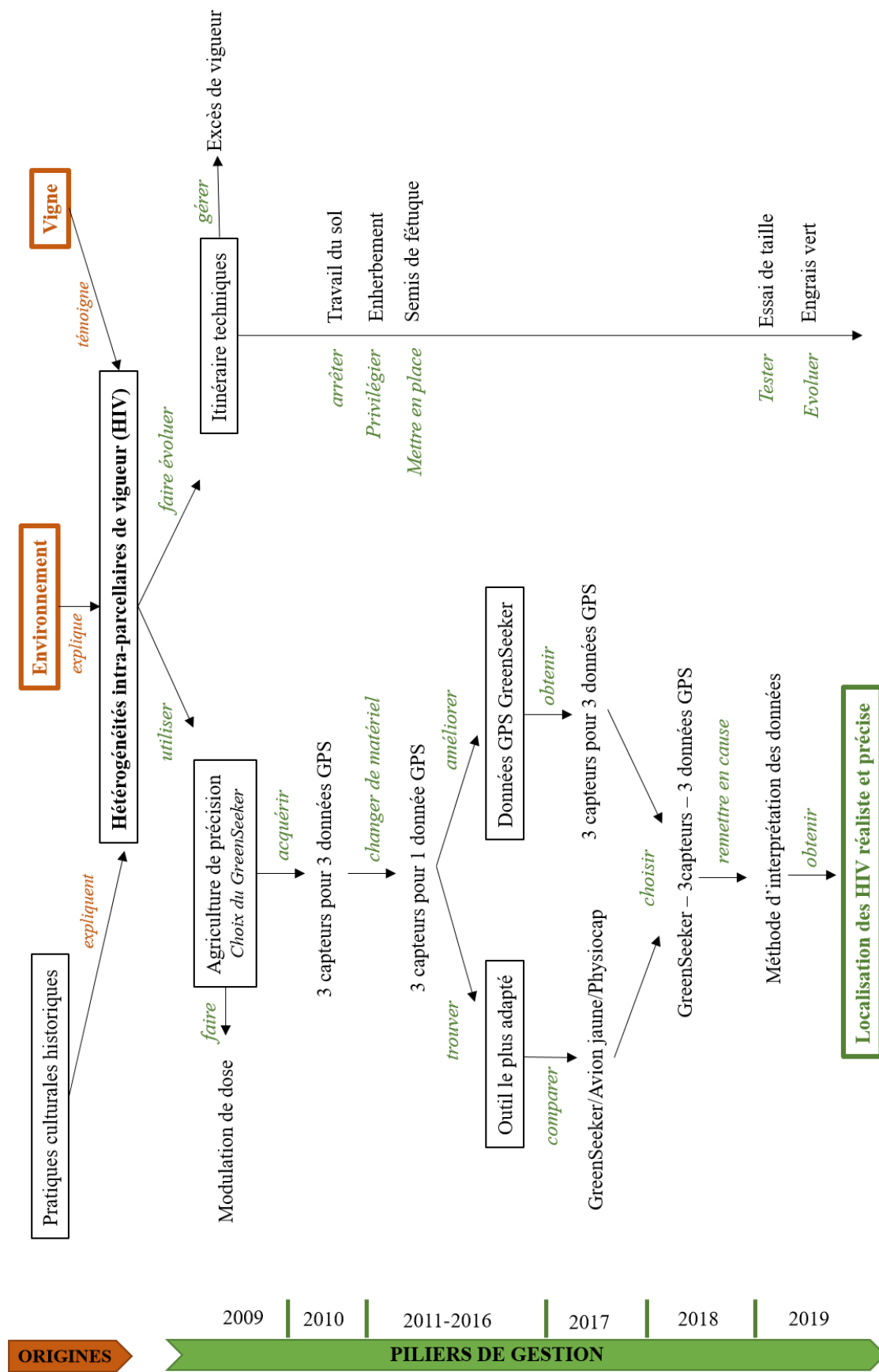


Figure 10: Schéma bilan du contexte de l'étude (encadrés vert et marron : différents axes étudiés)

2017. Le GreenSeeker a été conservé car il représentait mieux l'expression végétative du parcellaire. Lorsque les capteurs fonctionnaient correctement, la donnée était satisfaisante et présentait moins d'aberrations qu'avec les deux autres outils de mesure.

Le but a donc été de reproduire en 2019 cette mesure à la même période pour pouvoir interpréter au mieux la localisation des hétérogénéités intra parcellaires de vigueur à partir d'une mesure d'expression végétative. L'assurance d'une bonne fiabilité de l'outil a soulevé en parallèle la question du traitement de cette donnée acquise, le NDVI.

### **3 Problématique et hypothèses de l'étude**

#### **3.1 Problématique : interpréter et comprendre la localisation et les origines des hétérogénéités de vigueur**

L'outil de mesure ayant été testé en 2017 et vérifié en 2018 (données satisfaisantes), la question en 2019 a été de répondre aux interrogations concernant le traitement et l'interprétation des données NDVI. Il a donc été nécessaire de faire un lien entre ces mesures NDVI traduisant l'expression végétative de la vigne avec les indicateurs de la vigueur. Faire ce lien permet de mieux interpréter la donnée et donc de localiser les hétérogénéités intra parcellaire de vigueur de manière plus exhaustive et moins subjective (comme c'était le cas jusqu'ici). La question ensuite a été de comprendre quelles en étaient leurs origines (Figure 10).

L'objectif est donc de répondre à deux grandes questions majeures :

**Comment localiser les hétérogénéités de vigueur visuelle à partir d'un outil de viticulture de précision pour affiner leur gestion ?**

**Quelles sont les origines expliquant ces hétérogénéités localisées de vigueur en intra et inter parcellaire?**

#### **3.2 Hypothèses d'étude**

Les trois hypothèses d'étude présentées ci-dessous seront à valider ou non pour répondre à cette problématique.

##### *3.2.1 La localisation des hétérogénéités intra parcellaires de vigueur est possible à l'aide du NDVI et d'une expertise de terrain*

Les données objectives de vigueur apportées par le GreenSeeker doivent être comparées à l'évaluation visuelle de vigueur estimée par les experts du domaine pour pouvoir définir au mieux le lien entre des appréciations de vigueur faible, moyenne ou forte et des données NDVI du GreenSeeker. Cela repose donc sur l'association entre l'analyse scientifique de la donnée NDVI et l'expertise terrain de l'opérateur pour estimer la vigueur.

##### *3.2.2 Les hétérogénéités de vigueur sont liées à l'état hydrique de la vigne.*

L'eau serait un facteur explicatif de la vigueur. Disponible ou non pour la vigne, sa teneur se peut être limitante ou au contraire excessive et peut donc avoir une influence sur la vigueur

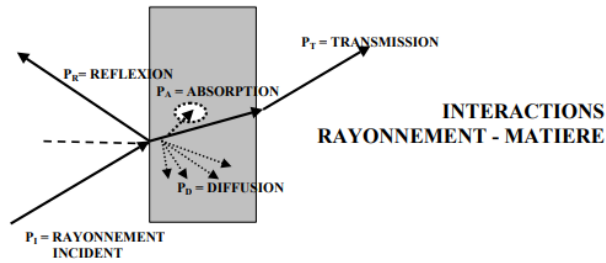


Figure 11 : Interactions entre le rayonnement lumineux incident et la matière (Source : F.Pantin, SupAgro)

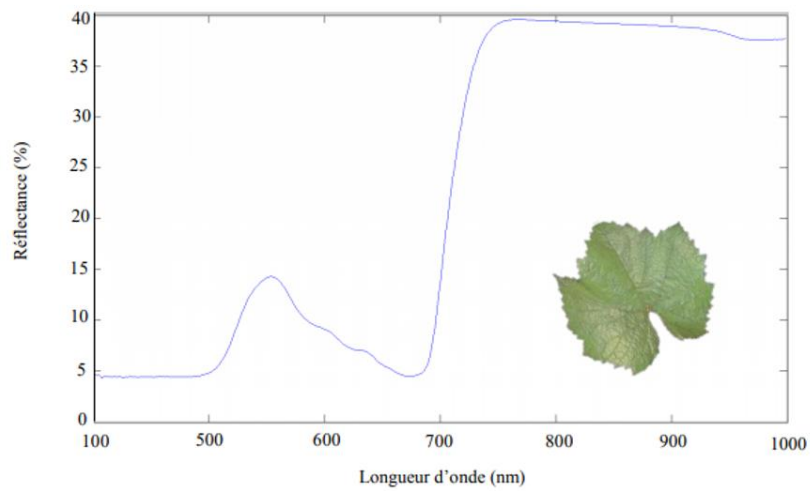


Figure 12 : Evolution de la réflectance d'une feuille de vigne en fonction de la longueur d'onde étudiée (nm) (d'après Bourgeon, 2015)

(Van Leeuwen, 2008). Plusieurs variables ont donc été choisies pour représenter l'état hydrique de la vigne: la résistivité, la réserve utile du sol, la profondeur du sol et la mesure du stress hydrique au cours de la saison.

### 3.2.3 *Les hétérogénéités de vigueur sont liées au statut organique et minéral de la vigne et de son environnement.*

Le système vigne est à raisonner dans sa globalité. C'est pourquoi, en plus de la dimension hydrique du milieu dans lequel elle se trouve, il est nécessaire de prendre en compte l'état organique, azoté et minéral du sol et du système en lui-même (Annexe 2).

Afin de compléter l'étude de l'état minéral, un essai magnésie a été mis en place en 2018 et 2019 pour tester l'effet d'un complément foliaire en magnésie au cours de la saison.

## **PARTIE 2 : Recherches scientifiques sur les facteurs de compréhension et d'explication des hétérogénéités de vigueur**

### **1 L'utilisation du GreenSeeker (NDVI) pour localiser les hétérogénéités de vigueur**

Dans le but d'optimiser et d'adapter au mieux les pratiques agricoles aux caractéristiques intrinsèques des plantes, l'utilisation de nouvelles techniques précises de caractérisation parcellaire ont émergé. C'est ainsi que l'agriculture puis la viticulture de précision ont été définies (Pierce & Nowak, 1999; Whelan *et al.*, 1999), permettant ainsi de moduler au mieux les pratiques culturales.

L'agriculture de précision permet de répondre à deux notions différents : à la variabilité spatiale à l'intérieur de la parcelle, plus connue sous le nom de variabilité intra-parcellaire, mais aussi à la variabilité temporelle qui permet de prendre en compte le cycle de développement de la culture étudiée (McBratney *et al.*, 2005).

#### **1.1 L'acquisition des mesures NDVI à l'aide du GreenSeeker**

##### *1.1.1 La mesure du NDVI, principe et méthodes existantes*

L'une des premières méthodes utilisées pour estimer la vigueur de la vigne à travers la caractérisation de son couvert végétal est l'imagerie multi-spectrale (Mulla, 2013). En règle générale, sur une feuille, les rayons lumineux incidents subissent trois phénomènes : une partie d'entre eux est réfléchi (réflectance), une autre traverse l'organe végétal (transmittance) et une dernière est absorbée par des composés présents dans les feuilles (absorbance). La réflectance est couramment utilisée pour caractériser un couvert végétal (Lamb *et al.*, 2001; Johnson *et al.*, 2003; Mulla, 2013) (Figure 11 et 12).

L'indice de végétation normalisé (NDVI) est le deuxième indice le plus utilisé après l'indice de surface foliaire pour caractériser le couvert de la vigne. Il est donc possible de l'utiliser pour optimiser la gestion de la vigueur de la vigne (Lamb *et al.*, 2001; Primicerio *et al.*, 2012).

**Tableau 2:** Détails des trois méthodes possibles utilisées en proxidtection et télédtection pour mesure le NDVI

Type	Outil	Objectif	Avantage	Inconvénients
<b>Télédtection</b>	Avion Jaune	Représenter la vigueur à l'aide d'une mesure au-dessus du feuillage	Rapide, peu onéreux	NDVI de la partie supérieure de la vigne et des inter-rangs
<b>Proxydtection</b>	Physiocap	Caractérise la biomasse de la vigne avant la taille	Précis Information supplémentaire pour la fertilisation	Fiabilité GPS Temps d'intervention Coût
<b>Proxydtection</b>	GreenSeeker	Représenter la vigueur à l'aide d'une mesure sur le côté du feuillage	Pas d'interface lié au sol, traitement des manquants facile	Calibrage des capteurs Interprétation des vignes hautes et des jeunes vignes



Il est calculé à partir de données en réflectance issues des régions spectrales dans le rouge (R) et le proche infrarouge (NIR) selon la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}) - (\text{R}) / (\text{NIR}) + (\text{R})$$

Le NDVI peut prendre des valeurs entre 0 à 1 en présence de végétation. Plus la valeur est proche de 1 et plus la végétation est verte et dense. La confiance accordée à cet indice dépend fortement des conditions climatiques ou bien de l'éclairement de la végétation lors de la prise de mesure (Mulla, 2013 et Moran *et al.*, 1997).

La mesure du NDVI peut se faire à l'aide de capteurs (proxy-détection) ou via un outil survolant la vigne (télédétection) (Tableau 2).

### *1.1.2 La mesure du NDVI par le GreenSeeker*

Le Greenseeker est un capteur de proxy-détection actif composé de deux types de diodes émettant des rayons lumineux rouges (656 nm) et proche infrarouges (774 nm) de forte intensité à une fréquence de 100 Hz. Un photorécepteur capte la fraction de rayons lumineux réfléchis par la végétation à une fréquence de 50 Hz. Il est possible de l'embarquer sur des engins motorisés de type enjambeur pour permettre d'observer le feuillage dans le plan de palissage.

A partir des informations réceptionnées, le Greenseeker permet de déterminer l'indice de végétation normalisé NDVI. Celui-ci permet de caractériser la végétation étudiée à la fois d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Cet indice de végétation normalisé acquis à l'aide du GreenSeeker est, dans certaines situations, corrélé au Vertical Leaf Area Index (VLAI) mais aussi à la porosité du feuillage (Goutouly *et al.*, 2006). L'acquisition des mesures NDVI est optimal à la véraison (Rousseau *et al.*, 2008).

## **1.2 Utilisation du NDVI comme outil d'aide à la décision**

Le Greenseeker est un outil d'aide à la décision notamment utilisé pour optimiser la fertilisation azotée en effectuant de la modulation de dose.

Les données GreenSeeker sont des données à très haute résolution spatiale et très bruitées. Il est donc nécessaire de trouver une méthode adaptée pour simplifier leur visualisation et pour aider les utilisateurs à prendre des décisions pour optimiser les pratiques de gestion (Leroux, 2018). Dans le cas du Château Rieussec, le but est donc d'établir un lien entre une vigueur experte et une expression végétative mesurée par le GreenSeeker. Pour s'y faire, une méthode de modulation intra parcellaire par zonage a été effectuée en faisant appel à un prestataire externe. Utiliser ce type de méthode permet de considérer les valeurs dans l'espace et de délimiter des unités homogènes de points (zones) à partir desquelles il est possible d'y associer une classe de vigueur visuelle (Source : Aspexit.com).

## **2 L'état hydrique de la vigne, un facteur explicatif de la variabilité intra parcellaire du vignoble**

L'état hydrique de la vigne se raisonne en fonction des besoins de la vigne en eau mais aussi en fonction de sa disponibilité dans l'environnement de croissance du végétal. De ce fait,

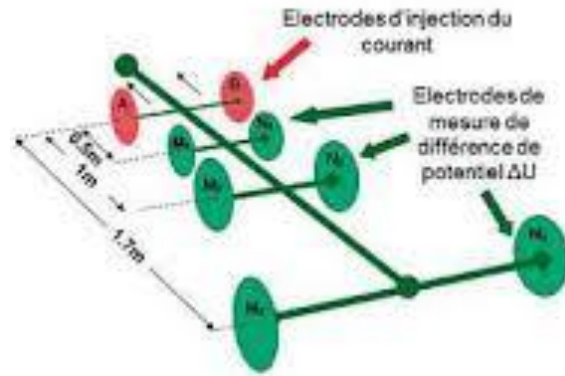


Figure 13 : Schéma du dispositif de mesure de la résistivité du sol (Source : Geocarta.net)

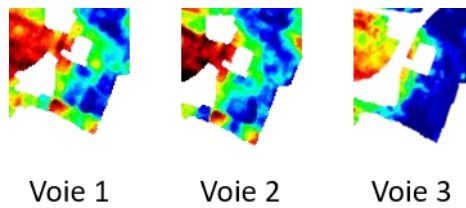


Figure 14 : Comparaison entre les trois voies de résistivité sur une zone du parcellaire du Château Rieussec

l'architecture de la végétation apporte une information importante, notamment grâce à la surface foliaire totale et exposée (Carbonneau, 1995).

## **2.1 La résistivité comme outil d'aide à la décision pour caractériser les unités spatiales de sol**

### *2.1.1 Principe de mesure de la résistivité*

La résistivité électrique, exprimée en ohm.mètre ( $\Omega$ .mètre), retranscrit la capacité du sol à s'opposer au passage d'un courant électrique. C'est une méthode non-destructive et à haute résolution qui permet de caractériser les hétérogénéités du sol de manière quasi-continue dans l'espace (Samouëlian *et al.*, 2005).

Elle se mesure par l'injection d'un courant électrique d'intensité connue dans le sol via deux électrodes. Deux autres électrodes permettent de mesurer la différence de potentiel qui en résulte. Il est possible de positionner d'autres paires d'électrodes à des distances plus grandes afin d'obtenir plusieurs mesures correspondantes à plusieurs profondeurs de sol, l'ensemble étant fait de manière simultanée (Dabas et Cassassolles, 2002) (Figure 13 et 14).

### *2.1.2 Paramètres de variabilité de la résistivité*

La résistivité électrique mesurée va dépendre de plusieurs paramètres propres au sol telles que la nature des particules solides (taille et minéralogie), la présence d'éléments grossiers et leur arrangement dans l'espace (propriétés de porosité), le degré de saturation en eau ou bien encore la température (Samouëlian *et al.*, 2005).

Des sols trop secs ou trop caillouteux en surface peuvent induire une résistance de contact trop forte entre le sol et les électrodes, ce qui dégradera la qualité des mesures qui porteront une résistivité plus grande que la normale. Il est important de tenir compte du travail d'un sol cultivé lorsque l'on procède à ce type de mesure. En effet, le retournement d'un horizon de sol peut affecter la pénétration du courant (Besson *et al.* Sd). Il faut donc veiller à réaliser les mesures dans des conditions hydriques et de températures les plus constantes et homogènes possibles.

### *2.1.3 Utilisation des données de résistivité*

Puisque la résistivité électrique d'un sol est directement liée aux caractéristiques géopédologiques reconnues comme en partie responsables du fonctionnement de la vigne et de la composition de la vendange, il est donc intéressant d'utiliser cet outil de mesure pour comprendre les origines des hétérogénéités de vigueur observables dans certains vignobles. En effet, le poids de bois de taille moyen par souche se révèle être, dans certains contextes d'étude, corrélé négativement avec la résistivité électrique du sol, ce qui permet donc de créer un lien direct entre résistivité électrique et vigueur de la vigne dans certaines situations (Goulet *et al.*, 2006).

## **2.2 La réserve utile du sol comme indicateur de l'état hydrique de la vigne**

Cet état hydrique dépend, d'une part, de l'interaction entre la réserve utile du sol facilement exploitable par les racines, du volume et de la profondeur d'enracinement, du type de racines et, d'autre part, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) (Deloire *et al.*, 2008).

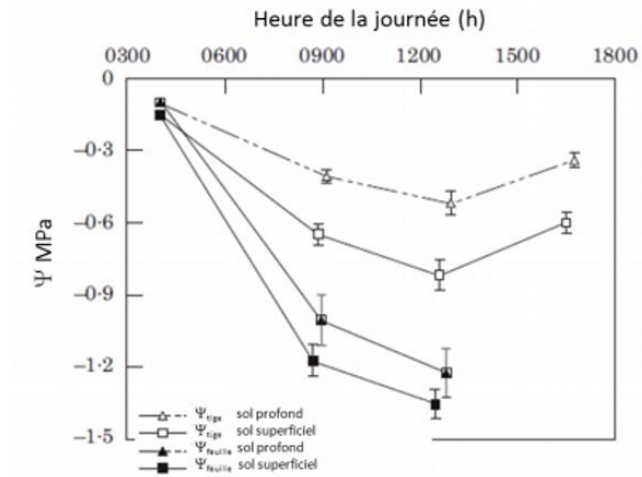


Figure 15 : Evolution du potentiel de tige en fonction de l'heure de la journée (d'après Choné et al., 2002)

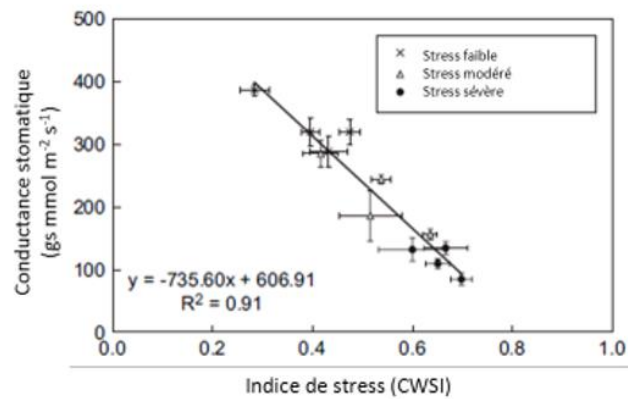


Figure 16 : Evolution de la conductance stomatique en fonction de l'indice de stress (d'après Möller et al., 2007)

### 2.2.1 Paramètres liés à la notion de réserve utile

L'alimentation en eau de la vigne est directement liée avec le réservoir en eau disponible du sol. Ce réservoir, la réserve utile, dépend de facteurs comme la teneur en eau à la capacité au champ, celle au point de flétrissement permanent, la densité apparente, la teneur en éléments grossiers du sol, ou bien encore l'épaisseur de sol exploitable par l'enracinement de la vigne (Goulet *et al.*, 2006).

### 2.2.2 Interprétation de la réserve utile pour le système vigne

L'une des méthodes possibles pour estimer la réserve utile d'un sol est l'utilisation des classes de pédotransfert. Parmi les études ayant été effectuées, celle de Bruand *et al.* en 2004 permet de relier les propriétés texturo-structurales du sol avec la teneur en eau volumique de la capacité au champ et au point de flétrissement permanent (Annexe 3). Cela permet ainsi de prédire des valeurs de réserve utile qu'il sera possible de comparer avec celles obtenues dans la réalité.

## 2.3 Le suivi de l'état hydrique au cours d'un millésime

Le suivi de l'état hydrique de la vigne dans le temps est très important afin d'appréhender le potentiel qualitatif d'un millésime (Deloire *et al.* 2003, Van Leeuwen *et al.*, 2009). Il permet également d'ajuster les pratiques culturales (enherbement, gestion de la canopée, fertilisation, etc.) d'un groupe de parcelles, d'une parcelle ou même d'une zone se situant à l'intérieur d'une parcelle (Tisseyre *et al.*, 2005).

### 2.3.1 La relation entre l'état hydrique et le cycle de développement de la vigne

Il est possible de corrélérer l'état hydrique avec des paramètres du développement végétatif et de maturité de la vigne (Annexe 4). Cela concerne la croissance des rameaux, lors de laquelle l'allongement des rameaux, considéré comme indicateur de la masse de matière organique produite par la vigne, peut être pris en compte en plus d'une pesée de biomasse de sarments. La précocité du développement de la vigne et le poids de bois de taille ou bien encore le poids des baies et les sucres réducteurs (corrélation négative) sont des paramètres d'évaluation de la puissance et de la vigueur de la vigne (Van Leeuwen et Seguin, 1994).

### 2.3.2 La mesure du potentiel de tige

A l'obscurité et sans échange de gaz, les stomates de la feuille sont fermés et le potentiel hydrique de la feuille s'équilibre avec le potentiel hydrique du xylème de la tige. Plus la vigne est stressée et plus la conductance stomatique sera faible en réponse à la fermeture des stomates (Figure 15). Cette mesure permet d'approcher l'état hydrique de la plante entière en cours de journée (Choné *et al.*, 2001). Il est nécessaire d'effectuer une mesure au midi solaire avec des conditions ensoleillées pour favoriser la fiabilité de la mesure (un déficit hydrique provoque la fermeture des stomates pendant une partie de la journée) (Figure 16). La régulation stomatique limitant la photosynthèse sera d'autant plus intense que le déficit hydrique est sévère. Cela s'observe par des changements au niveau du diamètre des baies ou de la couleur du feuillage et peut induire un arrêt de maturation lorsque le stress est sévère (Van Leeuwen, 2008).

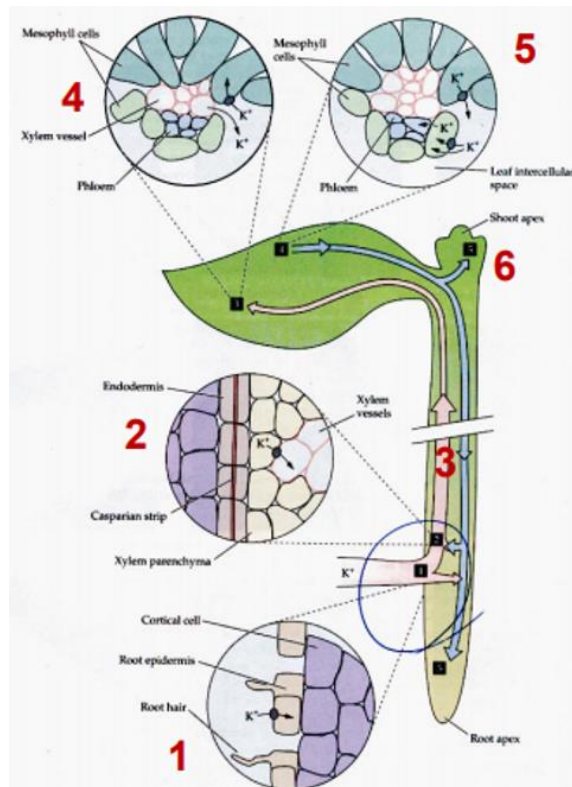


Figure 17 : Description des transports des minéraux au sein de la plante entre les organes sources et puits (Source : Medici, Montpellier SupAgro)

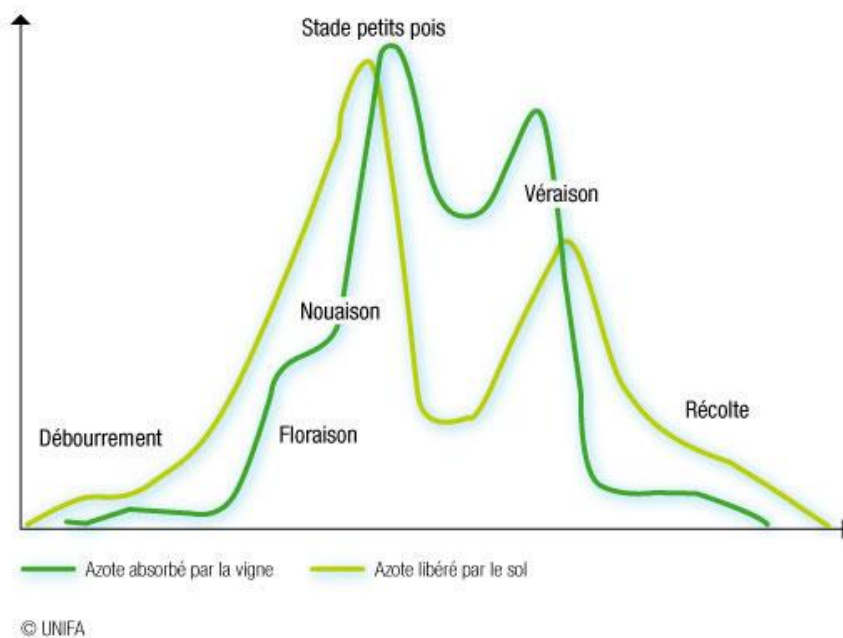


Figure 18 : Evolution de l'état azoté du sol et de la vigne au cours du cycle végétatif (Source : fertilisation-edu.com)

### 3 La vigueur expliquée par l'équilibre entre l'état organique, azoté et minéral de la vigne

Concernant les éléments minéraux, leur distribution et répartition sont dépendantes du cycle végétatif de la vigne. En effet, lors du début du débourrement, la redistribution des éléments minéraux se fait à partir des organes de réserve (racines et tronc). Au cours du cycle, les racines sont opérationnelles et prélèvent les éléments minéraux dissous dans l'eau du sol pour ensuite terminer leur cycle durant la période de maturation où les composés présents dans la plante sont transférés depuis les feuilles et les rameaux vers les fruits et les organes de réserve pour préparer l'entrée dans la phase de repos végétatif (Berut *et al.*, 2003) (Figure 17).

#### 3.1 Eléments constitutifs de l'état azoté, organique et minéral

La fertilisation permet à la fois de maintenir les potentialités du terroir dans lequel se trouve la vigne mais aussi de répondre aux besoins propres à la culture dans l'objectif de lui apporter les éléments minéraux nécessaires à son bon développement.

##### 3.1.1 Besoins et formes d'azote disponibles pour la vigne

Au cours du cycle végétatif, les besoins en azote de la vigne varient entre 20U/ha et 70U/ha en fonction des objectifs de production (Delas, 2010).

L'azote est présent sous plusieurs formes à l'interface entre la plante et le sol : gazeux, organique et minéral.

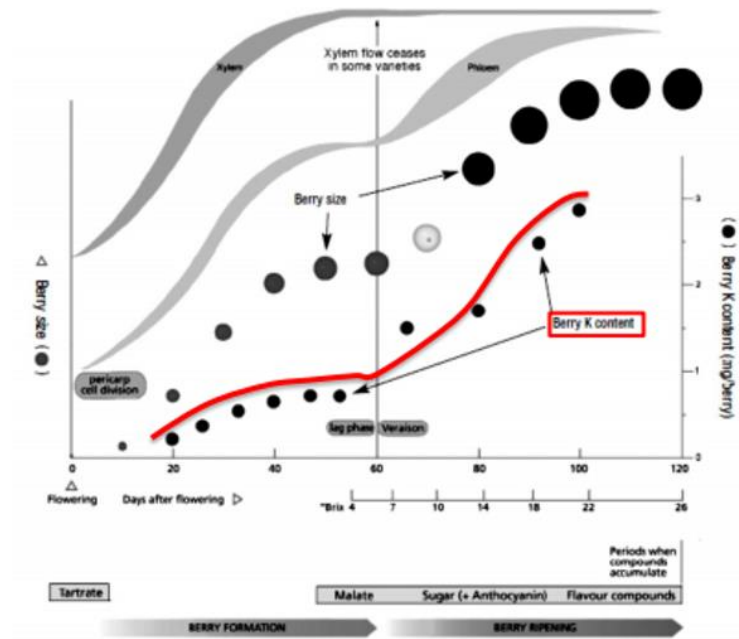
L'azote gazeux regroupe l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), l'azote atmosphérique ( $\text{N}_2$ ) et l'oxyde d'azote ( $\text{NO}_2^-$ ). L'azote organique constitue 98 % de l'azote des sols cultivés. La matière organique du sol est constituée essentiellement de résidus de végétaux (sarments, feuilles, amendements organiques) et de biomasse (micro-organismes du sol). L'azote minéral, représenté par l'ammoniaque ( $\text{NH}_4^+$ ), les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), traduit la forme assimilable par les plantes (Delas, 2010; Nicolardot, Mary, Houot, & Recous, 1996).

##### 3.1.2 L'état organique du sol : disponibilité des éléments et processus biologiques associés

Le processus de minéralisation, qui représente l'étape majeure de transformation de l'azote dans le sol, a lieu dans l'horizon superficiel (30 premiers centimètres) et dépend fortement à la fois des températures mais aussi des précipitations propres à un millésime. Elle possède deux pics de libération d'azote dans le sol : à nouaison et à véraison (Conradie, 1980) (Figure 18).

Le premier facteur à prendre en compte est le taux de matière organique (MO), c'est-à-dire le stock de carbone disponible dans le sol et qui renseigne sur la **vitesse de minéralisation**. Les teneurs en MO varient de 1 à 5 % (5% soit 500 t / ha sur 1 m de sol). Lorsque ce taux est inférieur à 2%, la MO est déficitaire et lorsqu'il dépasse 5%, elle est excédentaire et traduit ainsi un défaut de minéralisation. Un taux satisfaisant pour la vigne est compris entre 0.8 et 1%, le sol étant un facteur de variabilité important (Guide de la Fertilisation, 2003).

Le second facteur à étudier correspond au **taux de minéralisation** qui est traduit à l'aide du C/N. Ce rapport quantifie l'évolution de la MO, qui, pendant sa dégradation par les



**Transport K: nouaison-véraison: xylème et phloème**

**Transport K: véraison - maturation: phloème**

Figure 19 : Evolution du potassium au cours du cycle de développement (Source : A. Deloire, Montpellier SupAgro)



Figure 20 : Pourriture grise sur raisins



Figure 21 : Mesure avec le N-tester sur vigne



microorganismes du sol, induit une diminution du rapport C/N. Ce rapport est relativement constant de 7 à 13 dans les sols viticoles (Champagnol, 1984). Un rapport élevé supérieur à 12 traduit une faible activité microbiologique du sol donc une minéralisation déficiente et un rapport faible inférieur à 8 traduit une très forte activité donc une minéralisation accélérée.

D'autres paramètres jouent sur l'activité biologique des sols, notamment via une bonne aération du sol, un pH entre 6,5 et 8,5 ou bien une capacité d'échange cationique convenable à raisonner en fonction des éléments minéraux magnésium et potassium (Guide de la Fertilisation, 2003).

### 3.1.3 *L'état minéral de la vigne liés à un équilibre entre éléments minéraux*

Parmi les éléments minéraux important pour l'équilibre du système vigne, le potassium et le magnésium sont deux éléments à raisonner ensemble avec le rapport K/Mg. Le potassium est un élément mobile dans la plante mais aussi antagoniste au magnésium. Ce dernier, constituant de la chlorophylle des feuilles et aussi élément intervenant dans les réactions enzymatiques du métabolisme des sucres, peut subir un blocage de son assimilation lorsque la teneur en potassium est trop élevée dans le sol (Traité de la Vigne, 2007). Son évolution au cours du cycle est connue et variable (Figure 19).

D'autres éléments sont importants pour l'équilibre du système vigne : le phosphore, le calcium et l'ensemble des oligo-éléments tels que le bore, le manganèse ou le fer. Un équilibre entre chacun est donc nécessaire.

## 3.2 **Les mesures adaptées de l'état azoté, organique et minéral de la vigne**

L'excès de fumure azotée peut entraîner chez la vigne une augmentation importante de vigueur et, par conséquent, accroître la sensibilité à la coulure ou aux attaques parasitaires par exemple, notamment par *Botrytis cinerea*, agent de la pourriture grise (Carbonneau, 1984) mais aussi champignon clé de la bonne maturation du raisin de Sauternes. (Figure 20). Dans le cas d'une vigne équilibrée, un apport d'azote est inutile. Une vigne vigoureuse possèdera une teneur en matière organique dans le sol élevée, ce qui peut être dû à des apports de fertilisation passés trop importants (Guide de la Fertilisation, 2003).

### 3.2.1 *Mesure de l'état azoté de la vigne*

L'étude de l'état azoté peut se faire via trois variables de mesures (Van Leeuwen et al.,2000):

- **La teneur en azote du pétiole ou du limbe** : il a été montré que le dosage de l'azote total du pétiole à l'aide d'analyse pétiolaire est le moins performant des outils de mesure de l'état azoté et que l'azote total du limbe est plus adapté.
- **La coloration du limbe** : l'outil de mesure employé est le N-tester (Figure 21), qui correspond à un outil de proxy détection piéton qui fournit des valeurs de paramètre en continu (Force A).

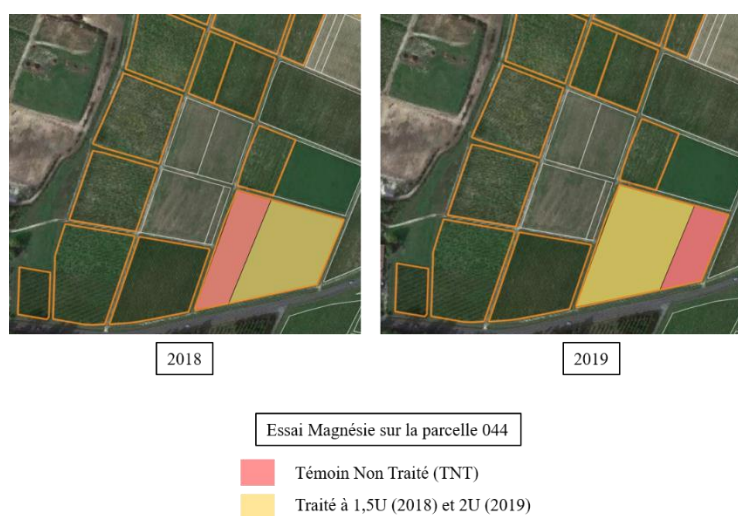
Le N-tester est un outil de mesure permettant de déterminer l'indice chlorophyllien de la plante à l'aide d'une mesure optique. Cette mesure constitue ainsi un indicateur d'alimentation azotée de la plante au même titre qu'un diagnostic foliaire et permet de suivre des évolutions spatiales au cours du cycle végétatif.

**Tableau 3:** Paramètres pris en compte pour choisir la zone d'étude

Paramètre	Donnée disponible	Objectif
<b>NDVI</b>	Depuis 2011	Faire ressortir des zones hétérogènes d'expression végétative et répétables au cours du temps
<b>Résistivité</b>	Acquisition de l'ensemble du parcellaire (2006-2008-2019)	Faire ressortir des zones hétérogènes de résistivité en inter et intra parcellaire
<b>Données pédologiques</b>	Carte des sols (2003)	Créer des zones avec un nombre limité d'unités pédologiques différentes pour pouvoir utiliser ce paramètre de manière discriminante
<b>Topographie</b>	.shp disponible en 2019	Trouver des zones avec une variabilité de topographie
<b>Matériel végétal</b>	Fixé à un seul cépage Sémillon	Prendre en compte l'influence du clone et du PG
<b>ITK</b>	Propre à 2019	Voir l'influence de l'ITK BIO



**Figure 22 :** Zone d'étude choisie et placettes de mesure associées



**Figure 23 :** Description de la localisation de l'essai magnésie avec une comparaison des dispositifs entre 2018 et 2019

Cette mesure peut être biaisée par le stade de croissance de la culture étudiée mais aussi par sa nature, son âge ou bien son exposition. Plus la valeur sera grande et proche de 800 et plus la feuille sera d'une couleur foncée, traduisant une bonne alimentation en azote des feuilles. Il est à souligner que des chloroses peuvent créer un biais dans la mesure ;

- La **teneur en azote du moût** : l'azote total, assimilable et ammoniacal.

### *3.2.2 Mesure de l'état organique et minéral de la vigne et de son environnement*

Pour étudier l'état organique de l'environnement dans lequel la vigne se trouve, les analyses de sol permettent d'avoir accès à des indicateurs tels que la MO ou le C/N. Concernant l'étude de l'état minéral du végétal, cela est possible de la même manière que pour l'étude de l'état azoté c'est-à-dire à l'aide d'analyses pétiolaire ou de limbe (Source : vignevin.com).

## **PARTIE 3 : Matériels et méthodes**

Dans un premier temps, le but a été de définir la zone la plus intéressante du vignoble pour étudier et comprendre au mieux la localisation et les origines de ces hétérogénéités de vigueur. Le vignoble a été prospecté pour en dégager des zones intéressantes pour l'étude.

### **1 Démarche globale de l'étude et le choix des variables de mesure utilisées**

#### **1.1 Démarche et choix de la zone d'étude**

##### *1.1.1 Prospection du parcellaire*

La prospection des zones du vignoble s'est raisonnée en fonction de plusieurs paramètres qui étaient disponibles au moment où le choix de la zone d'étude a été fait : le NDVI (Annexe 5), la résistivité, le sol, la topographie, le matériel végétal et l'ITK (Tableau 3). Ces paramètres, en les superposant les uns avec les autres, ont permis de soulever plusieurs zones avec des hétérogénéités intra et inter parcellaires marquées.

##### *1.1.2 Choix de la zone d'étude*

En conclusion à cette prospection, quatre zones intéressantes d'une surface entre 5 et 10 hectares ont été trouvées (Annexe 6). Deux d'entre elles, intéressantes pour leurs variabilités, ont été extraites puis regroupées pour former une seule et même zone d'étude de 17.4 hectares répartie en 22 parcelles (Figure 22). L'objectif final est d'établir une méthode sur une zone en 2019 pour pouvoir l'appliquer au reste du vignoble pour les prochaines années.

##### *1.1.3 Mise en place d'un essai Magnésie sur la zone d'étude*

L'une des problématiques minérales majeures du vignoble observable d'années en années repose sur l'apparition de carences en Magnésium visibles à la vigne à partir de la véraison. Un essai a été effectué en 2018 sur la parcelle 44 du vignoble, connue pour sa qualité en liquoreux, en prenant en compte une modalité témoin sans apport de magnésium et une autre avec un apport de 1.2 unités de magnésium dissociés en 6 apports de 200 grammes entre la floraison et la véraison (Figure 23).

Tableau 4: Echelle de mesure associée à chaque mesure effectuée pour répondre à une hypothèse d'étude

Problématique	Hypothèse d'étude	Mesure	Echelle de mesure
Comment déterminer la localisation des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur ?	Déterminer les valeurs seuils NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) GreenSeeker	<b>Cep</b>
Quelles sont les origines de ces hétérogénéités intra parcellaire de vigueur ?	Etat hydrique	Résistivité	<b>Cep</b>
		Modèle Réserve utile	<b>Zone</b>
		Potentiel de tige CAP	<b>Placette</b>
	Etat azoté, organique et minéral	Analyse de sol	<b>Parcelle</b>
		Analyse pétiolaire	<b>Zone</b>
		Analyse de limbe	<b>Zone</b>
		Dualex	<b>Placette</b>
		Contrôle maturité	<b>Parcelle</b>

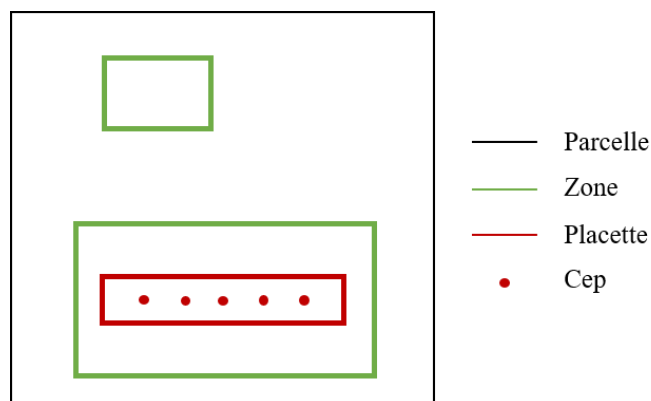


Figure 24 : Echelles de mesure effectuées lors de cette étude

Le but a donc été d'utiliser cette expérience passée pour la faire évoluer en 2019.

## **1.2 Choix des mesures et de leurs échantillonnages en fonction des variables de mesure utilisées**

Le choix des échelles de mesure s'est fait en fonction des variables qui allaient être mesurées pour cette étude. Le Tableau 4 reprend pour chaque hypothèse les variables qui seront mesurées au cours de l'expérimentation.

Cet échantillonnage a été raisonné sur plusieurs échelles (Figure 24) :

- **parcelle;**
- **zone de vigueur homogène** : une parcelle peut être divisée en plusieurs zones différentes de vigueur, définissant ainsi l'hétérogénéité intra parcellaire de la zone d'étude ;
- **placette de plusieurs ceps** : 51 points de mesure ont été répartis au sein des zones de vigueur homogène. Positionnés avec une précision de 5 mètres, la précision de ce positionnement induit donc une prise de mesure sur une placette de 5 ceps ;
- **cep** : possible pour les données à haute résolution (NDVI et résistivité).

## **2 Stratégie d'analyse et de traitement des données de l'étude**

### **2.1 L'utilisation des données NDVI**

Depuis 2010, le traitement des données NDVI acquises par le GreenSeeker se fait à l'aide d'Excel, d'un logiciel SIG (Qgis) et de Farmworks (Annexe 7), une application destinée aux agriculteurs utilisant la console Trimble installée dans l'enjambeur. A partir de la donnée brute NDVI, plusieurs étapes régissent son traitement depuis le début de l'utilisation de l'outil (Figure 25 page suivante).

Les limites de l'application Farmworks sur les différents lissages proposés ont poussés l'équipe technique à essayer en 2019 cette méthode de modulation intra parcellaire par zonage.

### **2.2 Création d'une base de données pour comprendre les origines des hétérogénéités de vigueur**

Une base de données a été créée à l'aide d'un tableur Excel comportant l'ensemble des données mesurées aux différentes échelles de mesure. Cette base de données est conçue de telle sorte que chaque ligne fait référence à un point de mesure dans une parcelle de la zone d'étude. Ensuite l'ensemble des variables mesurées sont introduites dans une colonne et cela permet ainsi de dissocier au sein de la base de données les 4 pôles d'étude : hydrique, organique, azoté et minéral, en complément de l'ensemble des variables qualitatives (topographie, matériel végétal) et quantitatives (réserve utile, résistivité, NDVI) (Figure 26 page suivante).

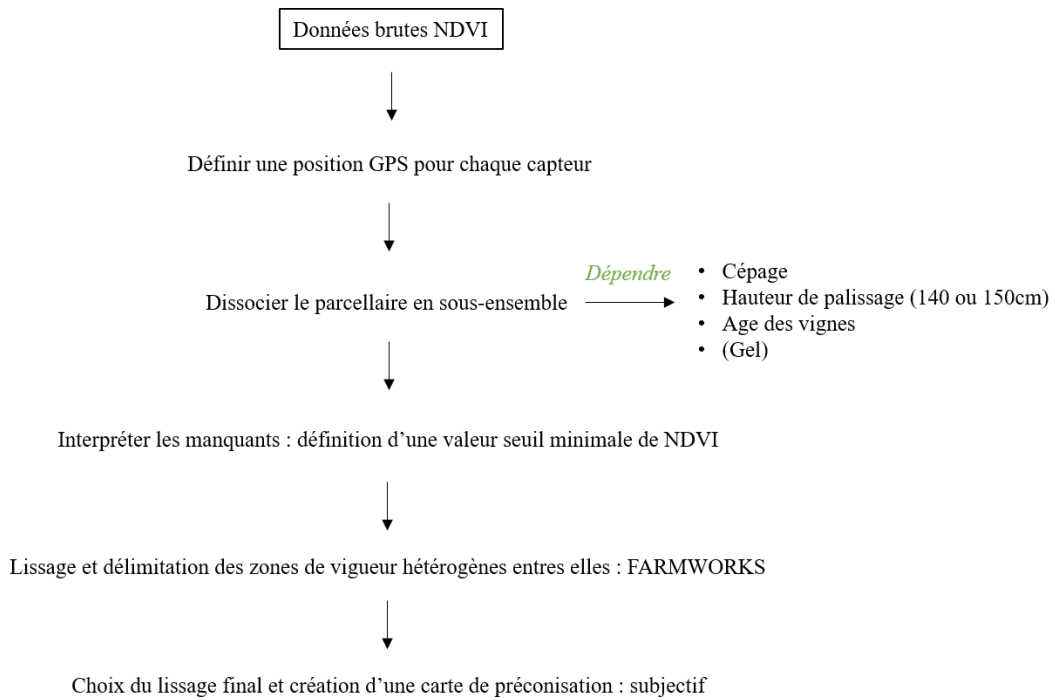


Figure 25 : Schéma explicatif du traitement des données NDVI de 2010 à 2018

Placette	Parcelle	X	Y	Topographie	RU 0-50	RU 0-100	Profondeur de sol
151	15	436732,544	6388165,45	58,48	27,5	63,2	100
152	15	436786,103	6388135,76	62,14	27,8	70,8	100
153	15	436768,209	6388208,69	54,73	29,7	49,2	80
154	15	436820,052	6388180,16	58,39	40,1	49,4	60
155	15	436789,964	6388235,86	53,7	28,98	59,17	100
156	15	436839,355	6388208,53	56,18	30,39	49,89	80
161	16	436855,84	6388099,92	65,3	27,5	70,1	100
162	16	436853,634	6388144,01	62,65	27,5	55,1	100
163	16	436902,167	6388116,95	61,8	27,5	44,5	100
164	16	436885,377	6388182,61	59,71	28,9	66,2	100
165	16	436928,518	6388158,81	58,87	29,6	66,9	100
221	22	436901,919	6387964,2	66,51	30,5	54,9	90
222	22	436881,884	6387914,42	68,44	30,5	54,9	90
223	22	436882,006	6387998,13	66,64	30,5	61	100
224	22	436862,642	6387950,21	68,4	29	54,5	100
231	23	436801,208	6387960,09	72,61	22,6	25,6	60
232	23	436797,93	6388015,72	72,92	22,6	25,6	60
233	23	436861,784	6388057,82	69,75	24,4	51,2	100
234	23	436820,359	6388076,17	68,87	24,4	47	80
235	23	436844,258	6387995,25	67,28	24,4	40,9	80
241	24	436700,556	6388004,29	73,88		7,3	50
242	24	436741,369	6387986,46	74,76	17,3	17,3	80

↓  
1 placette/ligne  
51 lignes

↓  
1 Variable/Colonne/Etat étudié  
+100 colonnes

Figure 26 : Base de données de l'étude

## 2.3 Cartographie sur QGIS pour une représentation visuelle de certaines variables d'étude

Pour compléter cette base de données Excel, le but a aussi été d'utiliser l'échantillonnage de 51 placettes de mesure pour pouvoir effectuer des représentations visuelles de certaines variables comme la réserve utile, l'évolution du stress hydrique au cours du millésime ou bien encore les mesures avec le N-tester. Chacune de ces variables ont été retranscrites sous QGIS dans un nouveau champ d'une couche vecteur correspondant aux différentes placettes de la zone d'étude. Dans le but de comprendre des dynamiques d'évolution de ces variables mesurées au cours du développement végétatif et des conditions du millésime 2019, il a été possible de procéder à un Kriegage sous Saga GIS qui permet de passer d'une vision à l'échelle d'un point dans QGIS à une carte lissée sur l'ensemble des parcelles de la zone d'étude.

## 3 Utilisation des données NDVI : définition des valeurs seuils et création d'une carte experte

### 3.1 Mise en place d'une nouvelle démarche d'analyse des données brutes en 2019

L'étude des valeurs brutes de NDVI en 2019 repose sur un travail effectué en collaboration avec Aspexit, une entreprise de conseil en agriculture de précision créée par Corentin Leroux, docteur en agriculture de précision.

Pour s'y faire, le travail s'est déroulé en trois étapes (Figure 27 page suivante) :

- le **traitement des données brutes** : interprétation des manquants et lien entre expression végétative et vigueur visuelle;
- **l'analyse** des données nettoyées : scientifique (avec la création d'un zonage du parcellaire) et de terrain (classification experte de la vigueur par l'opérateur);
- **le livrable** : à destination à la fois de l'opérateur mais aussi de la machine sous forme de carte experte d'analyse de la relation entre expression végétative et vigueur.

### 3.2 Traitement des données brutes de 2019

#### 3.2.1 Définition des valeurs minimales de NDVI à partir des manquants de 2018 et 2019

Le nombre de manquants pour chaque parcelle a été quantifié pour 2018 et 2019 sur le terrain par des opérateurs. Cela permet d'obtenir pour chaque parcelle une valeur correspondante au pourcentage de manquants en fonction du nombre de pieds au total. A partir de cette donnée de manquants, un seuil de valeur NDVI<sub>manquants</sub> a été déterminé pour pouvoir définir une valeur minimale de NDVI en dessous de laquelle les valeurs NDVI ne seront pas interprétées car trop bruitées et non représentative d'une expression végétative.

Cette valeur seuil du NDVI<sub>manquants</sub> est acquise pour chaque parcelle, en 2018 et 2019 pour avoir une répétabilité de la donnée selon la relation suivante :

$$X\% \text{ des valeurs NDVI} < \text{valeur seuil NDVI}_{\text{manquants}} < (1-X)\% \text{ des valeurs NDVI}$$

Cette étape permet d'obtenir la base de données brute finale.

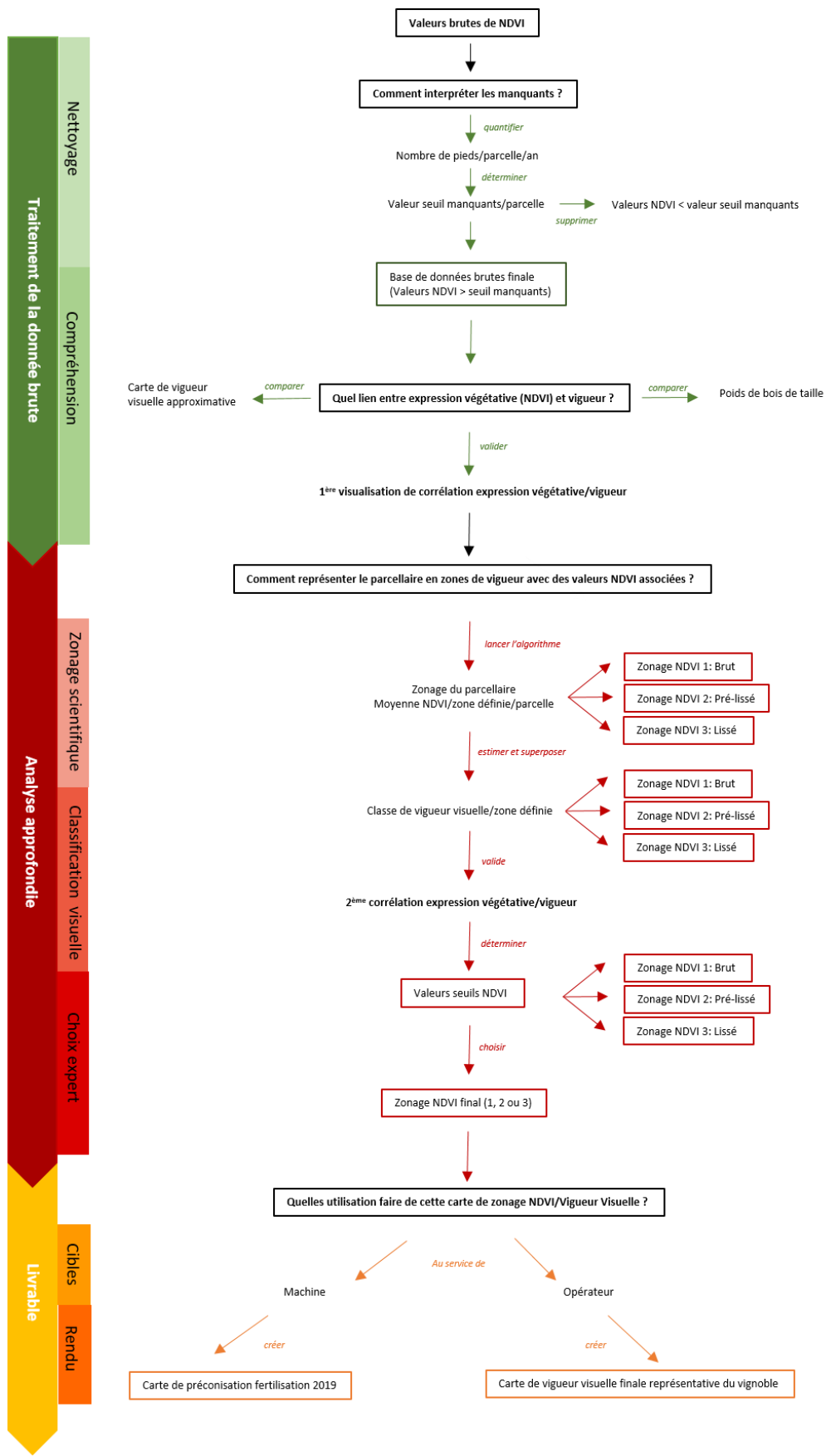


Figure 27 : Schéma explicatif du traitement des données en 2019



### 3.2.2 Compréhension des valeurs NDVI

A la sortie de l'hiver 2018, les PBT ont été quantifiés sur des placettes de 5 ceps géo-référencées dans certaines parcelles du vignoble. Le diamètre des bois, la longueur des bois, le poids du fagot et le poids des bois ont été mesurés. Il a donc été possible d'attribuer à chaque cep mesuré une valeur NDVI correspondante et d'en analyser la relation (prestation externalisée).

Une carte de **vigueur visuelle** approximative a été effectuée pour pouvoir représenter au mieux la vision réelle de la vigueur. Cette représentation s'est faite à partir de plusieurs paramètres : le diamètre des bois (convenable lorsqu'il se situe autour de 1cm), l'épaisseur du feuillage et la couleur du feuillage. Le but est donc d'utiliser cette carte comme expertise visuelle de terrain pour pouvoir la comparer avec la base de données brute finale NDVI.

Cela a donc permis de valider un premier niveau de corrélation entre expression végétative et vigueur, ce qui permettait d'avoir un premier aperçu de l'intérêt de cette superposition entre une analyse scientifique des données NDVI et une expertise de terrain de la vigueur.

## 3.3 Méthode d'analyse des données nettoyées

### 3.3.1 Zonage scientifique des données

Un zonage de vigueur de l'ensemble du parcellaire a ensuite été effectué sur les données prétraitées par Aspexit. Les cartes zonées permettent de représenter plusieurs zones en intra et inter parcellaire correspondantes à des moyennes NDVI significativement différentes. Trois cartes de zonage ont été proposées, chacune correspondant à des niveaux de détails différents ; certaines plus grossières pour représenter les grandes tendances de vigueur sur les parcelles, d'autres plus fines pour caractériser plus précisément la vigueur au sein des parcelles.

### 3.3.2 Classification visuelle du zonage

Les zones définies sur les cartographies ont ensuite été associées à une appréciation visuelle de vigueur par les experts du domaine. Ce travail avait deux objectifs. Premièrement d'évaluer si, au sein des zones, les experts avaient une vision de vigueur cohérente avec celle mesurée par le GreenSeeker. Deuxièmement de s'assurer de la pertinence du zonage de vigueur réalisé par le prestataire Aspexit.

## 3.4 Définition des valeurs seuils de NDVI pour 2019 et choix de la carte finale

### 3.4.1 Choix des valeurs seuils de NDVI

Cette association « zones définies – appréciation visuelle de la vigueur » a permis de créer un deuxième niveau de corrélation. Il a donc été possible de définir les valeurs seuils de NDVI le plus judicieusement possible, reliant ainsi trois classes de vigueur visuelle aux valeurs de NDVI :

Valeur minimale de NDVI < **Vigueur Faible** < Valeur seuil 1

Valeur seuil 1 < **Vigueur Moyenne** < Valeur seuil 2

Valeur seuil 2 < **Vigueur Forte** < Valeur maximale NDVI



Pour s'y faire, la méthode pour déterminer les valeurs seuils 1 et 2 a été appliquée uniquement en fonction des résultats obtenus.

#### *3.4.2 Choix d'une carte finale pour cibler les utilisateurs*

Après définition des deux valeurs seuils intermédiaires aux trois classes de vigueur (faible, moyenne et forte), le choix de la carte ayant le meilleur compromis entre analyse scientifique et expertise de terrain a été fait. Elle servira de base pour ensuite définir des doses de préconisation de fertilisation à apporter pour l'automne 2019 en fonction des trois classes de vigueur définies.

## **4 La vigueur expliquée par l'état hydrique : acquisition de données spatialisées**

### **4.1 Mesure de la résistivité des sols pour caractériser leur hétérogénéité**

La mesure de la résistivité a été effectuée par l'entreprise GéoCarta pour représenter au mieux certaines caractéristiques du sol sur l'ensemble du parcellaire.

13.2 hectares ont été mesurés en 2006, 2008 et 2009. Les 58.3 autres hectares ont, quant à eux, été effectués en 2019 au début du mois d'avril.

L'acquisition des données s'est faite avec des conditions climatiques homogènes et constantes sur l'ensemble de la semaine et privilégiant des parcelles ayant été déchaussées pour ne pas avoir de biais de travail du sol dans la mesure.

Trois profondeurs de sol ont été investiguées, il y a donc trois paires d'électrodes qui recevront le courant électrique provenant de la première paire à l'avant de l'appareil de mesure. Les trois voies de mesure obtenues sont représentatives de trois profondeurs de sol : 0-50, 0-100, 0-200cm. La résolution de la mesure obtenue est à l'échelle du pixel de 2 mètres, avec des unités positives exprimées en ohm-mètre avec des valeurs variables et fonction du type de sol prospecté.

### **4.2 Modélisation de la réserve utile dans le sol à partir de données pédologiques**

#### *4.2.1 Construction d'un patron spatial pour l'utilisation des données pédologiques de 2003*

Lorsque la carte des sols du Château Rieussec a été effectuée en 2003, 567 sondages tarière ont été référencés sur papier, contenant des indications sur la texture du sol et la structure du sol (Annexe 8).

A partir de ces données, le but a été de les géo-référencer pour repositionner au mètre près les sondages qui ont été effectués, chacun possédant une coordonnée (en mètre) correspondant à un emplacement précis dans une parcelle. Pour s'y faire, des grilles ont alors été créées manuellement sur QGIS pour pouvoir obtenir une précision au mètre près sur la zone d'étude (Annexe 9). Au total, 123 sondages tarière ont été replacés sur les 24 parcelles d'étude (7 sondages/ha). Une base de données a été créée afin de reprendre les paramètres nécessaires mentionnés sur les sondages papier pour pouvoir créer un modèle de calcul de réserve utile.



Figure 28 : Dispositif de mesure du statut hydrique de la vigne à l'aide de la chambre à pression

Pour chaque sondage, sur une profondeur totale de un mètre et pour chaque horizon référencé, les paramètres suivants seront pris en compte :

- l'épaisseur de sol (E);
- la texture (T);
- le pourcentage d'éléments grossiers (%EG);

#### 4.2.2 Modélisation de la réserve utile et du potentiel d'exploration pour les racines

Les capacités au champ et les points de flétrissement permanent ont été appliqués pour chacune des textures de sol en question (Bruand *et al*, 2007).

A partir de cela, deux réserves utiles ont été calculées sur deux épaisseurs de sol différentes (de 0 à 50cm et de 0 à 100cm) dans le but de pouvoir retranscrire la localisation précise de l'eau disponible et de pouvoir faire un parallèle sur les colonisations racinaires possibles :

$$RU=(1-\%EG)*E*(PFP-CC)$$

Ainsi, pour chaque sondage tarière, deux valeurs de RU sont disponibles pour chaque sondage tarière géo-référencé. Une échelle de valeurs catégorisée a été choisie pour pouvoir représenter au mieux ces valeurs en comparaison aux seuils théoriques usuels utilisés.

Pour obtenir une carte sur l'ensemble de la zone d'étude, une interpolation continue est effectuée à l'aide de Saga GIS avec un krigeage ordinaire. De cette manière, deux cartes de RU sont obtenues sur l'ensemble des 24 hectares et il est ainsi possible de relier cette quantité d'eau disponible avec le sol mais aussi avec le comportement des vignes au cours du millésime 2019 face au manque d'eau lors de la saison.

### 4.3 Caractérisation de l'état hydrique du sol au cours du millésime 2019

#### 4.3.1 Mesures du stress hydrique au cours du millésime 2019

Des mesures de potentiel de tige à l'aide d'une chambre à pression ont été effectuées sur les 51 placettes de mesures de la zone d'étude.

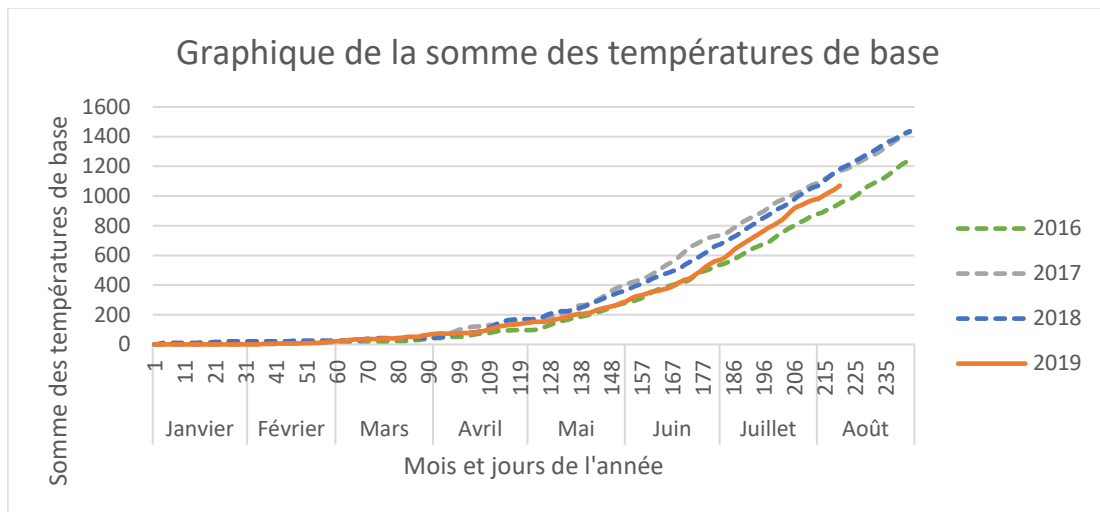
Elles sont effectuées à partir du stade de la nouaison au stade la véraison avec cinq stades intermédiaires du cycle végétatif.

Chaque mesure a été effectuée avec des conditions météo similaires (soleil, sans pluie). La feuille en face de la première grappe du cep est recouverte au minimum une heure avant mesure d'une poche étanche à la lumière et aux gaz. Au midi solaire, cette même feuille est introduite dans la chambre à pression. De l'azote comprimé est alors envoyé à l'intérieur de la chambre et permet ainsi à la sève de remonter à la surface du pétiole qui est positionné à l'extérieur de la CAP. La pression nécessaire en MPa pour visualiser la goutte de sève retranscrit des indices de stress hydrique plus ou moins sévère sur la vigne (Figure 28).

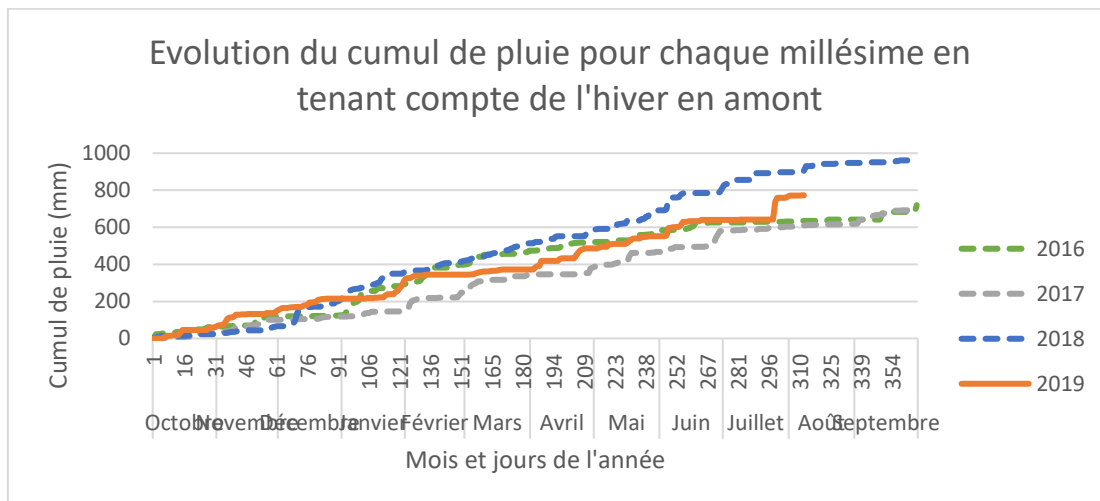
Ces résultats permettront à la fois d'obtenir une évolution au cours du cycle de la contrainte hydrique mais aussi de pouvoir les relier avec les autres variables étudiées.

#### 4.3.2 Les paramètres clés du millésime 2019 et leur lien avec la contrainte hydrique

Le millésime 2019 est caractérisé par une accumulation de 1580 degrés jours entre le 1<sup>er</sup> octobre 2018 et le 30 septembre 2019 (une année correspond à une campagne, hiver inclus). 860mm de

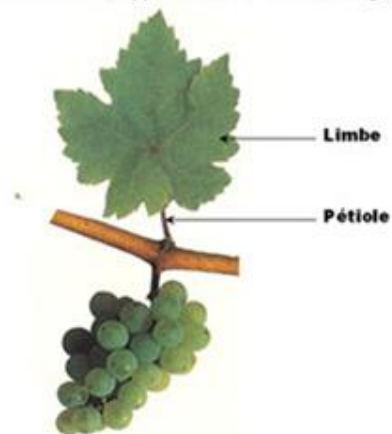


**Figure 29 :** Graphique de la somme des températures de base en fonction du temps pour les millésimes 2016, 2017, 2018 et 2019



**Figure 30 :** Evolution du cumul de pluie pour chaque millésime

*Prélever la feuille opposée à la 1<sup>ère</sup> ou à la 2<sup>ème</sup> grappe*



**Figure 31 :** Différenciation entre le pétiole et le limbe d'une feuille de vigne

pluie ont été référencés par les stations météo (Figure 29 et 30). En comparaison avec les derniers millésimes, 2019 a été marqué par une floraison pluvieuse (80mm de pluie) suivie d'une période de canicule pendant le stade de la fermeture de grappe.

A partir des points de mesures géo-référencés, il a été possible d'appliquer la même méthode que pour la réserve utile pour obtenir des cartes d'évolution de la contrainte hydrique au cours du temps sur l'ensemble de la zone d'étude en fonction des données météo au jour le jour.

La mesure des allongements de rameaux s'est faite sur 14 placettes de 5 ceps positionnés au sein d'une ou plusieurs zones d'une parcelle. Chaque mesure a été effectuée à un stade de développement clé du millésime 2019.

## **5 La vigueur expliquée par l'état organique, azoté et minéral**

### **5.1 Caractérisation de l'état de nutrition azoté à deux échelles de mesure différentes**

Comme décrit précédemment, plusieurs variables ont permis d'établir une estimation de l'état de nutrition de la vigne.

#### *5.1.1 Mesure spatialisée avec le N-tester*

L'état de nutrition azoté a été quantifié sur les 51 points de mesure de la zone d'étude à l'aide du N-tester.

Les mesures ont été effectuées au stade de la fermeture de grappe et au stade de la véraison.

Après avoir pincé trente feuilles, l'appareil affiche une valeur, sans unités. L'échantillonnage des 30 feuilles est donc hétérogène d'un point de mesure à un autre. Deux mesures ont été acquises à chaque point de la zone d'étude, fournissant ainsi pour chaque stade 102 mesures de N-tester.

Ces données ont ensuite été spatialisées sur le même principe que pour les mesures de la contrainte hydrique.

#### *5.1.2 L'état azoté à partir des analyses pétiolaires*

Pour compléter ces mesures au N-tester, des analyses pétiolaires ont été effectuées sur 16 zones de vigueur (associées à une parcelle) de la zone d'étude.

Les prélèvements ont été faits au stade de la floraison et au stade de la véraison avec des conditions d'ensoleillement. Le prélèvement des pétioles s'est fait de manière homogène sur l'ensemble des zones. Les données obtenues sont donc équivalentes pour les points de mesure d'une zone au sein d'une parcelle.

45g de pétiole sont prélevés, chacun d'entre eux provenant de la feuille située en face de la première grappe et prélevés de manière aléatoire dans la parcelle (Figure 31). Cela représente donc environ 80 pétioles répartis de manière homogène au sein de chaque zone de prélèvement.





## 5.2 Caractérisation de l'état de nutrition organique et minéral

### 5.2.1 *Les analyses de sol comme indicateur de l'état de nutrition organique*

Des analyses de sol sont effectuées tous les ans au mois de juillet pour pouvoir ajuster au mieux les apports de fumure durant l'automne. Plusieurs indicateurs ont donc été choisis pour caractériser l'état de nutrition organique : la matière organique, le C/N traduisant le pouvoir de minéralisation du sol ou bien encore l'azote total présent dans le sol.

Les prélèvements sont faits à l'aide de sondages tarière sur 30 centimètres répartis de manière homogène dans chaque parcelle. La zone d'étude a été analysée l'année dernière, ce qui nous a donc permis de les prendre en compte pour l'analyse des résultats.

### 5.2.2 *Les ajustements d'apports foliaires en magnésium pour comprendre l'influence des carences*

#### ➤ Ajustement de l'itinéraire technique pour 2019

Le bilan fait suite à l'essai magnésium de 2018 était clair : la zone non traitée était moins qualitative et déséquilibrée et la zone traitée à 1.5U présentait encore de forts symptômes visuels de carence en magnésium. L'objectif final de production étant de ne pas déséquilibrer la vigne, le choix en 2019 s'est porté sur la même parcelle pour pouvoir garder des paramètres communs pour l'interprétation des résultats mais de modifier l'itinéraire appliqué au cours du cycle végétatif.

C'est pourquoi la zone du témoin non traitée de 2019 a été placée sur une ancienne zone recevant 1.5U de MgO et non sur l'ancienne zone du témoin non traitée de 2018. En ce qui concerne le reste de la zone d'étude, un apport de 2 unités d'azote a été fixé pour essayer de trouver la dose judicieuse à apporter et pour ainsi trouver le bon équilibre pour le système vigne.

Chaque apport (7 au total) a été de 200g par pulvérisation à partir du stade de la floraison et a ensuite été ajusté au cours du cycle végétatif avec 3 apports à 320g jusqu'à la véraison.

#### ➤ Mesures effectuées pour caractériser l'effet d'apports foliaires

Afin de suivre l'évolution des composés minéraux, des analyses pétiolaires et de limbe nous ont permis d'avoir un aperçu de l'évolution du comportement de la vigne au cours du cycle mais aussi de comparer ces deux types d'analyses. Les prélèvements ont été faits aux stades floraison et véraison.

Deux échantillons ont été prélevés par modalité (Témoin non Traité et Traité). Le protocole de prélèvement pour les analyses pétiolaires sur la parcelle 44 est similaire à celui développé dans le 5.1.2. Concernant les analyses de limbe, 120g de feuille ont été prélevées de manière homogène dans chaque zone de la parcelle.

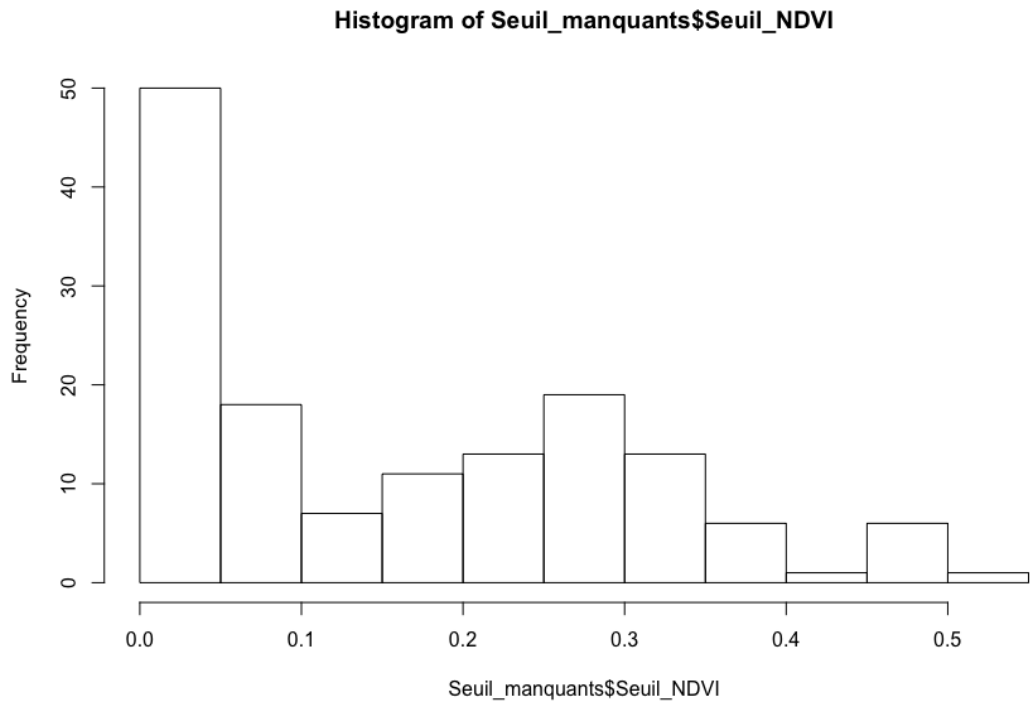


Figure 32 : Valeurs Seuils de NDVI<sub>manquants</sub> pour chaque des parcelles (Source : Aspexit)

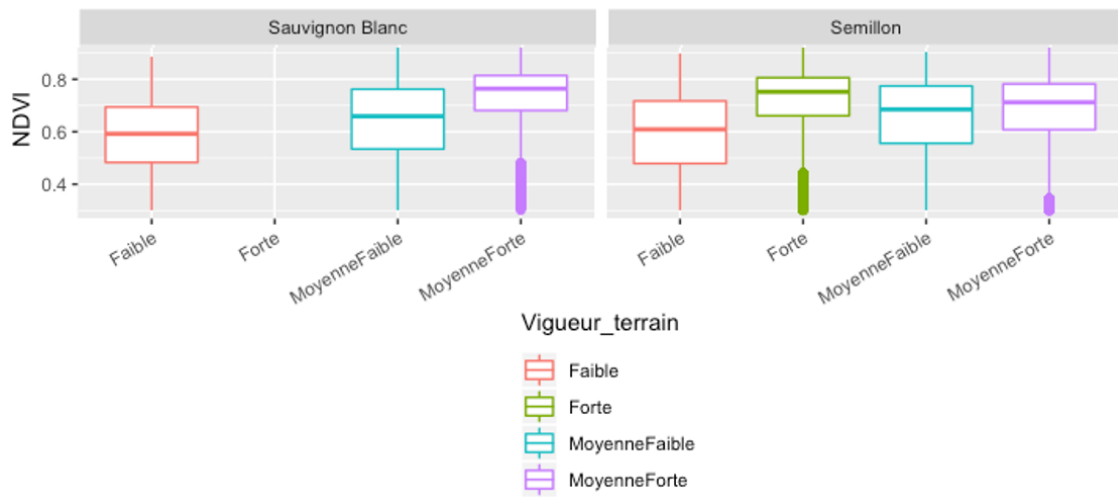


Figure 33 : Premier niveau de corrélation entre NDVI et vigueur visuelle de terrain (Source : Aspexit)

## PARTIE 4 : Résultats

### 1 Localisation des hétérogénéités de vigueur

Pour répondre au mieux à cette axe de la problématique, l'ensemble du parcellaire a été analysé dans le but de définir des valeurs seuils NDVI traduisant des différences de vigueur intra parcellaires.

#### 1.1 Traitement des données brutes de 2019

##### 1.1.1 Définition des valeurs minimales de NDVI à partir des manquants de 2018 et 2019

Les histogrammes des valeurs limites de manquants sont visibles dans la Figure 32. De nombreuses parcelles ne possédaient aucune information sur leur nombre de manquants. Par conséquent la fréquence du nombre de parcelles ayant une valeur minimale de manquants égale à 0 est importante. Cela permet donc d'obtenir une courbe de Gauss avec une répartition normale des données 2018. Concernant 2019, cette valeur est confirmée.

La valeur de **0.3** ressort comme étant la plus représentative d'un grand nombre de parcelle. Elle a donc été prise comme **valeur minimale en dessous de laquelle les données brutes ont été supprimées au vue de la normalité.**

##### 1.1.2 Lien entre les valeurs NDVI et des indicateurs de vigueur

- Poids de bois de taille

Lorsque le NDVI est faible et inférieur à 0.5, le poids de bois de taille est faible (Annexe 10). Cette logique est moins claire pour des valeurs NDVI plus élevées où le poids de bois de taille fluctue entre des valeurs faible et forte de NDVI (d'après les résultats de *C.Leroux*).

**Aucune relation significative n'est montrée avec l'utilisation de cet indicateur de vigueur** et le choix de poursuivre l'analyse sans cet indicateur a été fait pour privilégier l'ensemble des autres mesures disponibles.

- Carte de Vigueur Visuelle

La carte de vigueur visuelle est visible en Annexe 11. Les résultats des boîtes à moustaches présentant la distribution des valeurs associées au NDVI en fonction du cépage et des classes de vigueur visuelle (4 classes) est visible avec la Figure 33. Les poids médians des classes de vigueur visuelle intermédiaires (moyenne faible et moyenne forte) sont similaires malgré le fait que les poids de certaines classes de vigueur soient plus importants que d'autres. La médiane des valeurs NDVI correspondante à une vigueur faible (0.7) est inférieure à la médiane des valeurs NDVI pour une vigueur forte (0.8) mais les quartiles se superposent.

L'attribution des zones de vigueur étant approximative sur le terrain, il est évident que le bruit des données NDVI est important au sein d'une zone de vigueur estimée et cela peut expliquer le manque de significativité entre les différentes classes.

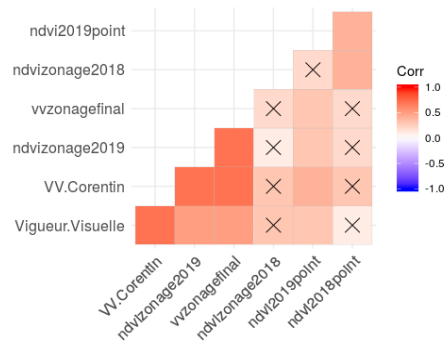


Figure 34 : Représentation des corrélations entre les données NDVI, le zonage NDVI et les différents niveaux de vigueur visuelle

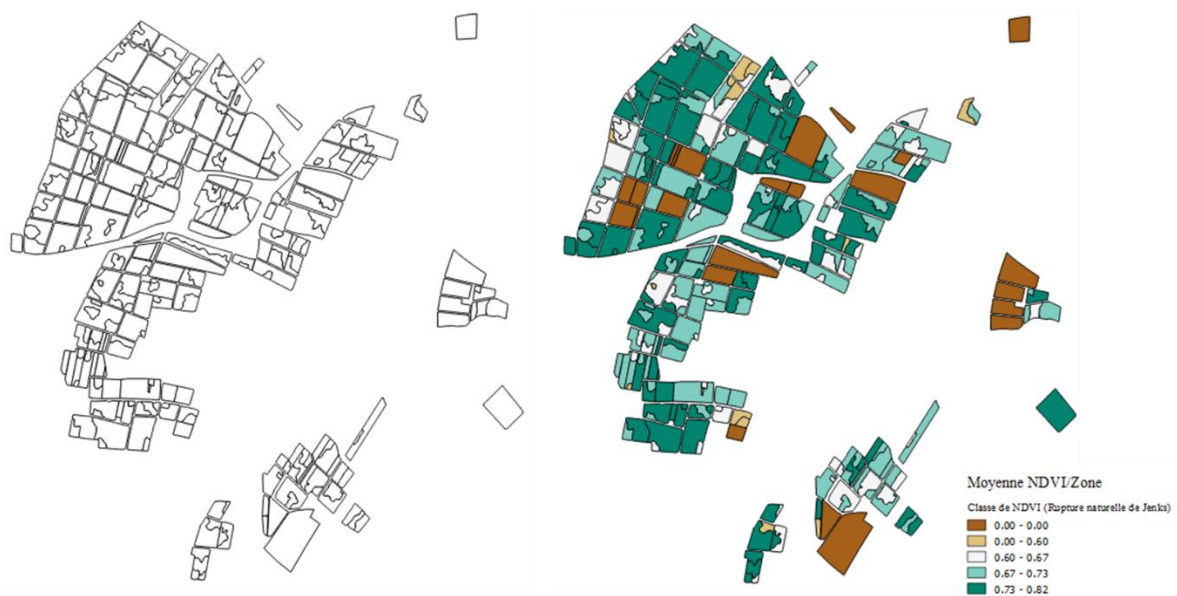


Figure 35 : Zonage pré-lissé obtenu après traitement des données par l'Aspexit (gauche) avec une moyenne de NDVI définie pour chaque parcelle (droite)



Figure 36 : Carte de vigueur visuelle superposée aux délimitations du zonage pré-lissé

La Figure 34 présente les corrélations entre les variables étudiées. Cette première carte (Vigueur Visuelle) est corrélée positivement avec le NDVI entre 0 et 0.5. **Utiliser un outil d'expertise visuelle est donc pertinent pour mieux interpréter ces données brutes.**

L'étape suivante a donc été de procéder au zonage du parcellaire après ce traitement de la donnée en amont qui permet d'avoir une idée des potentielles relations entre NDVI et vigueur visuelle.

## 1.2 Méthode d'analyse scientifique des données nettoyées

L'ensemble des zonages obtenus à l'issue du lancement de l'algorithme sont présentés en Figure 35 (zonage pré-lissé) et en Annexe 12 (zonage brute et lissé), une zone délimitée étant caractérisée par une moyenne NDVI. Chaque zonage a été superposé par une vigueur visuelle associée à chacune des zones. La figure 36 illustre ce travail pour le zonage pré-lissé.

Plus le zonage sera précis, plus il y aura de zones détectées dans une parcelle et donc plus l'hétérogénéité intra-parcellaire sera représentée (brute, pré-lissé puis lissé par ordre décroissant de précision).

La figure 37 représente la distribution des moyennes NDVI de chaque zone pour le zonage pré-lissé en fonction du cépage et des classes de vigueur (réduites à 3 à cette étape). Pour les trois cépages, la distribution des valeurs est différente pour les trois classes de vigueur visuelle.

Les poids des médianes sont dissociés suivant une logique : **plus la moyenne NDVI de la zone augmente et plus cette zone est représentée par une vigueur visuelle forte.** Cependant, il est possible de remarquer dans certains cas la superposition entre le Q3 d'une classe et le Q1 de la classe de vigueur supérieure.

Ce résultat est vérifié par une corrélation positive (Figure 34) entre la vigueur (VV.Corentin) et le NDVI (ndvizonage2019) lors de ce traitement approfondi de la donnée brute. Les classes de vigueur visuelle étant distinctes les unes des autres et corrélées positivement au NDVI, des valeurs seuils de NDVI ont été fixées arbitrairement malgré le manque de significativité entre les deux variables.

## 1.3 Définition des valeurs seuils de NDVI pour 2019 et choix de la carte finale

### 1.3.1 Choix des valeurs seuils de NDVI

Le choix des valeurs seuils s'est effectué avec Aspexit à partir des résultats du zonage pré-lissé (les valeurs seuils avec les deux autres zonages étant comprises dans les mêmes ordres de grandeur).

Pour chaque cépage, les valeurs ont été fixées de telle sorte (Figure 37) :

- **s'il y a superposition de la boîte de l'étendue interquartile** : la valeur seuil entre deux classes de vigueur correspond à la moyenne des valeurs comprises entre la limite du troisième quartile (75% des valeurs) d'une classe avec la limite du premier quartile (25% des valeurs) de l'autre classe ;

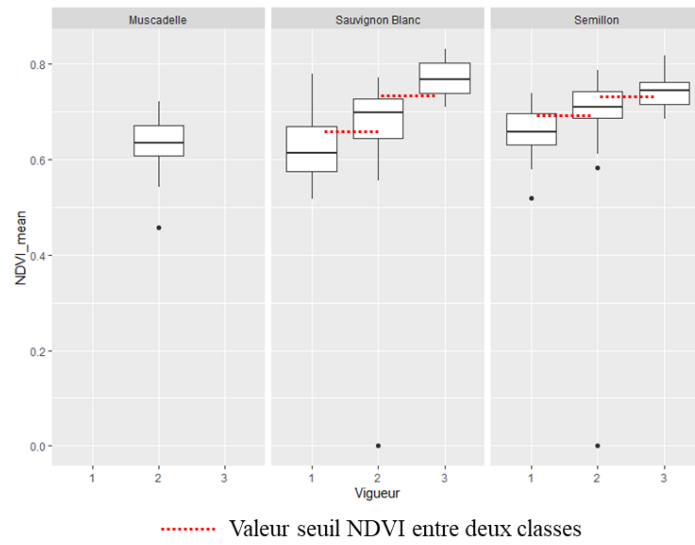


Figure 37 : Deuxième niveau de corrélation entre NDVI et vigueur visuelle et détermination des valeurs seuils (Source : Aspexit)



Figure 38: Carte finale obtenue après fusion des deux zonages les plus précis

- **s'il n'y a pas superposition de la boîte de l'étendue interquartile** : la valeur seuil correspond à la moyenne des valeurs comprises entre Q3 et Q1.

Pour le Sémillon par exemple, les valeurs seuils sont les suivantes :

Valeur minimale de NDVI < **Vigueur Faible** < 0.675  
 0.675 < **Vigueur Moyenne** < 0.740  
 0.740 < **Vigueur Forte** < Valeur maximale NDVI

Pour chacun des trois zonages, chaque zone a été attribuée à une classe de vigueur après définition des valeurs seuils, dissociant chaque cépage (Annexe 13). A partir des deux cartes les plus précises (pré-lissé et brute), une fusion des limites de zones a été effectuée pour obtenir une précision optimale des hétérogénéités intra parcellaires de vigueur (Figure 38).

### 1.3.2 Choix d'une carte finale en fonction des objectifs souhaités

Cette carte fusionnée est la carte finale qui servira de base pour localiser les zones d'hétérogénéités intra-parcellaires utiles pour la connaissance du vignoble par l'opérateur mais aussi pour définir la carte de modulation d'apports de fertilisation organo-minéral pour l'automne 2019.

Pour confirmer la pertinence de son utilisation, un test ANOVA entre chaque zone définie sur la carte finale et les classes de vigueur finales associées a été effectué. La relation linéaire entre les deux variables et la p-value nettement inférieure à 0.05 (Annexe 14) nous permettent de conclure que **les classes de vigueur finales définies à partir des valeurs seuils de NDVI permettent de localiser les hétérogénéités intra-parcellaires de vigueur.**

## 2 Approche globale de l'équilibre du système vigne

Dans un premier temps, une ACP a été réalisée avec l'ensemble des indicateurs de mesures effectués sur les placettes d'étude pour avoir un premier aperçu des variables qui **expliquent** les hétérogénéités de vigueur mais aussi celles qui **témoignent** d'un comportement différent de la vigne.

L'interprétation des axes avec autant de variables étant fastidieux, le but a été de faire ressortir les variables présentant des corrélations positives ou négatives avec la vigueur associée à chaque zone de la carte finale de localisation. La Figure 39 présente les variables corrélées avec la vigueur et possédant une p-value significative inférieure à 0.05.

Certaines variables **expliquent** le comportement de la vigne :

- la mesure de la résistivité : corrélation négative forte avec une p-value faible;
- les variables du statut organique du sol : corrélation positive moyenne avec une p-value faible.

D'autres semblent **témoigner** de ce comportement :

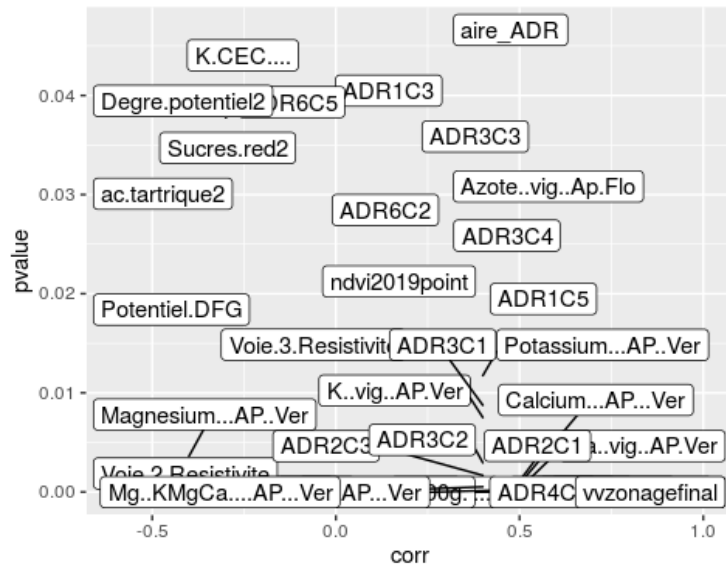


Figure 39: Variables corrélées avec la vigueur visuelle et possédant une p-value inférieure à 0.05 à partir de la totalité de la base de données

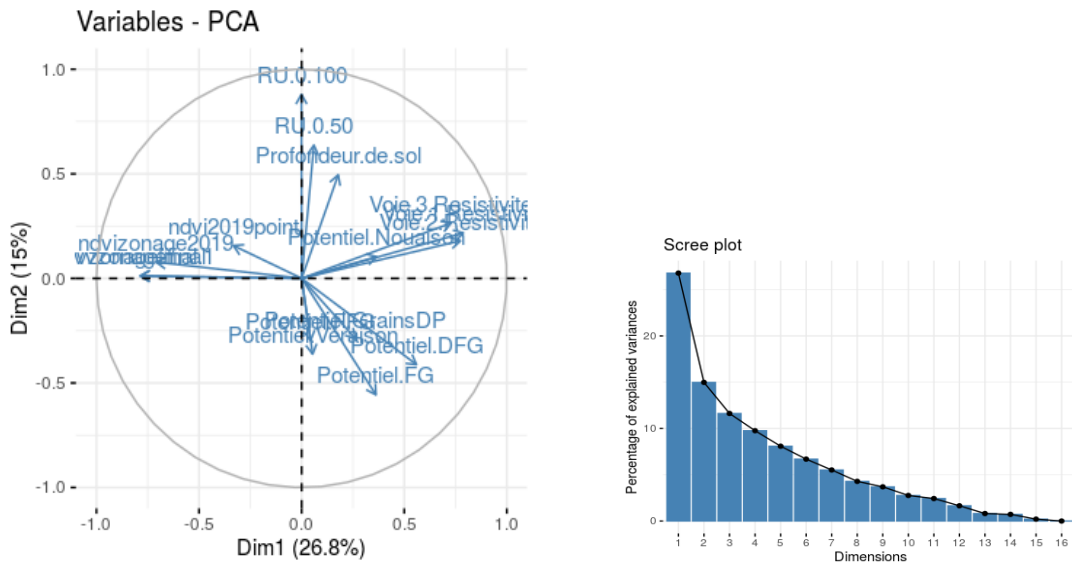


Figure 40 : ACP des variables propres à l'étude du statut hydrique



- l'allongement des rameaux : corrélation positive moyenne avec une p-value variable mais inférieure à 0.05 pour plusieurs stades de développement de la vigne;
- des variables propres au statut minéral mesurées au stade de la Véraison: corrélations négatives et positives avec des p-value faibles.

Ce premier aperçu permet ensuite de s'intéresser à chaque état étudié pour voir de manière précise les relations entre les indicateurs de mesure entre eux mais aussi avec la vigueur.

### 3 L'état hydrique relié au sol et à la vigueur

Une ACP a été réalisée avec l'ensemble des indicateurs propres à l'état hydrique étudiés (Figure 40 et 41). 41.8% des données sont expliquées à l'aide de deux axes. Le premier axe semble représenter l'eau disponible dans le sol tandis que le deuxième axe semble expliquer le comportement de la vigne et de son environnement (vigueur et résistivité). La proximité entre deux variables sur un axe permet d'approximer leur corrélation.

C'est le cas des trois voies de résistivités (corrélation positive avec l'axe 2 et proches du cercle des corrélations), tout comme les deux mesures de réserve utile (corrélation positive sur l'axe 1) et l'ensemble des mesures de potentiel de tige (corrélation moyenne entre les deux axes). Les ellipses propres à l'étude de l'influence du sol, du clone, du porte greffe et de l'itinéraire technique se superposent (Annexe 15). **Il n'est donc pas possible d'émettre une conclusion quant à des groupes particuliers de zones en fonction des variables qualitatives.**

#### 3.1 La résistivité des sols explicative des hétérogénéités intra-parcellaire de vigueur

Les cartes de résistivité (Figure 42 avec la voie 3 sur 0-200cm) montrent des hétérogénéités intra parcellaire de résistivité : certaines zones avec une forte résistivité correspondent visuellement à des sols à tendance plus sableuse sur le vignoble. Les trois voies de résistivité sont corrélées négativement avec la vigueur. Un test ANOVA permet de confirmer ce résultat avec des p-value toutes inférieures à 0.05 (Annexe 16).

D'après Dabas *et al.*, 2005, si des sols sont humides ou tout simplement à tendance argileuse, leur résistivité possèdera des valeurs basses. Ainsi, cette corrélation négative peut être comprise comme un lien direct entre l'eau du sol et la vigueur de la vigne associée. **Plus la résistivité est faible et plus la vigueur est forte.**

#### 3.2 Modélisation de la réserve utile dans le sol à partir de données pédologiques

##### 3.2.1 Caractérisation spatiale de la réserve utile

La représentation de la réserve utile à partir du modèle créé sur les deux profondeurs est visible dans la Figure 43. Une interpolation spatiale avec une pondération inverse de la distance a été faite avec un paramétrage d'interpolation des données discrètes en quantiles. Les valeurs des points de mesure sont comprises entre 17 et 55.9mmeau/cm<sup>3</sup> de sol pour la RU 0-50 et entre 17 et 109.3mmeau/cm<sup>3</sup> de sol pour la RU 0-100.

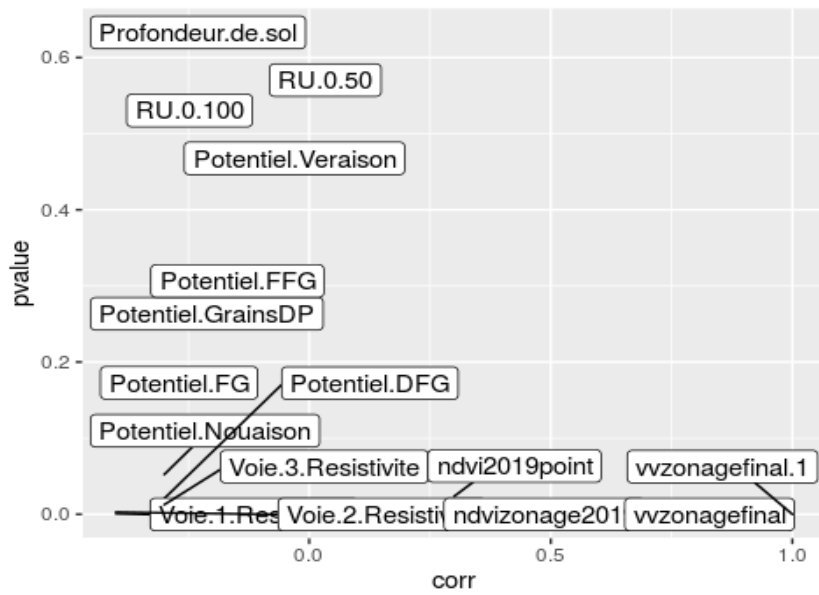


Figure 41: Corrélations significatives des variables de l'ACP Etat hydrique

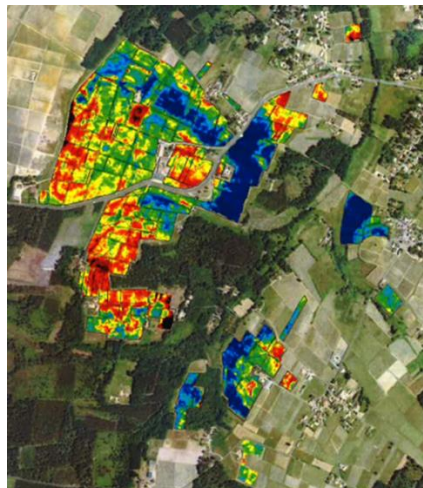


Figure 42 : Troisième voie de résistivité obtenues sur l'ensemble du parcellaire (0-200cm)

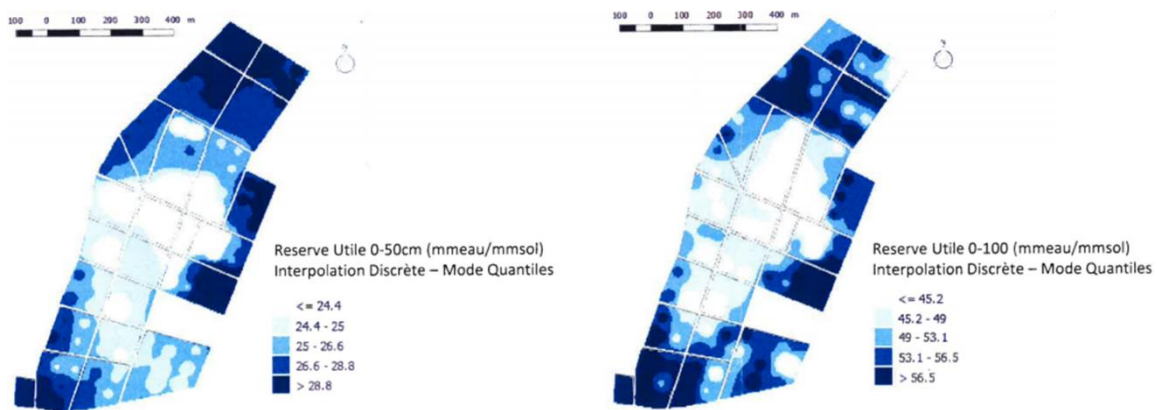


Figure 43: Représentation de la réserve utile calculée sur la zone d'étude

### 3.2.2 *Lien entre la réserve utile et les autres variables de l'état hydrique*

Ces deux indicateurs de mesure sont corrélés négativement avec la vigueur mais sont non significatifs après test ANOVA (Annexe 17).

**Le calcul de la réserve utile n'est pas lié à la mesure de la résistivité.** En effet, les p-values restent supérieure à 0.05 et ne permettent pas de conclure que le modèle de la réserve utile est réellement représentatif de l'eau disponible pour la vigne (la résistivité étant corrélée à la vigueur comme vu précédemment).

Une corrélation positive est visible entre la réserve utile sur 0-100cm et les mesures de potentiels au cours de la saison. Cela soulève la question de savoir si **l'eau disponible dans le sous-sol a un lien avec le comportement de la vigne au cours d'un millésime lors d'un stress hydrique.**

### 3.3 **Evolution de la contrainte hydrique au cours du millésime**

#### 3.3.1 *Caractérisation de l'effet millésime à travers deux indicateurs de mesure*

Les symptômes visuels de contrainte hydrique ont commencé à apparaître à partir du stade de la fermeture de grappe lorsque les températures ont commencé à être élevées et que le manque d'eau était présent (2.2mm de pluie seulement entre le début et la fin de ce stade phénologique).

Les cartes traçant l'évolution de la contrainte hydrique au cours du millésime sont visibles en Figure 44 (même méthode que pour la réserve utile). Ces cartes montrent que **les parcelles de la zone d'étude ne se comportent pas de la même manière face à un stress hydrique.**

Pour compléter cela, l'analyse des allongements de rameaux a été effectuée pour savoir si cet indicateur témoigne de la vigueur de la vigne (Figure 45). **La dynamique de la croissance des rameaux au cours du temps est similaire pour toutes les placettes de mesure.**

#### 3.3.2 *Lien entre ces deux indicateurs de mesures et la vigueur*

Un calcul d'aire sous la courbe d'évolution au cours de stades phénologiques a été effectué pour chaque placette de mesure de potentiel pour pouvoir effectuer une ANOVA comparant l'aire représentative du potentiel et la vigueur visuelle. Il est ressort une p-value de 0.08, ce qui ne permet pas de conclure d'un lien entre les deux variables étudiées (Annexe 18).

Concernant l'allongement des rameaux, une corrélation positive et significative avec une p-value de 0.04 nous permet de montrer que cet **indicateur de la croissance des rameaux témoigne de la vigueur de la vigne** (Champagnol, 1984) (Figure 46).

## 4 **L'état organique du sol responsable des hétérogénéités intra-parcellaire de vigueur**

Sur le même principe que pour l'état hydrique, une ACP avec les variables clés de l'état organique a été effectuée. Deux axes ont été conservés, expliquant 46.6% du nuage de point projeté (Figure 47 page suivante). Le premier axe semble représenter les indicateurs du statut

Mesure du Potentiel de Tige au cours du cycle végétatif de la vigne

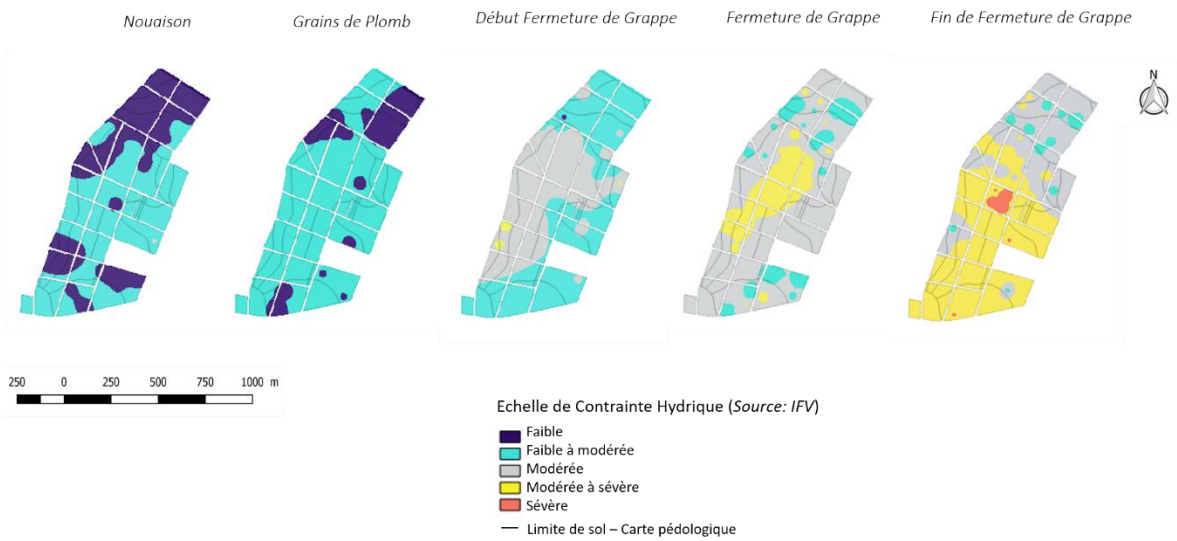


Figure 44: Evolution du potentiel de tige au cours du cycle végétatif de la vigne

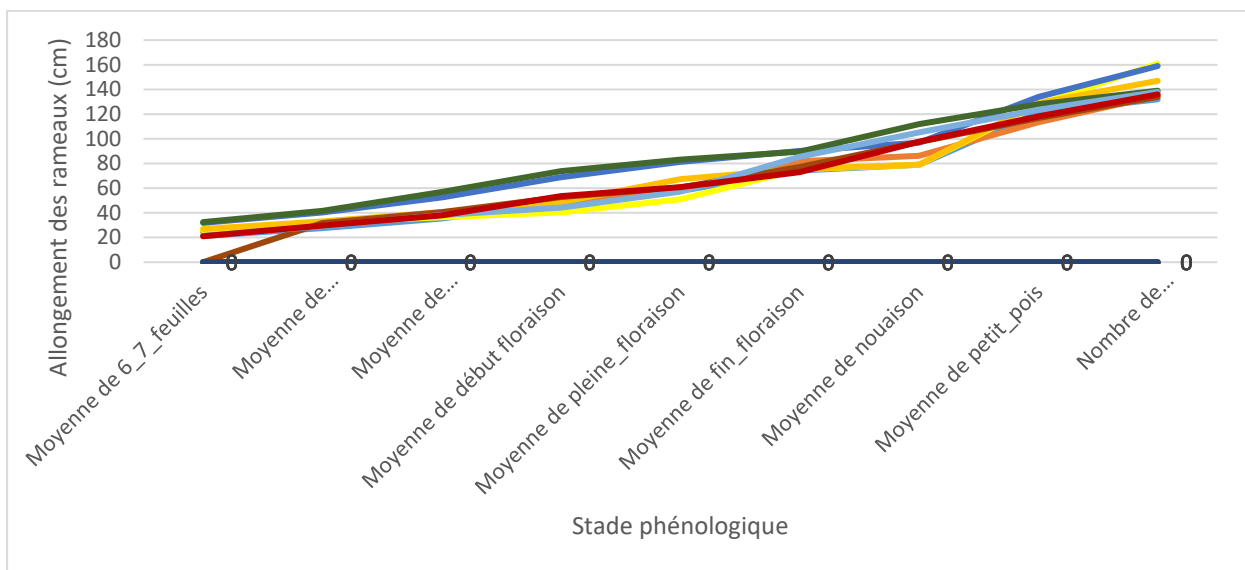


Figure 45: Graphique traçant l'évolution de l'allongement des rameaux (ADR) pour chaque placette de mesure en fonction du cycle végétatif

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
y	1	51458	51458	4.1876	0.04659 *
Residuals	45	552972	12288		

Figure 46: Corrélation significative entre l'aire sous la courbe de l'ADR et la vigueur visuelle

minéral du sol (pH eau, pH KCl ou bien K/CEC) tandis que le deuxième possède les indicateurs du statut organique du sol (MO, N, Co).

De nombreuses corrélations sont visibles entre ces variables et la vigueur (Figure 48 page suivante). Cependant, lorsque que les p-values sont déterminées pour chacune des variables en fonction de cette vigueur, il en ressort uniquement quelques-unes inférieures à 0.05. Ce résultat est aussi significatif pour les variables du carbone organique, de la capacité d'échange cationique et de l'azote dans le sol.

Le pourcentage de matière organique dans le sol explique ces hétérogénéités de vigueur (p-value de 0.00005) en Annexe 19. **Plus la matière organique est en quantité importante dans le sol et plus la vigueur de la vigne sera importante.**

## **5 L'état azoté et minéral**

Sur le même principe que pour l'état hydrique, une ACP avec les variables clés de l'état azoté et minéral a été effectuée. Deux axes ont été conservés, expliquant 39.6% du nuage de point projeté (Annexe 20). Le premier axe semble représenter quelques indicateurs mesurés par les analyses pétiolaires tandis que le deuxième possède la grande majorité des indicateurs étudiés.

### **5.1 L'état azoté de la vigne témoignant ou non des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur**

Les valeurs obtenues avec le N-tester sont comprises entre 215 et 395 au stade de la fermeture de grappe et entre 219 et 440 au stade de la Véraison (Figure 49 page suivante). Pour une mesure effectuée au moment de la véraison, une valeur N-tester inférieure à 400 indique une très faible alimentation en azote de la vigne et une valeur supérieure à 550 une alimentation en azote très forte. (Van Leeuwen. K, Friant, 2011).

La mesure avec le N-tester ne présente aucune corrélation et ce pour les deux mesures effectuées. Avec une p-value de 0.14 à Floraison et 0.34 à Véraison, aucune conclusion n'est possible quand à cet indice d'état azoté de la vigne.

Certains paramètres des analyses pétiolaires sont significatifs en comparaison avec la vigueur, comme par exemple l'azote au stade la Floraison (p-value de 0.034) (Figure 50 page suivante). Il faut pour autant prendre le recul nécessaire car cette mesure a été effectué au stade où le végétal commence à absorber l'azote dans le sol, ce n'est donc pas le stade représentatif de la teneur en azote maximale de la vigne. La corrélation moyenne à 0.4 est donc à ne pas interpréter trop rapidement. Sur le millésime 2019, à ce stade, la teneur en azote semble être relié à la vigueur associé à chaque zone du parcellaire mais ce n'est pas une vérité générale, d'autant plus que cela n'est pas confirmé pour ce même indice à véraison.

### **5.2 L'état minéral de la vigne témoignant des hétérogénéités intra-parcellaire de la vigueur**

Les variables qui ressortent après analyse des corrélations sont principalement celles liées à l'équilibre entre le potassium, le magnésium et le calcium. Analyser l'état minéral en début de campagne ne semble pas permettre de montrer des relations claires entre les différentes

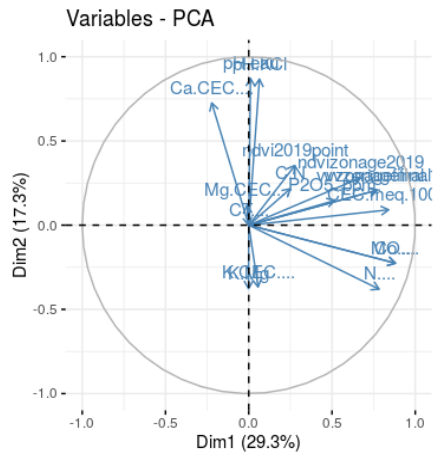


Figure 47: ACP des variables de l'état organique

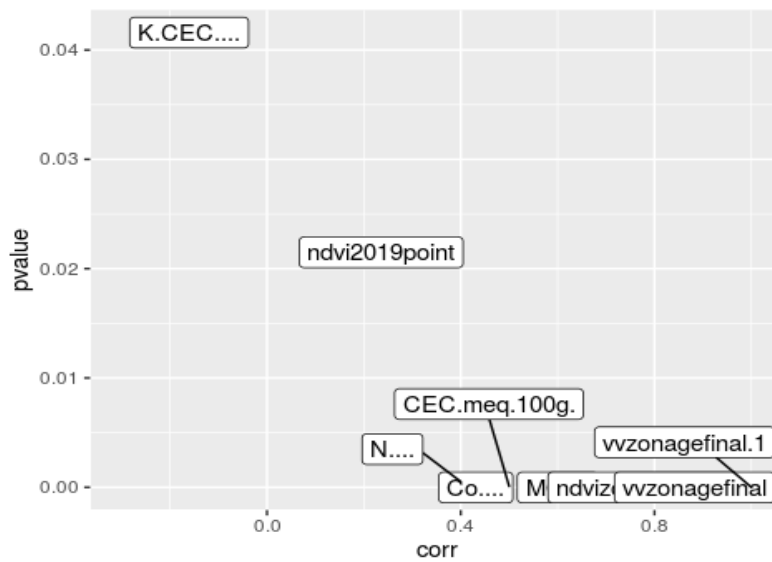


Figure 48: Corrélations entre les variables de l'ACP Etat organique et la vigueur visuelle possédant une p-value inférieure à 0.05

variables. Il semble que c'est lorsque les organes sources et puits changent à véraison que la vigne exprime mieux son différentiel minéral.

Le calcium (mg/100 pétioles) est l'indicateur le mieux corrélé avec la vigueur : plus sa teneur est élevée et plus la vigueur de la vigne sera importante.

D'après les résultats, la relation entre le potassium et le magnésium est notable. Leurs corrélations sont opposées et sont donc logiques au vue de l'effet antagoniste du potassium sur le rapport K/Mg (p-value inférieure à 0.01) (Figure 49).

Ce résultat confirme la volonté depuis deux ans d'effectuer un essai d'apports foliaires de magnésie au cours de la saison en incluant une modalité témoin non traitée pour approfondir sur la teneur en magnésium et en potassium dans les raisins à maturité.

### 5.3 Des apports foliaires de magnésie pour mieux comprendre le système vigne

La comparaison entre les contrôles maturité de 2018 et 2019 a été fait suivant les modalités d'apports (traité ou non traité) pour voir l'influence d'un apport de magnésie au cours de la saison sur la teneur en potassium et magnésium dans les raisins. Les analyses pétiolaires et de limbe à floraison ne sont pas discriminantes pour conclure d'un effet d'apports foliaires au cours du millésime 2019. Cependant, à partir de la véraison, le rapport K/Mg est plus grand pour la modalité du témoin non traité. Cela rejoint donc les résultats de l'ACP montrant l'impact de ces deux éléments sur l'équilibre de la vigne.

## PARTIE 5 : Discussion et perspectives d'optimisation des pratiques culturales

### 1 Bilan sur l'étude

#### 1.1 La localisation des hétérogénéités de vigueur

L'évolution de la vigueur se fait sur du long terme pour atteindre un vignoble homogène et adapté aux objectifs de production. Cette méthode de zonage est répétable dans le temps, cela permet donc de lui accorder plus de confiance pour pouvoir l'analyser sur du long terme (Opazo, Tisseyre, 2008). Dans le cas de cette étude au Château Rieussec, les conditions pédo-climatiques jouent un rôle important sur l'interprétation que l'on peut faire de ce zonage. **Utiliser un outil d'agriculture de précision en lui superposant une expertise de terrain permet de localiser les hétérogénéités intra parcellaire de vigueur conformément à la réalité.**

Afin d'aller plus loin dans l'interprétation de la localisation des hétérogénéités de vigueur, il est possible de créer deux classes de vigueur intermédiaires (à partir de la médiane entre deux classes de vigueur définies par cette étude) qui permettent d'obtenir une représentation d'autant plus précise de la réalité (Figure 51). **Plus il y a de classes de vigueur définies et plus la carte de préconisation sera précise dans les zones d'apports** (Figure 52).

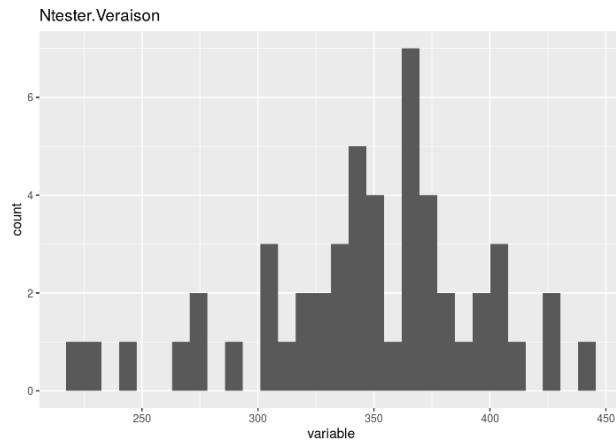


Figure 49: Répartition des valeurs de N-tester au stade la Véraison

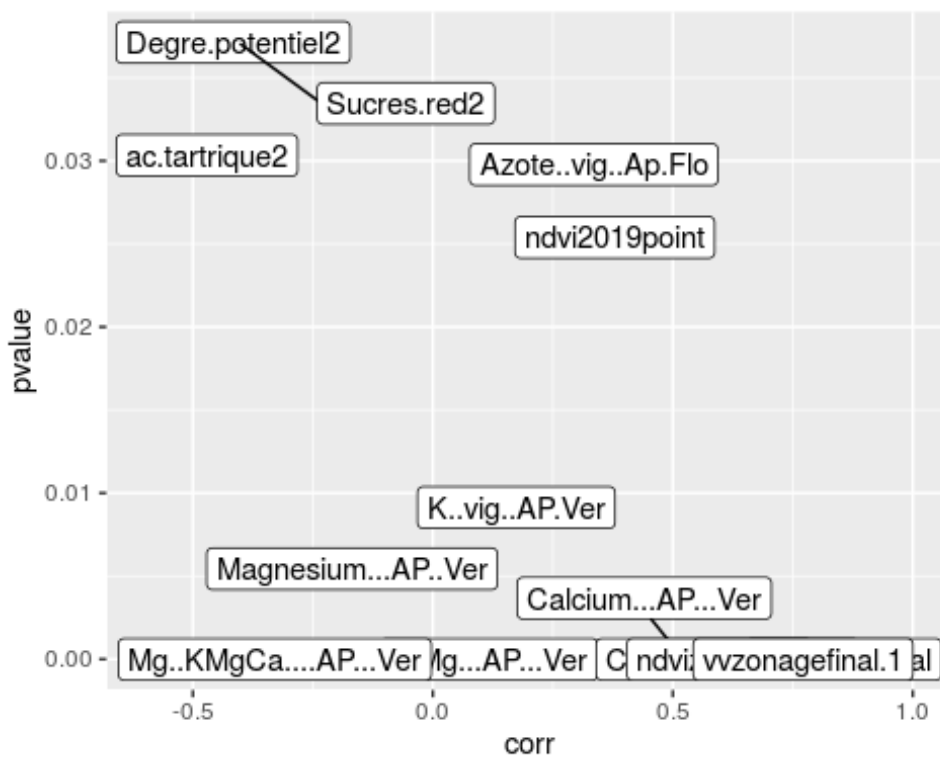


Figure 50 : Variables corrélées avec la vigueur visuelle et significatives (inférieure à 0.05 en p-value)



## 1.2 Hétérogénéités de vigueur : origines et réactions internes du système vigne

### 1.2.1 *L'eau disponible pour la vigne explique les hétérogénéités de vigueur*

L'allongement des rameaux, indicateur de la vigueur de la vigne, se doit d'être interprété en relation avec l'état hydrique du sol (Hardie et Martin, 2000). D'après cette étude, **la croissance des rameaux témoigne de l'état hydrique et donc de l'eau disponible dans le sol.**

Les différences d'état hydrique du sol induisent des statuts hydriques différents pour la plante, eux-mêmes corrélés avec la mesure de la résistivité (Opazo, Tisseyre, 2008). Ce résultat se confirme dans cette étude : **la résistivité témoigne de l'eau présente dans le sol et explique les hétérogénéités de vigueur.**

Tenir compte uniquement de la réserve utile pour évaluer un statut hydrique est difficile, puisque d'autres paramètres rentrent en équation : le volume et la profondeur d'enracinement, du type de racines et, d'autre part, l'évapotranspiration potentielle (ETP) (Deloire, 2008). Prendre en compte la réserve utile sur uniquement 50cm permet de pouvoir relier l'eau disponible dans l'horizon organo-minéral avec les données de l'état organique.

Le potentiel de tige permet d'évaluer le statut hydrique de la vigne (O.Tregoat, 2000). Avant véraison (période de mesure pendant l'étude), l'alimentation en eau des vignes à enracinement profond se fait dans de bonnes conditions, même lorsque les conditions sont sèches. Pour les vignes jeunes ou à enracinement superficiel, elles souffrent du manque d'eau lorsque les mois de juin et juillet sont caractérisés par une forte aridité (Seguin, 1976). **Etudier l'alimentation en eau de la vigne sur toute la profondeur exploitée par les racines permet de mieux interpréter son comportement dans des sols différents (Seguin, 1975).** La pertinence de la donnée sur la profondeur d'enracinement prend donc sens. Cela aurait été pertinent d'y avoir accès.

Après de fortes pluies, l'eau reste dans les couches superficielles de sol (Seguin, 1976), cela peut donc expliquer le changement de comportement des zones en limite de stress sévère après les fortes pluies du 27 juillet 2019. Certains outils de diagnostic du stress hydrique ont été utilisés à partir de bilan hydrique (Pellegrino, 2003), prenant en compte des paramètres important comme la FTSW et les potentiels hydriques de base. Dans le cas de cette étude, **l'effet millésime est important et permet de traduire le comportement de la vigne face à une situation de stress hydrique, sans pouvoir la relier à la notion d'hétérogénéité intra parcellaire de vigueur.**

**L'eau disponible pour la vigne est donc une caractéristique à la fois permanente et temporaire reliée à l'effet millésime qui est à l'origine des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur.**

### 1.2.2 *L'état organique, azoté et minéral du sol et de la vigne : relations étroites à l'origine des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur*

D'après la littérature, une fertilisation déséquilibrée (inappropriée ou excessive) de la vigne peut exercer des effets néfastes sur la qualité du raisins (Delas, 1981). L'azote est l'élément qui influence le plus le développement végétatif de la vigne avec des valeurs d'azote total du sol variables en fonction du prélèvement lors des analyses de sol (Van Leeuwen, 2011). Le statut



**SEMILLON** : Faible < 0,670 < Moyenne Faible < 0,703 < Moyenne < 0,730 < Moyenne Forte < 0,762 < Forte

**SAUVIGNON** : Faible < 0,650 < Moyenne Faible < 0,698 < Moyenne < 0,729 < Moyenne Forte < 0,762 < Forte

**MUSCADELLE** : Moyenne < 0,519 < Moyenne Forte < 0,629 < Forte

**Figure 51** : Proposition de carte finale de vigueur avec deux classes de vigueur intermédiaires

azoté de la vigne varie fortement en fonction de paramètres liés au sol comme la teneur en matière organique et le rapport C/N (Van Leeuwen, 2011).

La teneur en chlorophylle des feuilles varie avec le statut azoté de la vigne, c'est pourquoi **la mesure du NDVI avec le GreenSeeker est dépendante de l'état azoté puisque la porosité et la teneur relative en chlorophylles sont mesurées** (Goutouly et al., 2006). La nutrition azotée varie en fonction du sol et du millésime : les conditions climatiques au printemps influent sur la vitesse de minéralisation de la matière organique. Par conséquent **la matière organique et le C/N expliquent les hétérogénéités de vigueur mais cela reste propre au millésime 2019, tout comme les indicateurs d'état azoté des analyses pétiolaires.**

Ces caractéristiques du sol et de la vigne deviennent donc temporaires puisque sujette à des évolutions au cours du temps.

Concernant l'état minéral, les objectifs à atteindre sont de 3 à 4 % de la C.E.C pour le potassium et de 6 à 8 % de la C.E.C pour le magnésium. Un K/Mg est considéré dans les limites usuelles lorsqu'il est compris entre 2 et 7g/100g pétioles (Guide de la Fertilisation, 2003). L'effet antagoniste du potassium envers le magnésium est montré dans cette étude mais cela montre aussi que le calcium est un élément qui explique ces hétérogénéités de vigueur.

**L'étude de l'état hydrique, organique et azoté permet donc de valider certaines hypothèses de cette étude : ces états sont à l'origine des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur du millésime 2019. L'état minéral est, quant à lui, vu comme une réaction indirecte : ces paramètres d'étude témoignent des hétérogénéités intra parcellaire de vigueur.**

## **2 Limites et biais de l'étude**

Le fait de considérer un sujet comme celui-ci dans sa globalité avec un nombre important d'indicateurs et de mesures permet d'avoir un aperçu global du fonctionnement de la vigne propre au vignoble du Château Rieussec.

### **2.1 La mesure NDVI : une mesure d'expression végétative et non de vigueur**

Il est bon de savoir que la mesure de NDVI en elle-même est dépendante de plusieurs facteurs qui peuvent biaiser la donnée et la rendre différente d'une année sur l'autre en plus de l'influence du millésime à proprement parler (précocité, conditions climatiques, localisation,...). Le poids de bois de taille, qui reste l'indicateur représentatif de la vigueur, auraient pu être mieux corrélés avec le NDVI si les placettes avaient été plus nombreuses et présente sur des zones de vigueur nettement hétérogènes du vignoble.

### **2.2 L'importance de l'effet millésime dans l'étude des origines des hétérogénéités de vigueur**

L'effet millésime étant important dans l'étude de la vigueur. Il faut prendre le recul nécessaire et se dire que les conditions de croissance de la vigne lors du millésime 2019 seront différentes de celles du prochain millésime ou même du précédent. Les mesures effectuées sur le terrain comme celles du statut azoté avec le N-tester sont sujettes à des biais de mesure. Ces valeurs

Exemple de modélisation avec l'engrais MV100



**SEMILLON** : Faible < 0,670 < Moyenne Faible < 0,703 < Moyenne < 0,730 < Moyenne Forte < 0,762 < Forte

**SAUVIGNON** : Faible < 0,650 < Moyenne Faible < 0,698 < Moyenne < 0,729 < Moyenne Forte < 0,762 < Forte

**MUSCADELLE** : Moyenne < 0,519 < Moyenne Forte < 0,629 < Forte

**Figure 52** : Proposition d'une carte de préconisation associée

évoluent au cours de la saison et peuvent varier en fonction du cépage, des carences ou des maladies qui peuvent apparaître sur la vigne. D'où l'importance de l'effet millésime dans la discussion des résultats (Van Leeuwen, 2011).

### **2.3 Limite des outils de mesure des relations entre les hétérogénéités de vigueur et leurs origines**

Pour considérer certaines mesures comme significativement concluante, il est évident que certains indicateurs peuvent manquer à cette étude. Considérons par exemple l'étude de l'état hydrique, un analyse plus poussée du bilan hydrique ou tout simplement de l'impact de la profondeur de sol aurait certainement permis d'affiner l'interprétation que l'on fait de l'ensemble des mesures effectuées pour étudier le statut hydrique de la vigne et de son environnement. Il en est de même pour la profondeur d'enracinement ou la surface foliaire (directement reliée avec le NDVI, Bourgeon, 2015).

Pour avoir un suivi global de l'essai magnésie, des modalités similaires à 2018 dans l'itinéraire technique auraient limité les biais de comparaison. Au vu de la globalité et de l'importance du sujet, le choix a été de se focaliser sur l'étude des données de 2019 dans ce rapport. De nombreuses variables auraient pu être approfondies et comparées avec des données similaires sur les dernières années pour observer des dynamiques similaires de comportement ou bien même un pilier pour mieux interpréter certaines données (NDVI notamment).

## **3 Perspectives d'évolution dans l'optimisation des pratiques culturales**

### **3.1 Perspective d'optimisation de la modulation de dose**

Actuellement la quantité d'engrais à apporter est calculée à partir d'une analyse de sol propre à une parcelle. Cela ne prend donc pas en compte les hétérogénéités intra parcellaire. Il serait intéressant de prolonger le travail en attribuant à chaque sondage tarière effectué en 2003 (avec la profondeur de l'horizon de surface) une dose d'engrais nécessaire et sa classe de vigueur associée sur la carte finale (avec 3 ou 5 classes de vigueur fonction de la satisfaction du rendu). Cela permettrait de gagner en précision ou de confirmer certaines décisions passées dans le choix des doses d'engrais à appliquer pour chaque classe de vigueur.

Par ailleurs, il serait intéressant de comparer les données NDVI sur quelques années pour pouvoir confirmer la répétabilité de la mesure faite par le GreenSeeker mais aussi pour se rendre compte de l'évolution du vignoble en fonction des divers apports effectués. Etablir une méthode sur le long terme pour analyser ces données NDVI comme celles de 2019 ont été traitées est un souhait soulevé à l'issue de ce travail avec Corentin Leroux.

### **3.2 Perspective de modification du système de culture : les engrais verts**

Un autre pilier d'évolution en plus de la précision des apports d'engrais repose dans la mise en place d'engrais verts pour homogénéiser le parcellaire. Pour s'y faire, un semoir direct a été construit au cours de la campagne 2019 pour être opérationnel durant l'automne 2019 (Figure 66). Lors de leur destruction, les éléments accumulés dans la plante semée seront restitués à la vigne sous forme assimilables. A titre d'exemple, lorsque la vigne nécessite de l'azote, les

légumineuses (vesce, trèfle, luzerne ou bien la féverole) peuvent enrichir le sol grâce à leur fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Que cela soit pour maîtriser les adventices ou bien pour structurer le sol sur lequel il est implanté, ce couvert végétal, si les conditions météorologiques sont favorables, permettra de compenser certains déséquilibres à la vigne qui s'observeront à long terme, puisque la gestion de la vigueur est un sujet d'actualité du Château Rieussec depuis une dizaine d'années et en perpétuelle compréhension pour obtenir un vignoble plus homogène.

## Conclusion

Il a donc été possible de localiser de manière précise les hétérogénéités en intra-parcellaire de vigueur et d'en comprendre les mécanismes généraux. L'eau et les caractéristiques organique et azoté propre au sol sont à l'origine de ces hétérogénéités de vigueur qui se témoignent par des déséquilibres minéraux au sein du système vigne. Cela permet de prendre du recul sur l'interprétation de l'ensemble des outils de mesure utilisés tous les jours en production : réfléchir au mieux les apports de fertilisation, mieux comprendre le système vigne permet de mieux connaître les piliers de gestion sur lesquels il est possible de se pencher et de les améliorer constamment. Ce travail est la continuité d'années de réflexion sur le sujet et représente uniquement une étape à la bonne compréhension. Cela permettra de se conforter dans l'idée qu'il est nécessaire de toujours voir plus loin dans l'optimisation des outils et dans l'interprétation que nous pouvons en faire.

Cette étude portant sur la compréhension des hétérogénéités de vigueur tant par leur localisation que par leur origines a permis de mettre en lumière plusieurs aspects. Le premier est la relation étroite qu'il peut y avoir entre l'analyse scientifique d'une donnée et la vision de terrain accès uniquement sur la production, en dehors de toute connaissance annexe autre que l'œil et l'expérience. La seconde est la prise de recul sur un sujet globale mettant en lien de nombreuses variables et prouvant la complexité que peut avoir une seule plante : la vigne. L'ensemble des données est sujette à être de nouveau utilisées pour pouvoir les approfondir et se concentrer sur des états en particulier du système vigne, si le besoin est nécessaire.

## Références Bibliographiques

- Acevedo-Opazo, C., Tisseyre, B., Guillaume, S., & Ojeda, H. (2008). The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. *Precision Agriculture*, 9(5), 285–302. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9073-1>
- Arp, S., & Dabas, D. (2002). *De La Variabilite Des Sols*, . 1–4.
- Ary Bruand, Odile Duval, I. C. (2004). *Estimation des proprietes de retention en eau des sols a partir de la base de donnees SOLHYDRO : Une premiere proposition combianant le type d'horizon, sa texture et sa densite apparente*. Retrieved from <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/hal-00089032/document>
- Besson, A., Cousin, I., Boizard, H., & Richard, G. (n.d.). Utilisation de la résistivité électrique pour la caractérisation de la structure des sols cultivés. *Soil Science*, 2, 1–4.
- Bourgeon, M. (2015). *Conception et é valuation d ' un dispositif d ' imagerie multi - spectrale de proxidetection embarqué pour caractériser le feuillage de la vigne .*
- CARBONNEAU, A. (1984). Action de la concentration de la solution nutritive sur quelques caractéristiques physiologiques et technologiques chez *Vitis Vinifera* L. cv. Cabernet-Sauvignon. III. — Régime hydrique, photosynthèse brute et corrélations intra-plante. *Agronomie*, 4(6), 535–541. <https://doi.org/10.1051/agro:19840606>
- Carbonneau, A., & Lecatre, G. (1976). Analyse de la croissance des feuilles du sarment de vigne : estimation de sa surface foliaire par échantillonnage. *OENO One*, 10(2), 141. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.1976.10.2.1640>
- Carte Sauternes | Dulong. (n.d.). Retrieved October 11, 2019, from <http://www.dulong.com/fr/carte-sauternes/>
- Choné, X., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., & Gaudillère, J. P. (2001). Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. *Annals of Botany*, 87(4), 477–483. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1361>
- Conradie, W. J. (2017). Seasonal Uptake of Nutrients by Chenin blanc in Sand Culture: I. Nitrogen. *South African Journal of Enology & Viticulture*, 1(1). <https://doi.org/10.21548/1-1-2414>
- Cornelis, V. L., & Seguin, G. (1994). Incidence de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (&lt;em&gt;Vitis vinifera&lt;/em&gt; variété Cabernet franc, Saint-Emilion 1990). *OENO One*, 28(2), 81. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.1994.28.2.1152>



- De Rudnicki, V. (2010). *Viticulture de précision : perspectives pour une meilleure gestion des traitements*. 10. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/468875/filename/MO2008-PUB00026937.pdf>
- Délimitation de classes et de zones de modulation en agriculture de précision – Aspexit. (n.d.). Retrieved October 11, 2019, from <https://www.aspexit.com/delimitation-de-classes-et-de-zones-de-modulation-en-agriculture-de-precision/>
- Deloire, A., Ojeda, H., Zebic, O., Bernard, N., Hunter, J., & Carbonneau, A. (2006). Influence De L ' Etat Hydrique De La Vigne Sur Le Style De Vin. *Revue Internet De Viticulture Et Oenologie*, 19(November), 1–12. Retrieved from WWW.INFOWINE.COM
- Deloire. (2008). L'irrigation de la vigne : Synthèse. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Goulet, E., & Barbeau, G. (2006). Apports des mesures de résistivité électrique du sol dans les études sur le fonctionnement hydrique du système sol/vigne. *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin*, 40(2), 57–69.
- GreenSeeker - Trimble Ag Field Solutions. (n.d.). Retrieved October 11, 2019, from <https://agriculture.trimble.com/precision-ag/products/greenseeker/?lang=fr>
- GUIDE DE LA FERTILISATION COORDINATION : vers une fertilisation raisonnée*. (2003).
- HARDIE, W. J., & MARTIN, S. R. (2000). Shoot growth on de-fruited grapevines: a physiological indicator for irrigation scheduling. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(1), 52–58. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00162.x>
- Johnson, L. ., Roczen, D. ., Youkhana, S. ., Nemani, R. ., & Bosch, D. . (2003). Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 38(1), 33–44. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00106-0)
- La Revue des Œnologues | Capteurs optiques portables pour une viticulture de précision. (n.d.). Retrieved October 11, 2019, from <http://search.oeno.tm.fr/search/article/AVprsdg1YaAqBff0BrKH?tuid=8584>
- Lamb, D., Hall, A., & Louis, J. (2002). The Australian & New Zealand grapegrower & winemaker. In *Australian and New Zealand Grape Grower and Winemaker*. Retrieved from <https://researchoutput.csu.edu.au/en/publications/airborne-remote-sensing-of-vines-for-canopy-variability-and-produ>
- Le Botrytis, la pourriture noble, l'essence des grands vins liquoreux. (n.d.). Retrieved October 11, 2019, from <http://www.cru-barrejats.com/fr/botrytis.htm>
- Lemaire, G. J., Nicolardot, B. (19. -. . . .), & Institut national de la recherche agronomique (France). (1997). *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*.

- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005). Future Directions of Precision Agriculture. *Precision Agriculture*, 6(1), 7–23. <https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8>
- Moran, M. S., Inoue, Y., & Barnes, E. M. (1997). Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61(3), 319–346. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00045-X)
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2012.08.009>
- PELLEGRINO, A., LEBON, E., SIMONNEAU, T., & WERY, J. (2005). Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11(3), 306–315. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00030.x>
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1–85. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60513-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1)
- Primicerio, J., Di Gennaro, S. F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A., & Vaccari, F. P. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 13(4), 517–523. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9257-6>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173–193. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2004.10.004>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Samouëlian, A., Cousin, I., ... Electrical, G. R. (2006). *Electrical resistivity survey in soil science : a review . To cite this version : HAL Id : hal-00023493.*
- Tregoat, O., Van Leeuwen, C., Choné, X., & Gaudillère, J. P. (2002). Étude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* L. cv merlot, 2000, bordeaux). *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin*, 36(3), 133–142.
- Van Leeuwen, C., & Friant, P. (2011). Les Méthodes D ' Estimation De L ' Alimentation Azotée De La Vigne Et Des Raisins Au Vignoble : État De L ' Art. *Colloque IFV Sud-Ouest*, 18–23.
- Van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., & Gaudillère, J.-P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*, 43(3), 121. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>

Van Leeuwen, C., Vivin, P., Choné, X., Tregoat, O., Jaeck, M.-E., Rabusseau, S., & Gaudillère, J.-P. (2008). Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins. *Innovations Agronomiques*, 2, 159–167.

# ANNEXES

Figure 1: Carte pédologique du Château Rieussec.....	II
Figure 2: Cycle de l'azote en agriculture.....	III
Figure 3: Classes de Pédotransfert de Bruand et al., 2006.....	IV
Figure 4: Stades de développement de la vigne (d'après Baggiolini, Ctifl).....	IV
Figure 5: NDVI entre 2012 et 2015 (GreenSeeker).....	V
Figure 6: Prospection du parcellaire du Château Rieussec.....	VI
Figure 7: Application Farmworks.....	VII
Figure 8: Exemple de deux sondages tarière (Source : M. Christen).....	VII
Figure 9: Grille permettant de replacer les sondages tarière sur le logiciel Qgis.....	VIII
Figure 10: Répartition des poids de bois de taille en fonction du NDVI pour les deux cépages majeurs du parcellaire (Source : Aspexit).....	VIII
Figure 11: Carte de vigueur visuelle effectuée sur l'ensemble du parcellaire.....	IX
Figure 12: Deux autres niveaux de précision de zonage.....	X
Figure 13: Trois zonages après définition des valeurs seuils de NDVI.....	XI
Figure 14:Corrélation significative entre les classes de vigueur visuelle définies et les zones NDVI.....	XII
Figure 15: Influence de la variable qualitative "Sol" parmi l'ensemble des variables de l'ACP.....	XII
Figure 16: Significativité des p-value entre les trois voies de résistivité et la vigueur visuelle (résidus vérifié).....	XIII
Figure 17: Test ANOVA entre le RU 0-100 et la vigueur visuelle.....	XIII
Figure 18: ANOVA et résidus associés entre l'aire sous la courbe des potentiels de tige pour chacune des placettes de mesure et la vigueur visuelle.....	XIII
Figure 19:ANOVA entre la matière organique (%) et la vigueur visuelle.....	XIV
Figure 20:ACP avec les variables propres à l'étude de l'état azoté et minéral.....	XIV

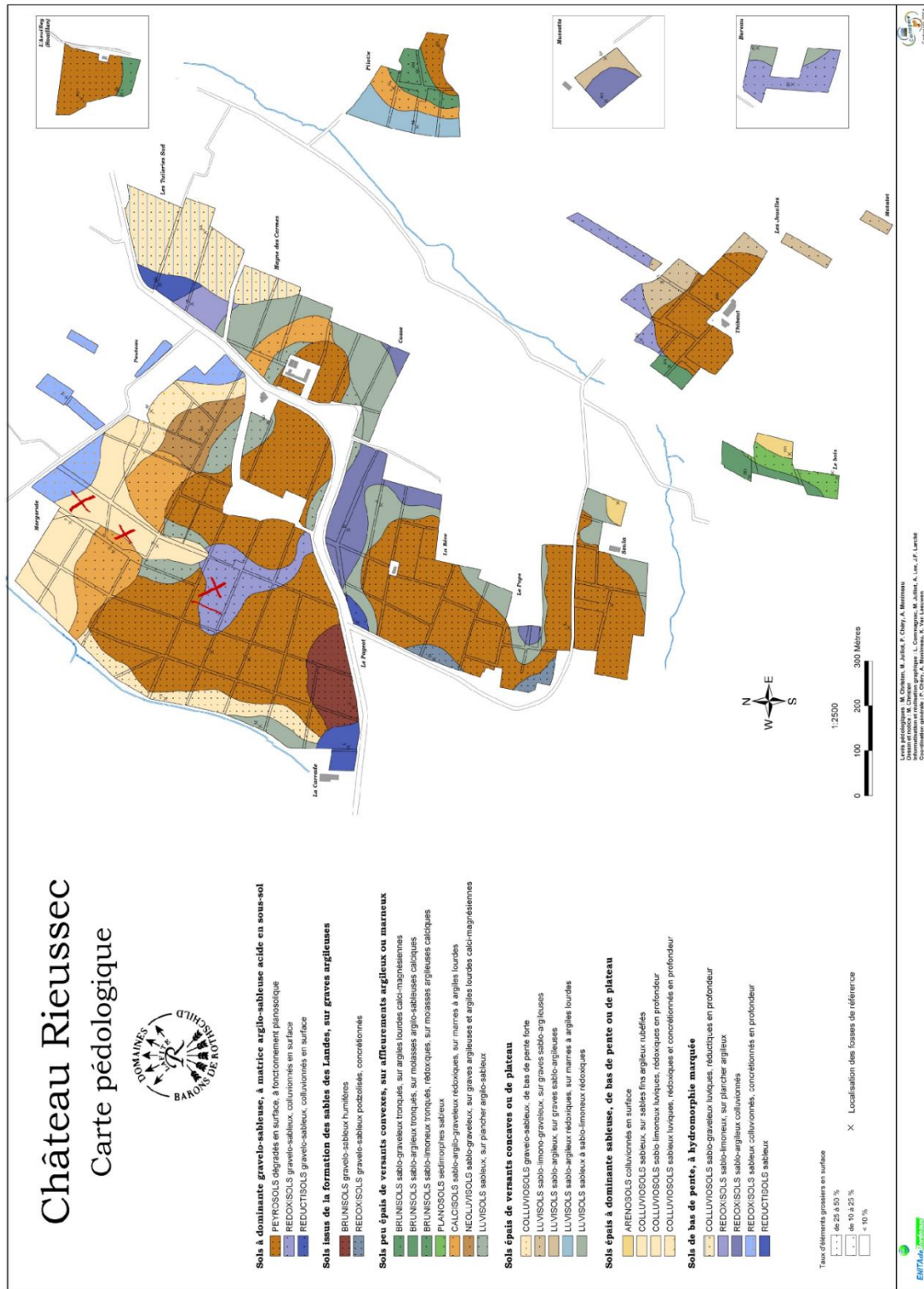


Figure 1: Carte pédologique du Château Rieussec

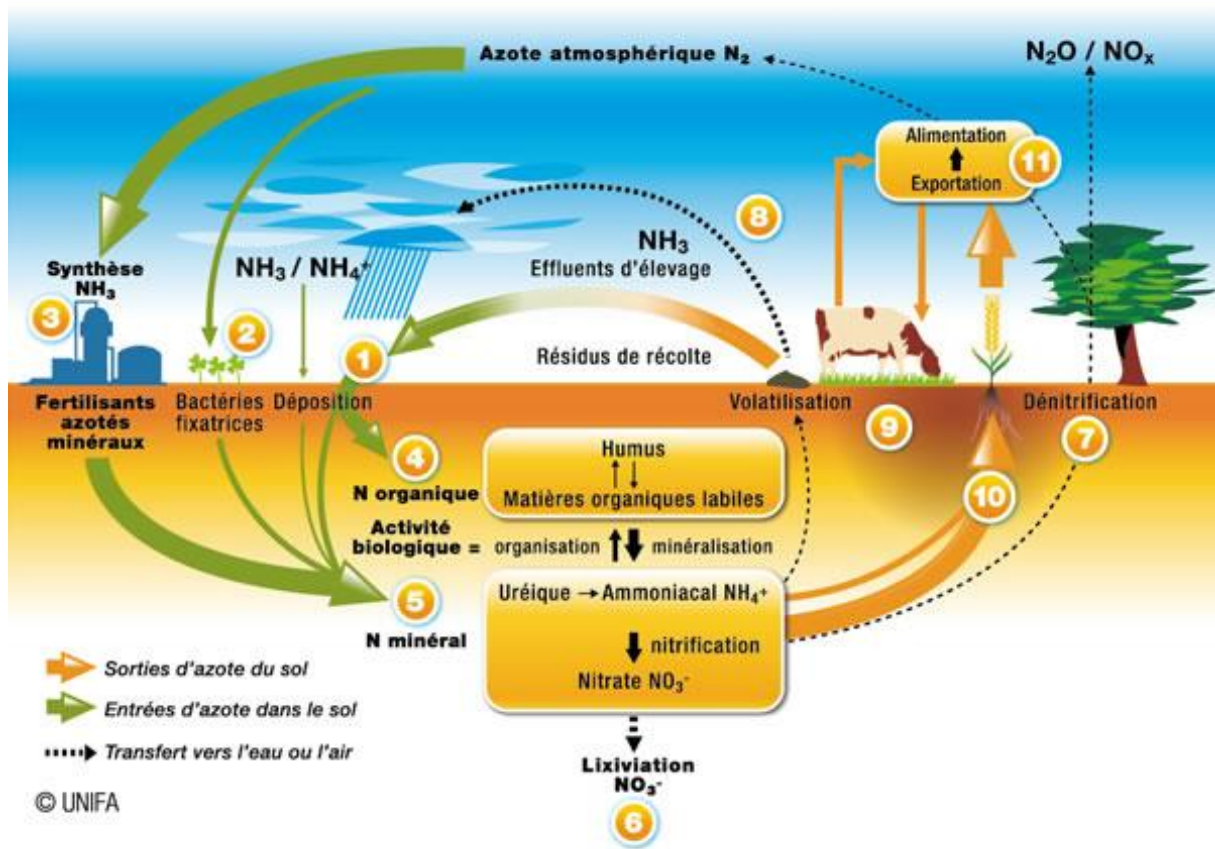


Figure 2: Cycle de l'azote en agriculture

Type d'horizon	Texture	Densité d'horizon		Teneur en eau volumique en cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>						
		moy.*	s*	$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,5}$	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,5}$	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,5}$	$\theta_{4,2}$
A	ALO	1,31	0,18	0,422	0,391	0,373	0,351	0,347	0,304	0,249
	AL	1,42	0,07	0,359	0,346	0,333	0,313	0,286	0,247	0,197
	AS	1,31	-	0,445	0,385	0,385	0,334	0,286	0,224	0,212
	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LA	1,42	0,11	0,359	0,340	0,325	0,302	0,267	0,215	0,152
	LAS	1,45	0,12	0,348	0,335	0,320	0,301	0,266	0,210	0,153
	LSA	1,55	0,13	0,312	0,304	0,283	0,267	0,245	0,201	0,140
	LM	1,40	0,09	0,350	0,337	0,322	0,283	0,209	0,143	0,109
	LMS	1,53	0,12	0,323	0,311	0,300	0,277	0,239	0,167	0,117
	LS	1,70	-	0,291	0,277	0,265	0,252	0,223	0,155	0,104
	LLS	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SA	1,66	0,05	0,287	0,278	0,259	0,233	0,197	0,164	0,131
SL	1,61	0,11	0,277	0,259	0,216	0,173	0,143	0,118	0,084	
S	1,49	0,12	0,177	0,140	0,117	0,094	0,080	0,066	0,057	
E, B, C	ALO	1,43	0,17	0,435	0,421	0,408	0,384	0,366	0,341	0,297
	AL	1,55	0,12	0,361	0,351	0,335	0,315	0,290	0,257	0,222
	AS	1,69	0,08	0,324	0,315	0,296	0,279	0,262	0,238	0,201
	A	1,67	0,08	0,338	0,332	0,315	0,290	0,282	0,253	0,221
	LA	1,53	0,05	0,344	0,331	0,312	0,280	0,238	0,196	0,163
	LAS	1,58	0,10	0,335	0,322	0,304	0,270	0,229	0,195	0,156
	LSA	1,57	0,15	0,306	0,285	0,262	0,235	0,203	0,169	0,158
	LM	1,52	0,15	0,338	0,329	0,321	0,273	0,184	0,145	0,114
	LMS	1,58	0,10	0,364	0,354	0,330	0,270	0,212	0,172	0,129
	LS	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LLS	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SA	1,65	0,16	0,294	0,262	0,239	0,201	0,178	0,152	0,136
	SL	1,59	0,13	0,246	0,241	0,201	0,177	0,145	0,113	0,085
	S	1,73	0,13	0,187	0,165	0,110	0,098	0,074	0,056	0,037

\* densité apparente moyenne des horizons et écartis types correspondants

Figure 3: Classes de Pédotransfert de Bruand et al., 2006

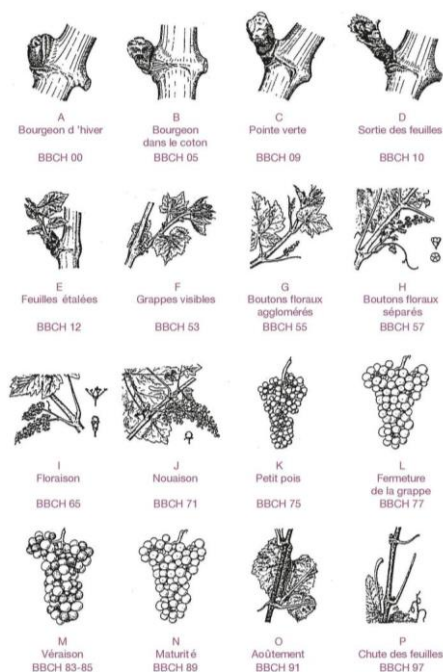


Figure 4: Stades de développement de la vigne (d'après Baggiolini, Ctifl)



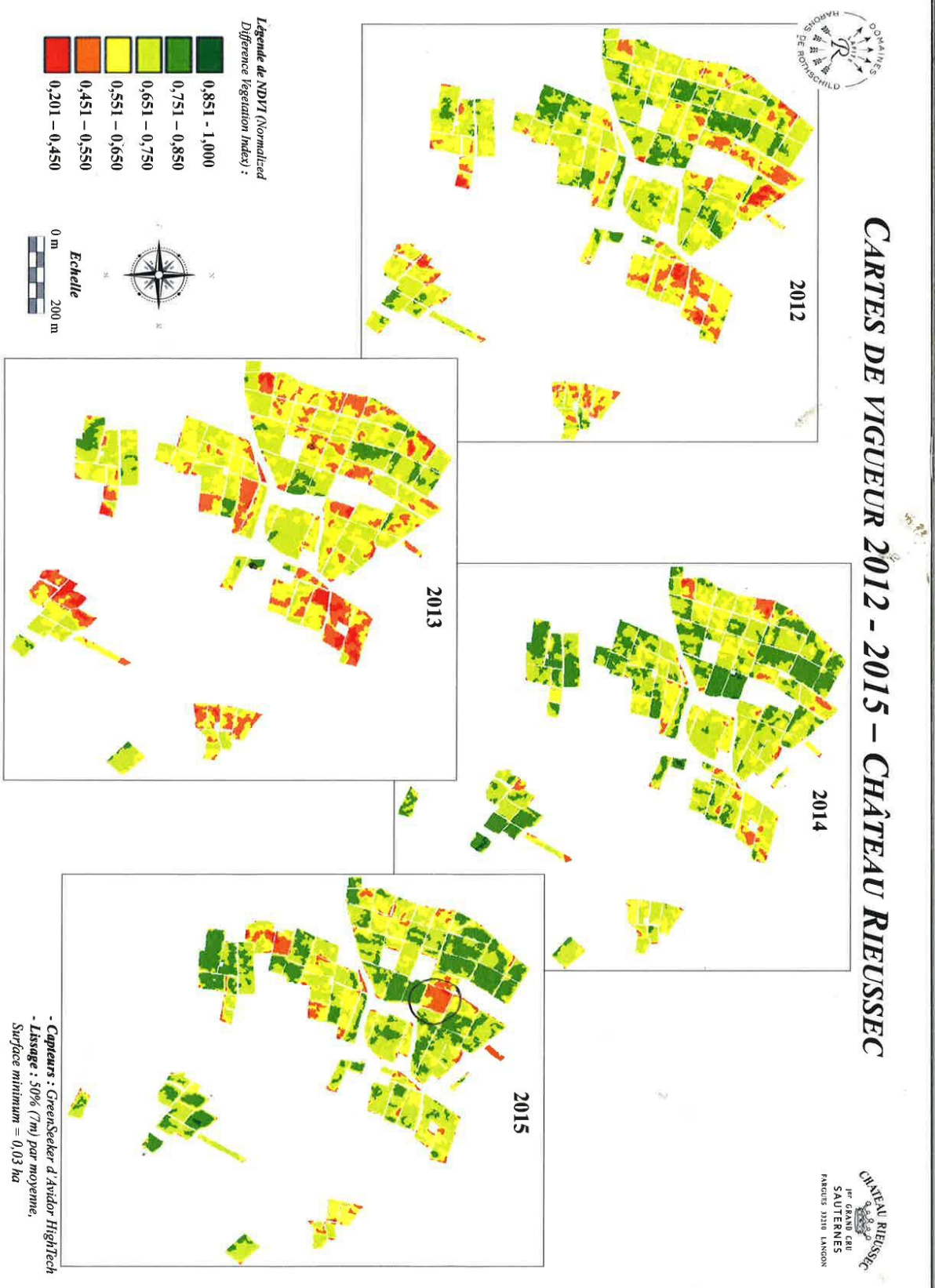


Figure 5: NDVI entre 2012 et 2015 (GreenSeeker)



RS - Etude préalable du zonage d'usage  
Vue parcellaire

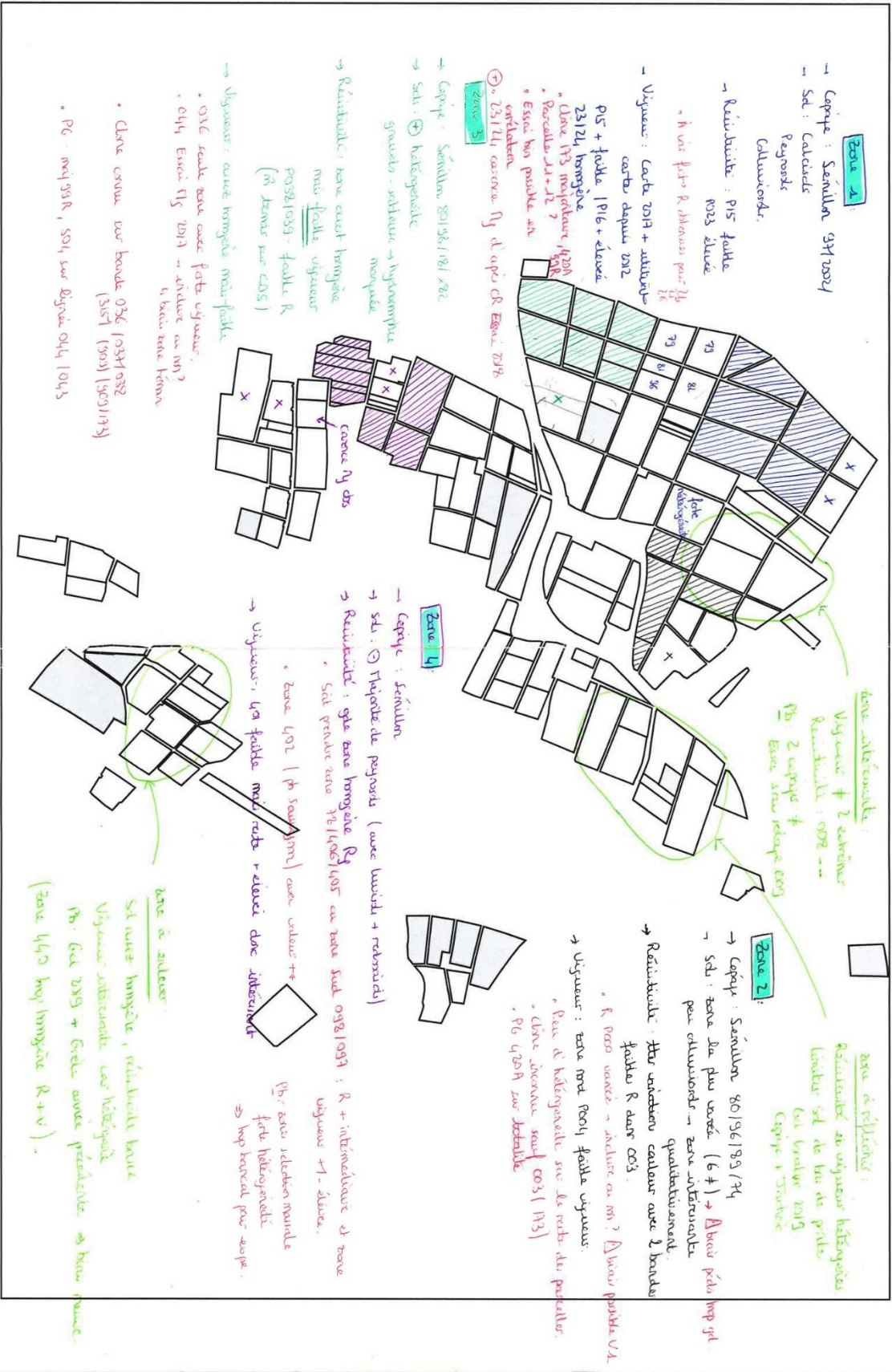


Figure 6: Prospection du parcellaire du Château Rieussec

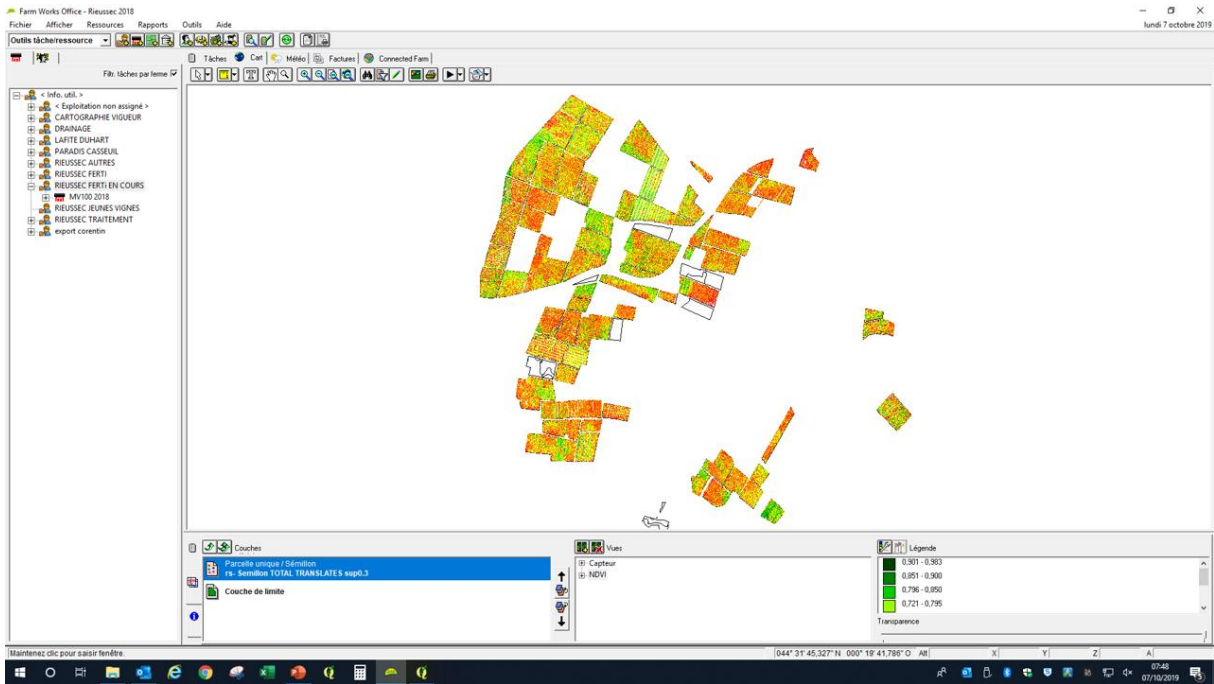


Figure 7: Application Farmworks

DATE : 16 mai - SITUATION = PENTE : /  
 PARCELLE = 406 bis GÉOLOGIE = VÉGÉTATION / CULT :  
 POINT REF. = ASPECT SURFACE =

Ref. Sondage	H <sub>2</sub>	Prof.	Text.	Éléments Grossiers			H%	Couleur	MUNSELL	Ep.	Remarques (O.R., ...)
				%	Dimens	Nat					
P3 25/25	H <sub>1</sub>	0/50	S	10/20			F	BJ (5/4)			
	H <sub>2</sub>	50/80	SG	20/30	PG/G		P3	BJ (5/6)			
	H <sub>3</sub>	70/80	AGS	20/30	PG/G		F	bandée			
P4 = 137	H <sub>1</sub>	0/50	S	10/20				BJ (5/4)			
	H <sub>2</sub>	50/80	S	70/80	G/c			BJ (5/6)			
	H <sub>3</sub>	80/80	AGS	20/30	G/PG			bandée			

(6 cage)

Figure 8: Exemple de deux sondages tarière (Source : M. Christen)

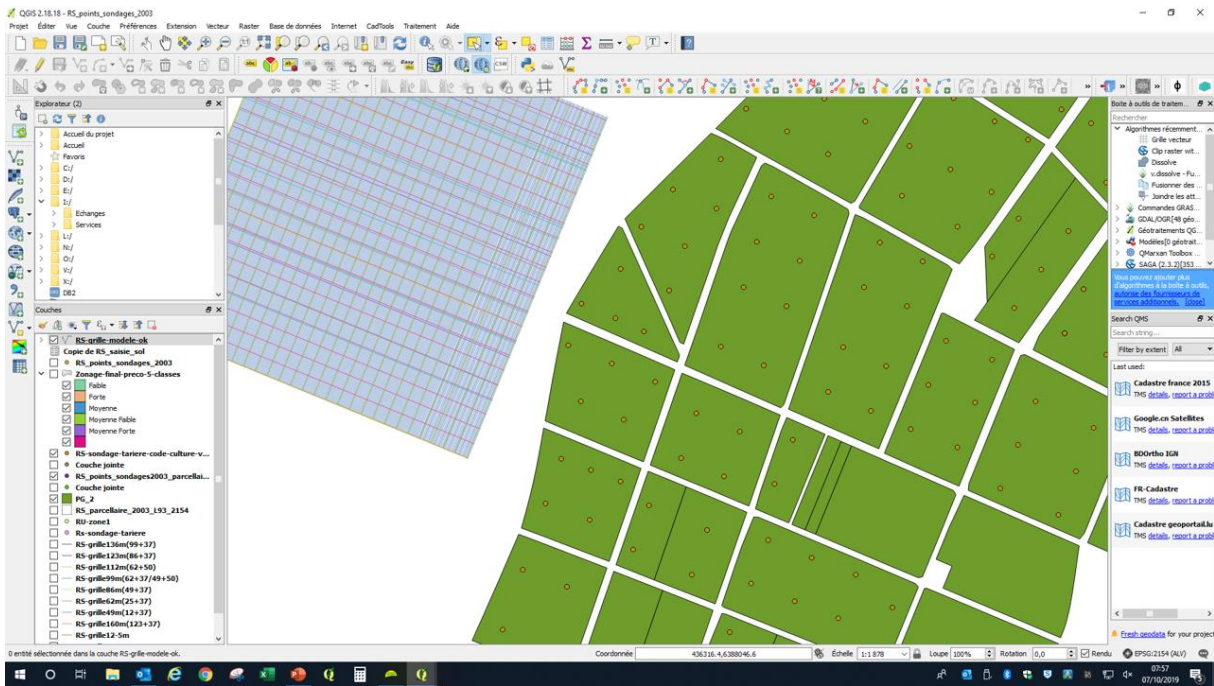


Figure 9: Grille permettant de replacer les sondages tarière sur le logiciel Qgis

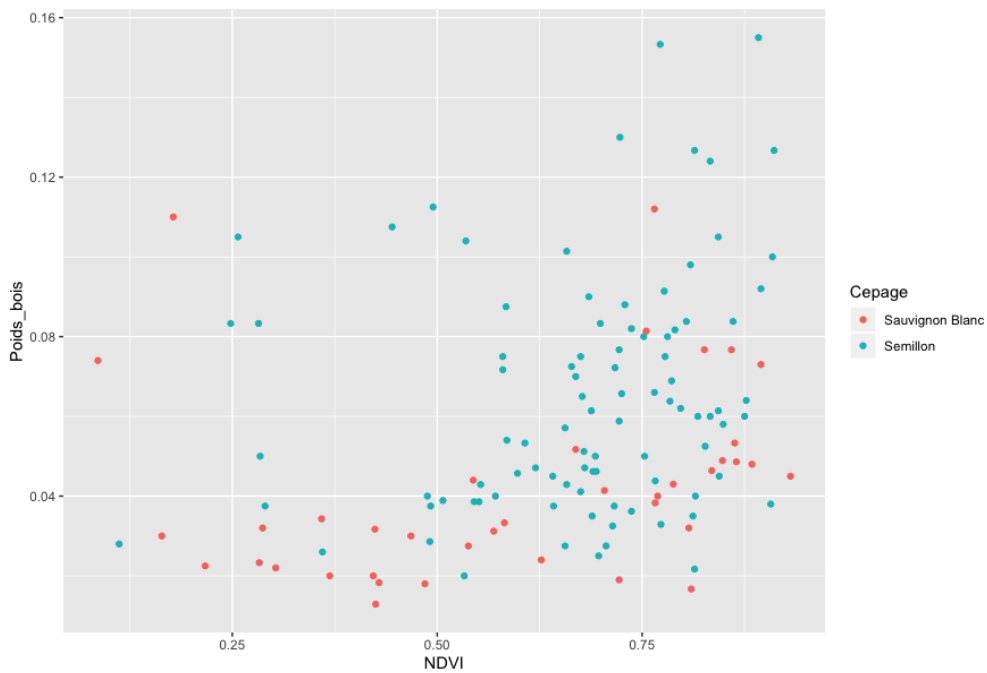


Figure 10: Répartition des poids de bois de taille en fonction du NDVI pour les deux cépages majeurs du parcellaire (Source : Aspexit)



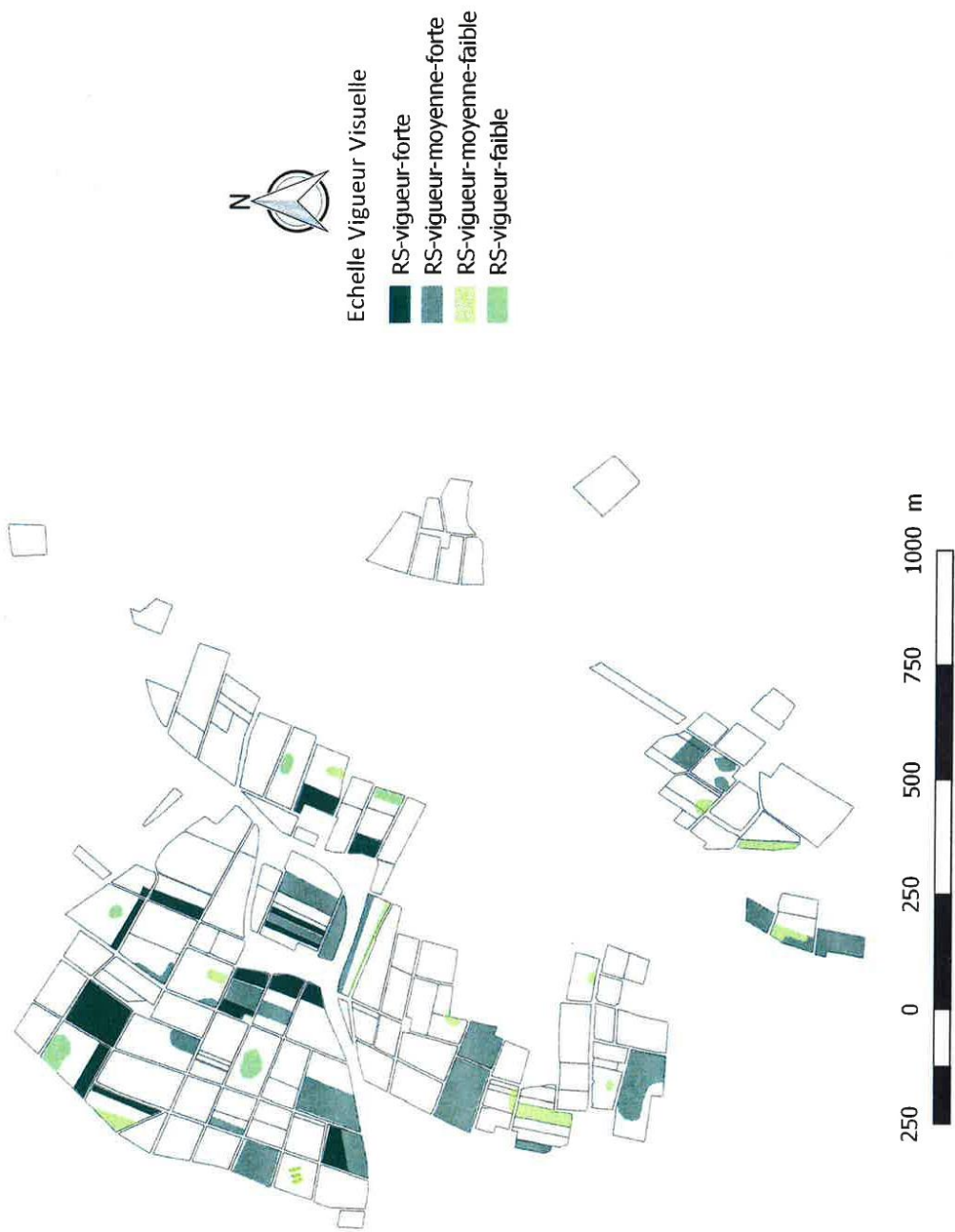


Figure 11: Carte de vigueur visuelle effectuée sur l'ensemble du parcellaire

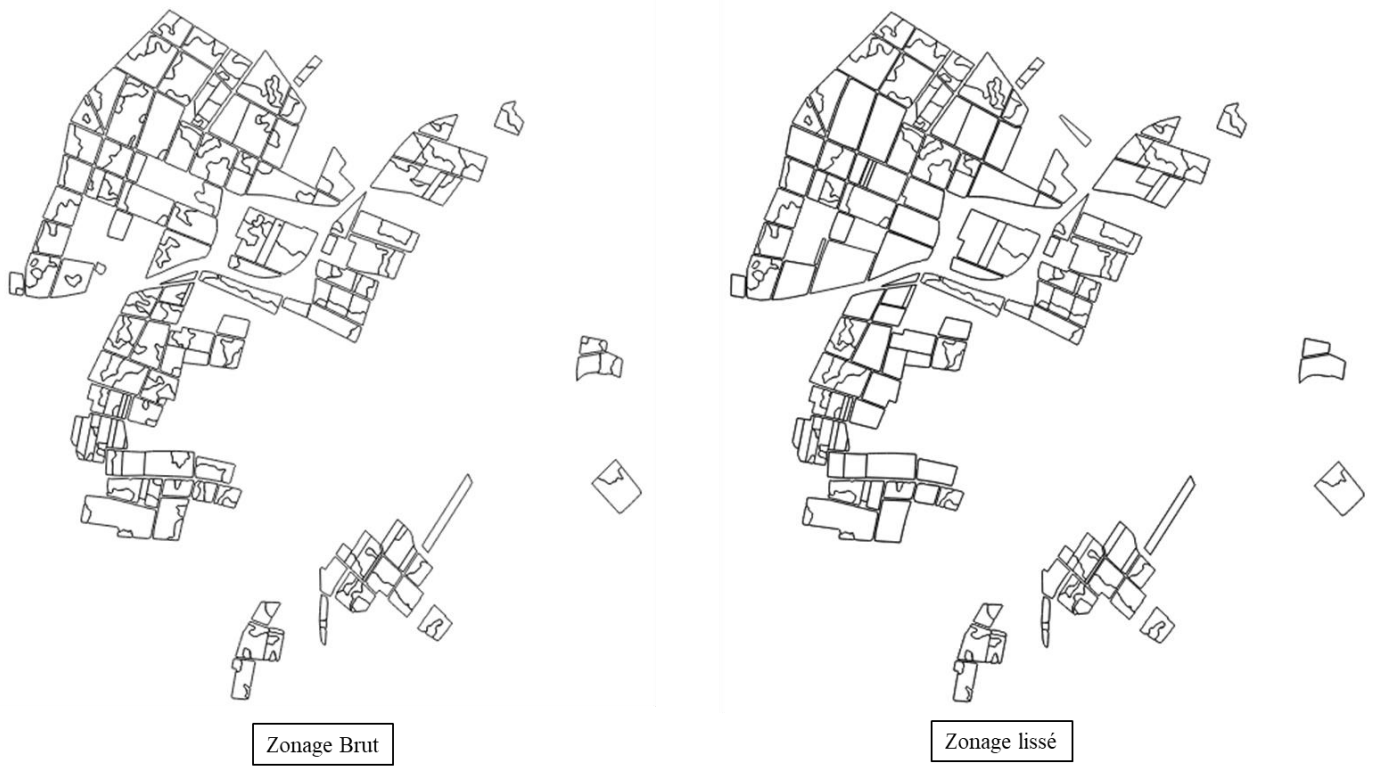


Figure 12: Deux autres niveaux de précision de zonage



Figure 13: Trois zonages après définition des valeurs seuils de NDVI

```
##          Df  Sum Sq Mean Sq F value  Pr(>F)
## y          1 0.100590 0.100590  51.511 3.171e-09 ***
## Residuals 50 0.097639 0.001953
```

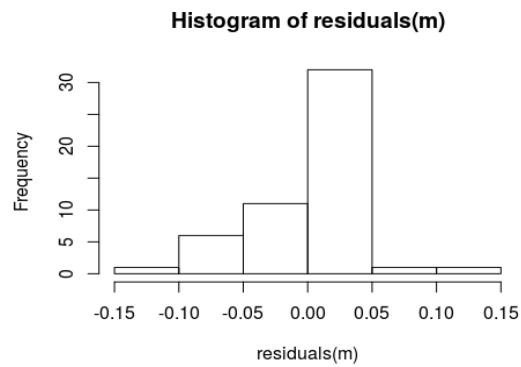


Figure 14: Corrélation significative entre les classes de vigueur visuelle définies et les zones NDVI

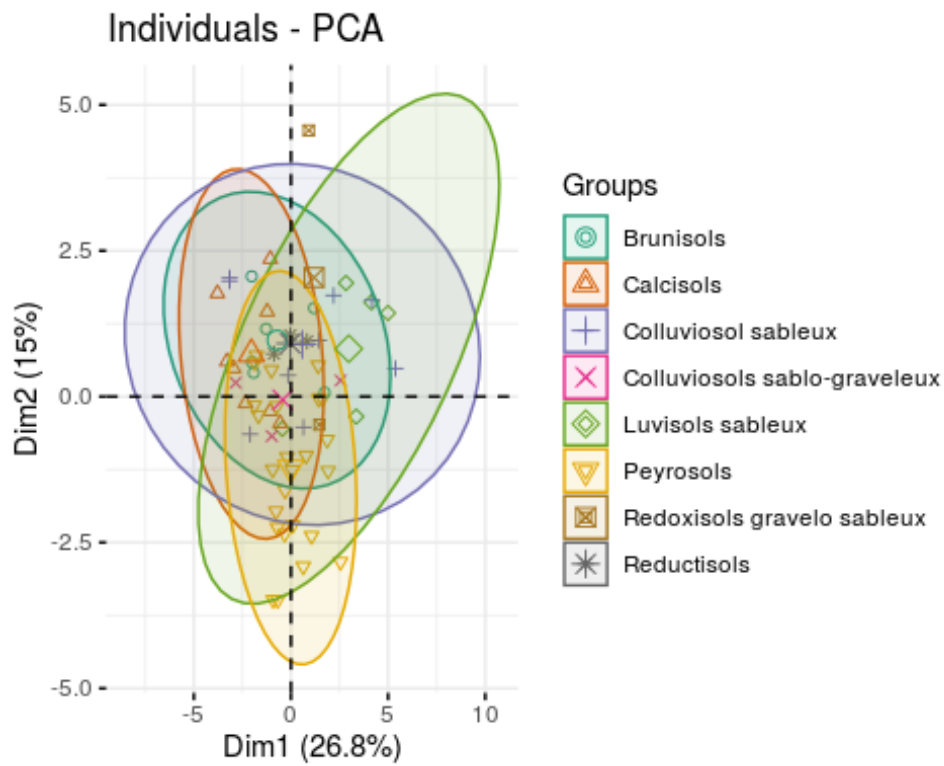


Figure 15: Influence de la variable qualitative "Sol" parmi l'ensemble des variables de l'ACP

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
y	1	1538301	1538301	12.528	0.0007893 ***
Residuals	59	7244572	122789		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
y	1	723796	723796	9.7559	0.00277 **
Residuals	59	4377245	74191		

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
y	1	321393	321393	6.6262	0.01258 *
Residuals	59	2861710	48504		

Figure 16: Significativité des p-value entre les trois voies de résistivité et la vigueur visuelle (résidus vérifié)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
y	1	57.3	57.263	0.245	0.6226
Residuals	56	13088.3	233.720		

Figure 17: Test ANOVA entre le RU 0-100 et la vigueur visuelle

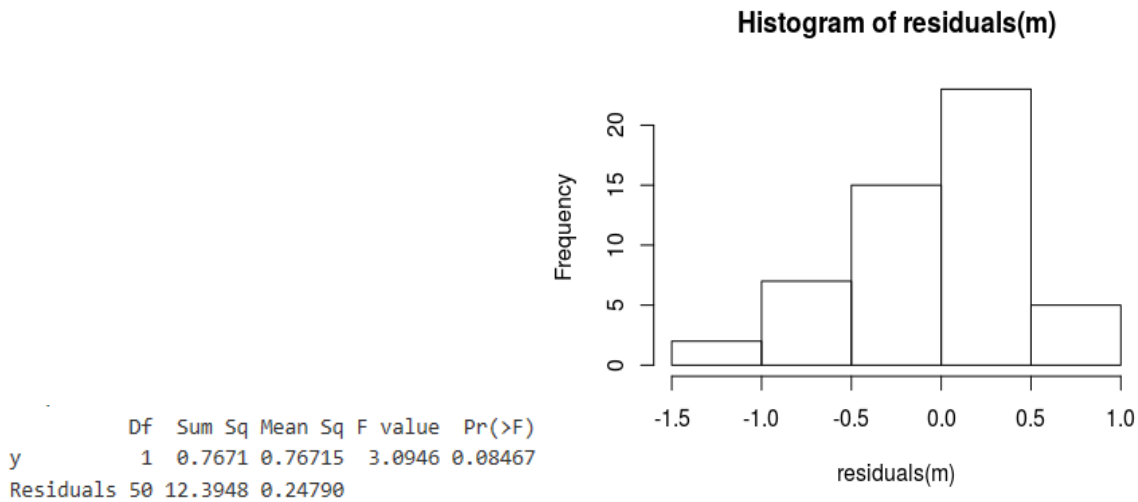


Figure 18: ANOVA et résidus associés entre l'aire sous la courbe des potentiels de tige pour chacune des placettes de mesure et la vigueur visuelle



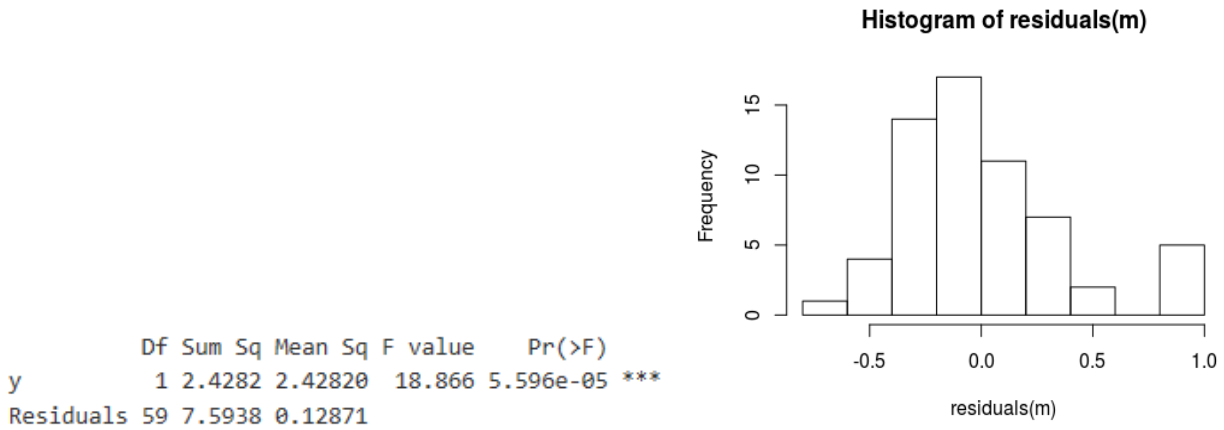


Figure 19: ANOVA entre la matière organique (%) et la vigueur visuelle

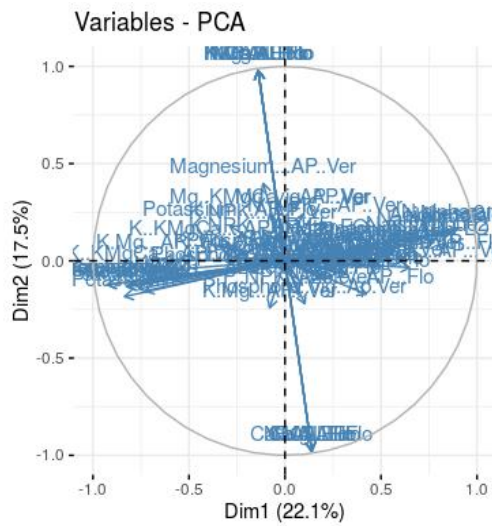


Figure 20: ACP avec les variables propres à l'étude de l'état azoté et minéral

## **Localisation et compréhension des origines d'hétérogénéités intra-parcellaires de vigueur du Château Rieussec**

### **Résumé :**

Depuis plusieurs années des hétérogénéités de vigueur et notamment des excès de vigueur sont observables en intra-parcellaire sur le vignoble du Château Rieussec (appellation Sauternes). Cette étude tentera de localiser ces hétérogénéités de vigueur et d'en comprendre leurs origines à travers l'étude de l'état hydrique, organique, azoté et minéral de la vigne et de son environnement.

Après la présentation du contexte de l'étude et des problématiques soulevées, une partie portant sur les connaissances scientifiques et techniques sur le sujet ainsi que l'ensemble des méthodes utilisées pour répondre à ces interrogations seront décrites.

Ensuite, des indications pour optimiser les piliers de gestion de ces hétérogénéités seront proposées dans le but de favoriser l'homogénéisation de vigueur du vignoble sur le long terme.

**Mots-clés :** Sauternes, Sémillon, Vigueur, Hétérogénéités intra-parcellaires, eau, azote, minéraux, matière organique, carence magnésienne, fertilisation, localisation, origines, millésime

## **Localization and understanding of the origins of intra-compartmental heterogeneity of vigor of Château Rieussec**

### **Abstract :**

For several years vigor heterogeneities and particularly excessive vigor are observable intra-plot on the vineyard of Château Rieussec (Sauternes). This study will try to locate these heterogeneities of vigor and to understand their origins through the study of the hydric, organic, nitrogen and mineral status of the vine and its environment.

After presenting the context of the study and the issues raised, a section on the scientific and technical knowledge on the subject and all the methods used to answer these questions will be described.

Then, indications to optimize the pillars of management of these heterogeneities will be proposed in order to favor the homogenization of vigor of the vineyard in the long term.

**Keywords :** Sauternes, Semillon, Vigor, Intra-compartmental heterogeneity, water, nitrogen, mineral elements, organic matter, magnesium deficiency, fertilization, localization, origins, vintage

