



Facteurs pédoclimatiques et production viti-vinicole contribution à une approche pédofonctionnelle du terroir à Saint-Emilion

Etienne Fayolle

► To cite this version:

Etienne Fayolle. Facteurs pédoclimatiques et production viti-vinicole contribution à une approche pédofonctionnelle du terroir à Saint-Emilion. Science des sols. Montpellier SupAgro, 2019. Français. NNT : 2019NSAM0057 . tel-04106681

HAL Id: tel-04106681

<https://theses.hal.science/tel-04106681>

Submitted on 25 May 2023

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

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

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Sciences du Sol

École doctorale **GAIA** – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
Portée par

UMR LISAH

Facteurs pédoclimatiques et production viti-vinicole : contribution à une approche pédofonctionnelle du terroir à Saint-Emilion

Présentée par Etienne FAYOLLE
Le 20 décembre 2019

Sous la direction de Pr. Stéphane Follain et Pr. François Colin

Devant le jury composé de

Pr. Myriam SCHMUTZ, ENSEGID – Bordeaux INP, Bordeaux
Pr. Edith LE CADRE, Agro Campus Ouest, Rennes
Pr. Brigitte BRUNEL, Montpellier SupAgro, Montpellier
Dr. Sébastien SALVADOR-BLANES, Université François Rabelais, Tours
Dr. Philippe CHÉRY, Bordeaux Sciences Agro, Bordeaux
M. Philippe MARCHAL, Antoine Moueix Propriétés, Saint-Emilion
Pr. Stéphane FOLLAIN, AgroSup Dijon, Dijon
Pr. François COLIN, Montpellier SupAgro, Montpellier

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invité
Invité
Directeur de Thèse
Co-directeur de Thèse



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



FACTEURS PEDOCLIMATIQUES ET PRODUCTION VITI-VINICOLE : CONTRIBUTION A UNE APPROCHE PEDOFONCTIONNELLE DU TERROIR A SAINT-EMILION



Etienne FAYOLLE

Thèse soutenue le 20 décembre 2019 devant le jury composé de :

Pr. Myriam SCHMUTZ, ENSEGID – Bordeaux INP, Bordeaux
Pr. Edith LE CADRE, Agro Campus Ouest, Rennes
Pr. Brigitte BRUNEL, Montpellier SupAgro, Montpellier
Dr. Sébastien SALVADOR-BLANES, Université François Rabelais, Tours
Dr. Philippe CHÉRY, Bordeaux Sciences Agro, Bordeaux
M. Philippe MARCHAL, Antoine Moueix Propriétés, Saint-Emilion
Pr. Stéphane FOLLAIN, AgroSup Dijon, Dijon
Pr. François COLIN, Montpellier SupAgro, Montpellier

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invité
Invité
Directeur de Thèse
Co-directeur de Thèse

Table des matières

Table des matières	3
Liste des tableaux	7
Table des figures	9
Remerciements	15
1 Introduction	19
2 Physiographie des sites d'étude	25
2.1 Les vignobles du Bordelais	25
2.2 Géologie régionale du bassin aquitain	26
2.2.1 Géodynamique aquitaine et pyrénéenne	26
2.2.2 Environnements de dépôt et remplissage sédimentaire du bassin aquitain	26
2.3 Les sites d'étude	30
2.3.1 Le Château Capet-Guillier	31
2.3.2 Château Patache d'Aux	45
3 Caractérisation des sites d'étude	55
3.1 Cartographie pédologique	55
3.1.1 Le terroir et le vin	55
3.1.2 Caractérisations pédologiques	58
3.2 Données météorologiques	62
3.3 Caractérisation de la zone saturée du sol	63
3.4 Cartographie de la résistivité électrique des sols	66
3.4.1 Principe de la mesure	66

3.4.2	Tomographie par résistivité électrique (ERT)	71
3.4.3	Mesures de résistivité apparente par traîné électrique (MUCEP)	74
4	Facteurs environnementaux et qualité du vin	77
4.1	Introduction	77
4.2	Matériel et méthodes	79
4.2.1	Site d'étude	79
4.2.2	Collecte de données	81
4.2.3	Statistiques et analyse des données	85
4.3	Résultats	85
4.3.1	Données et indices climatiques	85
4.3.2	Dynamique de la nappe phréatique	87
4.3.3	Descriptions des sols	87
4.3.4	Estimation de l'eau disponible de la vigne	92
4.3.5	Carte de classement de la qualité du vin	94
4.3.6	De la carte de la qualité du vin aux propriétés du sol	94
4.4	Discussion	101
4.4.1	Disponibilité de l'eau	101
4.4.2	Disponibilité des nutriments	101
4.4.3	Dynamique du sol et de la vigne	103
4.5	Conclusion	105
5	Apport des mesures de résistivité électrique du sol	107
5.1	Introduction	107
5.2	Matériel et méthodes	109
5.2.1	Cartographie pédologique et SFU	109
5.2.2	Acquisition des données de résistivité électrique apparentes : MUCEP	109
5.2.3	Acquisition des données de tomographie	110
5.3	Résultats	111
5.3.1	Données MUCEP	111
5.3.2	Tomographie et sondages électriques	123
5.4	Discussion	128
5.5	Conclusion	131

6	Modélisation du statut hydrique de la vigne	133
6.1	Introduction	133
6.2	Présentation du modèle	135
6.3	Application aux données actuelles	138
6.3.1	Paramètres physiques du sol	138
6.3.2	Paramètres de végétation et de pratiques	141
6.3.3	Prise en compte des écoulements de surface	141
6.3.4	Climat des années 2017 et 2018	143
6.3.5	Résultats des simulations	144
6.4	Application à partir de scénarios climatiques	155
6.4.1	Projections climatiques	155
6.4.2	Résultats	158
6.5	Discussion	162
6.5.1	Sur les forces et faiblesses du modèle BISWAT	162
6.5.2	Sur les résultats de modélisation obtenus	163
6.6	Conclusion	164
7	Conclusion générale	167
A	Carte des sols du Château Patache d’Aux	171
B	Résultats du MUCEP au Château Patache d’Aux	173
	Bibliographie	177

Liste des tableaux

3.1	Liste des analyses physico-chimiques réalisées sur les échantillons avec les unités, incertitudes et normes associées.	59
3.2	Effectifs d'observations et d'échantillons sur le vignoble de Capet Guillier.	60
3.3	Effectifs d'observations et d'échantillons sur le vignoble de Patache d'Aux.	62
3.4	Analyses réalisées au laboratoire des eaux de Limoges, unités et normes associées.	65
4.1	Comparaison des données climatiques de la station de Mérignac entre 1987 et 2017 fournies par MétéoFrance avec les données mesurées en 2017 et 2018 au Château Capet-Guillier.	86
4.2	Classes des indices bioclimatiques pour le dryness index, l'heliothermic index et le cool night index des différentes régions viticoles (Tonietto et Carbonneau, 2004).	86
4.3	Description et description des fosses pédologiques (F1, F2 et F3).	90
4.4	Calcul de l'eau du sol disponible pour la vigne aux emplacements des trois fosses (F1, F2 et F3).	92
4.5	Statistiques descriptives des propriétés du sol pour chaque zone de qualité du vin à deux profondeurs de sol différentes.	97
4.6	Statistiques descriptives des propriétés du sol pour chaque SFU à deux profondeurs de sol différentes.	99
5.1	Statistiques descriptives des données brutes de résistivité électrique apparente des sols de Capet-Guillier.	112
5.2	Statistiques descriptives des résistivités électriques apparentes pour les voies V1, V2 et V3, catégorisées par Unité Cartographique de Sol (UCS).	118
5.3	Paramètres physiques aux points de prélèvement H1 à H8 le long du profil de tomographie.	123
6.1	Typologie des entrées de modèle nécessaires pour exécuter une simulation avec le modèle BISWAT.	137

6.2	Fosses de référence utilisées pour la modélisation avec BISWAT.	138
6.3	Caractéristiques de sol des trois fosses utilisées pour la modélisation avec BISWAT.	138
6.4	Humidités à la capacité au champ (FC) et humidités minimales (minus) en fonction de alpha pour les différentes couches paramétrées dans BISWAT pour F3.	140
6.5	Données météorologiques des années calendaires 2017 et 2018 au Château Capet-Guillier.	144
6.6	Comparaison des moyennes de FTSW entre les différentes modalités et SFUs sur la période entre le 1er Avril et le 31 Octobre 2018.	151
6.7	Premier jour d'apparition de stress ($FTSW < 0,4$) subi par la vigne pour les différentes fosses et modalité entre le 1er Avril et le 31 Octobre 2018. .	153
6.8	Nombre de jours de stress ($FTSW < 0,4$) subi par la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre 2018.	153
6.9	Pourcentage de jours dans la cible de FTSW pour la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre 2018.	154
6.10	Données météorologiques simulées pour les années 2046 à 2050 pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5.	156
6.11	Statistiques descriptives des données météorologiques simulées de 2046 à 2050 pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5.	156
6.12	FTSW moyen de la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5 entre 2047 et 2050.	158
6.13	Nombre de jours de stress ($FTSW < 0,4$) subi par la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre.	160
6.14	Premier jour d'apparition de stress ($FTSW < 0,4$) subi par la vigne pour les différentes fosses et modalité entre le 1er Avril et le 31 Octobre. . . .	160
6.15	Pourcentage de jours dans la cible de FTSW pour la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5 entre 2047 et 2050. . . .	162

Table des figures

1.1	Représentation systémique de la production viti-vinicole selon le mode centré-vigneron.	20
1.2	Alimentation de la vigne (Follain, 2014).	21
1.3	Stratégies de conservation des sol (Follain et al., 2018).	21
2.1	Le bassin d'Aquitaine au Crétacé supérieur (adaptée de Platel et Dubreuilh, 1986).	28
2.2	Le bassin d'Aquitaine au Miocène (adaptée de Platel et Dubreuilh, 1986).	29
2.3	Le bassin d'Aquitaine au Plio-Quaternaire (adaptée de Platel et Dubreuilh, 1986).	30
2.4	Localisation des AOP Médoc et Saint-Emilion grand cru au sein du vignoble de Bordeaux.	32
2.5	Diagramme Ombrométrique moyen pour la période 1987-2017. Relevés de la station Météo France à Mérignac.	33
2.6	Panorama géologique de Saint-Emilion et sa région, d'après la carte géologique de Libourne de Dubreuilh (1995)	34
2.7	Extrait de la carte des sols de Saint-Emilion (Van Leeuwen, 1989). En pointillés noirs : les parcelles du Château Capet-Guillier.	37
2.8	Extrait de la légende de la carte des sols de Saint-Emilion (Van Leeuwen, 1989).	38
2.9	Pyramide des âges (en 2019) du vignoble du Chateau Capet-Guillier.	39
2.10	Carte des parcelles et encépagement du château Capet-Guillier.	40
2.11	Notes de qualité du vin de A (meilleur) à C (moins bon), et les critères de notation utilisés pour la dégustation. Le diagramme indique l'intervalle du score nécessaire à l'obtention de la note finale de qualité.	44
2.12	Frise chronologique des travaux viti-vinicoles d'une année type au Château Capet-Guillier.	46
2.13	Diagramme Ombrométrique moyen pour la période 2005-2018. Relevés de la station Météo France à Pauillac	47

2.14	Extrait de la carte pédologique de Lesparre-Médoc (Wilbert, 1978). Zoom sur Bégadan et les communes alentours. En noir, les parcelles du Château Patache d'Aux.	49
2.15	Extrait du Référentiel Régional Pédologique de la région Nouvelle-Aquitaine (Richer-de-Forges et Arrouays, 2014) avec fond SCAN25-IGN. Zoom sur Bégadan et les communes alentours. En noir, les parcelles du Château Patache d'Aux.	50
2.16	Pyramide des âges (en 2019) du vignoble du Chateau Patache d'Aux. . .	51
2.17	Carte des parcelles du château Patache d'Aux et de leur cépage respectif.	52
3.1	Schéma conceptuel du terroir selon Deloire et al. (2005).	57
3.2	Plan d'échantillonnage de Capet-Guillier.	61
3.3	Plan d'échantillonnage de Patache d'Aux.	62
3.4	Schéma d'un piézomètre équipé.	64
3.5	Localisation des deux piézomètres équipés (en bleu) P1 et P3 au sein du vignoble de Capet-Guillier.	64
3.6	Localisation des trois piézomètres (en bleu) F1, F3 et F4 au sein du vignoble de Patache d'Aux.	65
3.7	Gamme de résistivités des matériaux rencontrés en géophysique (Penz (2012) adapté d'après Palacky (1988)).	68
3.8	Quadrupôles d'électrodes couramment utilisés et leurs facteurs géométriques. British Geological Survey (c) NERC 2013 <i>in</i> Loke et al. (2013)	70
3.9	Schéma d'un système multi-électrode, et une séquence de mesures pour créer une pseudosection 2D. British Geological Survey (c) NERC 2013 <i>in</i> Loke et al. (2013)	72
3.10	Plan de prospection de l'ERT sur les parcelles du Château Capet-Guillier. En pointillés le tracé du profil, et localisation des mesures d'humidité (H1 à H8).	72
3.11	Installation du MUCEP sur le tracteur inter-ligne.	75
4.1	Localisation du site d'étude : Château Capet-Guillier en appellation Saint-Emilion Grand Cru.	80
4.2	(a) Suivi de la nappe phréatique de novembre 2017 à novembre 2018, et précipitations journalières et cumulées ; (b) Niveaux piézométriques de P1 (+12,9 m NGF) et P3 (+16,8 m NGF).	88
4.3	Carte pédologique du Château Capet-Guillier. Localisation des fosses (noir) et des piézomètres (bleu).	88

4.4	Description des trois fosses creusées dans le vignoble du Château Capet-Guillier.	93
4.5	(a) Classement de la qualité du vin de A (meilleur) à C (moins bonne) et notes de dégustation correspondantes de 1 à 5. (1) longueur en bouche, (2) équilibre (acidité et alcool), (3) intensité des tanins, (4) couleur, (5) maturité et souplesse des tanins, (6) complexité aromatique. (b) Classement qualitatif le plus fréquent pour chaque parcelle de vigne de 2012 à 2018. .	95
4.6	Cartes de fréquence des qualités de production des parcelles (A à C) entre 2012 et 2018.	95
4.7	Représentation conceptuelle de l'enracinement de la vigne en position F1-F3 selon la saison et les variations de la nappe phréatique : impact de la zone saturée (SZ) et de la zone partiellement saturée (PSZ).	104
5.1	Carte des unités cartographiques de sol (UCS) au Château Capet-Guillier. Version française de la carte présentée dans le Ch.4.	109
5.2	Carte des unités fonctionnelles de sol (SFU) sur le vignoble de Capet-Guillier. Version française de la carte présentée dans le Ch.4.	110
5.3	Localisation des sondages électriques le long du profil de tomographie. . .	111
5.4	Distribution des valeurs de résistivité électrique apparente des sols de Capet-Guillet : (a) données brutes (b) données brutes filtrées (seuil percentile 98).	112
5.5	Carte de cohérence des mesures de résistivité électrique apparente des sols. Les points rouges renseignent les positions pour lesquelles $V1 > V2 > V3$. . .	113
5.6	Carte de cohérence des mesures de résistivité électrique apparente des sols. Les points rouges renseignent les positions pour lesquelles $V1 > V2$, les points bleus renseignent les positions pour lesquelles $V1 < V2$	114
5.7	Histogramme par voie des valeurs brutes de résistivité apparente mesurées avec le MUCEP à Capet-Guillier.	114
5.8	Cartogramme des mesures de résistivité électrique apparente des sols pour les voies 1, 2 et 3.	116
5.9	Semivariogrammes des valeurs de résistivité électrique apparente des sols pour le secteur de coteau (gauche) et le secteur de plaine (droite) pour chacune des trois voies V1 (haut), V2(milieu) et V3 (bas).	117
5.10	Histogramme des valeurs de résistivité électrique apparente des sols pour les voies V1, V2 et V3, catégorisées par Unité Cartographique de Sol (UCS).120	
5.11	Histogramme et boîte à moustache des valeurs de résistivité électrique des sols, catégorisées par voies et par Unité Fonctionnelle de Sol (SFU). . . .	121
5.12	Résistivité apparente mesurée par la voie 1 en fonction de paramètres physico-chimiques mesurés en laboratoire dans les 50 premiers centimètres de sol.	122

5.13	Analyse en composante principale avec projection des individus (sites d'échantillonnage pédologiques) dans le plan des variables pédologiques et géophysiques. Les individus sont différenciés en fonction de l'Unité Fonctionnelle de Sol (SFU) de rattachement.	122
5.14	Estimation de l'état de saturation en eau des sols pour différentes profondeurs, selon le profil tomographique et topographique de direction Ouest-Est, effectué dans le secteur de plaine.	124
5.15	Profil tomographique.	125
5.16	Saturation en eau estimée en fonction de la résistivité.	126
5.17	Paramètres d'inversion des cinq sondages électriques X1 à X5 réalisés à Capet-Guillier.	127
5.18	Pseudo-section de résistivité apparente réalisée à partir des cinq sondages électriques X1 à X5.	129
6.1	Représentation de l'agrosystème 2D utilisé par BISWAT (Bertrand et al., 2018).	136
6.2	Discretisation des données pédologiques pour la paramétrisation du modèle BISWAT.	140
6.3	Modélisation de l'efficacité d'interception du rayonnement (RIE) au cours de la saison 2018.	141
6.4	Séquences temporelles modélisées pour l'année 2018.	142
6.5	Zonage par la pente des apports par ruissellement sur les parcelles C1 et C2 à Capet-Guillier (les courbes de niveau en arrière-plan sont espacées de 1 m).	143
6.6	Diagrammes ombrothermiques des années 2017 et 2018 à Capet-Guillier .	144
6.7	Evolution de la FTSW de la vigne au cours de l'année 2018 en fonction du paramètre alpha.	145
6.8	Cumuls des drainages simulés pour les différentes fosses et modalités en 2018.	146
6.9	Remontés cumulés des niveau piézométriques des piézomètres P1 (plaine) et P3 (côteau).	147
6.10	Drainage simulé pour F1, F2 et F3 et remonté cumulée du niveau piézométrique de P1 et P3 sur la saison 2018.	148
6.11	Profils d'humidité pour les trois fosses et deux modalités au cours de la simulation sur l'année 2018 avec BISWAT.	150
6.12	Simulation de l'eau disponible pour la vigne (ATSW) pour F1, F2 et F3 au cours de la saison 2018.	151
6.13	FTSW de la vigne pour F1, F2 et F3 en 2018, comparaison des modalités de travail du sol et de tonte.	152

6.14	Variation du FTSW au cours de la saison 2018.	153
6.15	Simulation de la FTSW de la vigne sur l'année 2018 pour les différentes fosses et modalité d'enherbement. En vert, la cible d'itinéraire hydrique optimal visé.	154
6.16	Diagrammes ombrothermiques des années 2046 à 2050 pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5.	157
6.17	Simulation de l'eau disponible pour la vigne (ATSW) pour F1, F2 et F3 pour les projections des années 2047 à 2050 selon les scénarii RCP 4.5 et 8.5.	159
6.18	Variation du FTSW de Novembre 2046 à Novembre 2050 pour les simulations RCP 4.5 et 8.5.	161
6.19	Comparaison des simulations de FTSW de la vignes entre 2047 et 2050 pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5. En vert, la cible d'itinéraire hydrique optimal visé.	161
7.1	Système racinaire d'un pied de vigne au Château Capet-Guillier lors de l'ouverture d'une fosse pédologique dans SFU-1.	168
7.2	Acquisition de la résistivité électrique avec le MUCÉP dans une parcelle de jeunes vignes au Château Capet-Guillier.	168
7.3	Discrétisation des données pédologiques pour la paramétrisation du modèle BISWAT.	170
A.1	Carte pédologique du Château Patache d'Aux, réalisée à l'échelle 1/2 500 ème.	172
B.1	Distribution des valeurs de résistivités apparentes mesurées avec le MUCÉP à Patache d'Aux. Comparaison des données brutes avec les données filtrées au percentile 98.	174
B.2	Cartogramme des résistivités apparentes mesurées avec la Voie 1 du MUCÉP à Patache d'Aux.	174
B.3	Cartogramme des résistivités apparentes mesurées avec la Voie 3 du MUCÉP à Patache d'Aux.	175

Remerciements

Je dois la réalisation et l'aboutissement de ce travail à toutes celles et ceux qui m'ont aidé et ont été présents au cours de ces quatre dernières années. Merci à vous pour votre soutien, votre aide et votre présence à mes côtés.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail :

- Brigitte Brunel, Professeur à Montpellier SupAgro, présidente du jury. Merci de votre bienveillance et de votre aide pour le bon déroulement de la soutenance.
- Myriam Schmutz, Professeur à l'ENSEGID - Bordeaux INP. Merci pour votre disponibilité, vos conseils et le prêt du matériel pour la mise en œuvre des mesures de résistivité électrique. En tant qu'ancien élève de l'ENSEGID, j'ai été heureux de vous compter parmi les membres de ce jury.
- Edith Le Cadre, Professeur à Agro Campus Ouest. Merci pour votre relecture minutieuse et vos remarques constructives sur mon travail.
- Sébastien Salvador-Blanes, Maître de Conférence, Université François Rabelais. Merci pour le temps accordé à mon travail et la pertinence de vos questions.

J'ai forcément une pensée particulière pour mes encadrants de thèse, Stéphane Follain, François Colin et Philippe Chéry.

Stéphane, mon directeur de thèse, merci à toi de m'avoir si souvent épaulé au cours de cette thèse dans les bons moments comme dans les plus difficiles. Tes idées et tes conseils ont toujours été précieux autour d'un *mic*. Réaliser ce projet avec toi a été une excellente expérience tant sur le plan professionnel que personnel. Grâce à toi j'en garderai un très bon souvenir.

François, mon co-directeur de thèse, j'ai apprécié ta bienveillance, ton aide, tes conseils et le recul que tu m'as souvent aidé à prendre sur mon travail au cours de ces années de thèses. Merci d'avoir accepté de faire partie de cette équipe.

Je n'oublie pas mon troisième encadrant : Philippe. Merci à toi d'avoir été présent, tu m'as accueilli au sein de ton équipe et tu m'as accompagné tout au long de cette thèse. Je garderai un excellent souvenir de nos longues discussions. Je suis sûr que tu garderas quelques souvenirs de ces années dans ta banane.

Cette équipe d'encadrants n'est finalement pas banale : un directeur à AgroSup Dijon, l'autre à Montpellier SupAgro et un troisième à Bordeaux Sciences Agro. D'après Stéphane, c'est la première fois que ça arrive. Je n'ai pas vérifié (et je lui fais confiance), mais

ce qui est sûr c'est que j'ai eu de la chance de tomber sur vous trois !

Toute ma gratitude à Antoine Moueix Propriétés, filiale d'AdVini, qui a financé ces travaux à travers le dispositif CIFRE. Merci à Antoine Leccia, directeur d'AdVini, Thibault Delahaye et Jean-Pierre Durand, directeurs d'Antoine Moueix, pour leur soutien à ce projet.

Du côté d'Antoine Moueix, je souhaite remercier Philippe Marchal (compère franc-comtois), Benoit Coq, Christophe Grenier et Lucie Lauilhé pour leur aide, leur gentillesse et leurs explications viticoles et œnologiques. Egalement à l'ensemble des collaborateurs Antoine Moueix que j'ai pu côtoyer : merci de votre accueil.

Merci à toutes les personnes que j'ai côtoyées et qui m'ont aidé et soutenues à Montpellier SupAgro et au laboratoire LISAH. Un grand merci particulièrement à Mylène, toujours prête à aider et à remonter le moral autour d'un café ! Merci à Armand, Rossano, Nicolas et François G. pour leur soutien et leur aide à chacune de mes venues à Montpellier.

Egalement, je n'oublie pas Christèle Cornier, au pôle partenariat de SupAgro qui a grandement contribué à la mise en route et au bon déroulement de cette thèse CIFRE.

Un très grand merci à tous ceux qui ont participé aux phases de terrain. Sans eux, relever toutes ces données n'aurait pas été possible. Merci aux GEMEs promo 2016 et leurs encadrants (Stéphane, François C., Armand) pour leur aide au Château Patache d'Aux. Merci également à *Mooossieur* François Garnier pour ses exploits à la foreuse pour ce terrain et celui à Capet-Guillier en juin 2017.

Merci à Arthur Gaillot pour son aide et les bons moments passés ensemble au cours de son stage de césure à Bégadan. Je te souhaite le meilleur pour ta thèse à Tours.

Merci à Matthias Moinet, Atouman Ly et Sandy pour leurs contributions aux prospections pédologiques sur le vignoble du Château Capet-Guillier. Merci beaucoup également à Pierre Curmi pour son aide et ses conseils lors d'une semaine de terrain à Capet.

Toute ma gratitude à Myriam Schmutz, qui a eu la générosité et la gentillesse de me prêter le matériel et de me former à l'utilisation de l'ERT. Un grand merci également à l'équipe Sol de BSA qui s'est rendue disponible pour m'aider à réaliser ces mesures dans un temps record !

Merci à Laura Farris, du département Vigne à Bordeaux Sciences Agro, pour son aide et sa gentillesse sur les analyses de baies.

Enfin un très très grand merci à l'équipe du bâtiment Médoc à Bordeaux Sciences Agro pour votre accueil. Quelle que soit la situation, j'ai toujours pu compter sur votre aide et votre bonne humeur.

Stéphanie, toujours là quand on a besoin de toi, ta porte m'est toujours restée ouverte. Que ce soit en organisant des TD ou sur le RMQS, tu sais motiver les troupes et garder le sourire. Merci pour ton amitié *guapa* !

Alexandre L., combien de fois je suis venu frapper à ta porte en t'expliquant ce que je cherchais à faire et que tu me répondais : "mais pourquoi tu veux faire ça ???", avant de partir dans une discussion qui n'en finissait pas sur les SIG&co. Merci également pour ton sens de l'humour et tes jeux de mots de haut vol !

Mon cher collègue de bureau Lionel, *Yoyo les bons tuyaux!* Merci pour ta patience, car tu m'as supporté à côté de toi pendant plus de deux années à pester quand Word plantait, ou à te poser des questions en géochimie ou autre. J'ai apprécié partager le bureau avec toi.

Guillaume, durant ces années à BSA, tu as toujours été présent si j'avais besoin de parler ou d'échanger sur des idées, même si ces discussions étaient éloignées de ton domaine de recherche. Tu étais également toujours partant pour une partie de tarot entre midi et deux, même si au bout de presque quatre ans tu ne sais toujours pas jouer.

Murielle D., ta bonne mine et ta joie quotidienne ont ensoleillé mes repas à tes côtés pendant ces dernières années. Tu as toujours porté une oreille attentive au bon déroulement de ma thèse. Un grand merci pour ton soutien!

Alexandre C., merci pour ces échanges et ton aide régulière sur R (entre autres). J'ai bon espoir que tu arrives à faire un barplot avec *ggplot* avant la fin de ta thèse! Plus sérieusement, je te souhaite le meilleur pour la suite de tes travaux.

Je n'oublie pas les Thomas : ThoC, ThoG et ThoP. Le grand Thomas C., le roi des bluffeurs, toujours partant pour une garde contre! Thomas P. le *Caliméro* du tarot, et Thomas G. qu'on pourrait qualifier de Wikipédiaman. Merci les gars pour votre présence et vos coups de main au cours de ces années.

Enfin merci à tout le reste de l'équipe du bâtiment Médoc : Annie, Sandrine, Ludivine, Justine, Murielle C, Pascale et tous les autres pour tous ces bons moments passés ensemble qui ont contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Une pensée forte pour tous les membres de ma famille.

A mes parents, Isabelle et Jean, qui m'ont toujours soutenu dans mes études. Vous m'avez sans cesse poussé pour ne pas abandonner, garder courage et aller plus loin.

Ma soeur, Hélène, et mes deux frères, Pierre et Olivier, qui m'ont supporté (dans tous les sens du terme) et soutenu au cours de mes études et de ces dernières années de thèse.

Max, merci pour le temps que vous m'avez très souvent accordé pour échanger et pour me former à R et aux derniers meilleurs packages sortis. Catherine, merci pour votre indéfectible soutien.

Marine, merci pour ton aide (surtout l'inhalateur boostant pour les derniers jours avant la soutenance!), tes blagues et ton hébergement de très haute qualité! Je te souhaite bon courage et le meilleur pour la suite de ta thèse.

Enfin Mélanie, sans toi non seulement cette thèse n'aurait pas abouti, mais elle n'aurait pas commencé. Merci pour ton soutien sans faille.

Chapitre 1

Introduction

Le sol est une ressource rare, finie, à l'échelle mondiale. Protéger cette ressource est essentiel au maintien de nos sociétés et constitue un enjeu majeur de ces prochaines décennies (IPCC Special Report on Climate Change and Land, 2019). Il est donc important d'amorcer la transition vers des modes d'exploitation qui soient à la fois performants sur le plan de la production et conservatoires vis-à-vis de la ressource (Sustainable Development Goals).

Relever ce défi de l'adaptabilité de nos systèmes de production nécessite de comprendre les mécanismes et les facteurs responsables de l'évolution de ces ressources au cours du temps. L'adaptation de nos systèmes de production devra aussi tenir compte des projections en termes de changements climatiques et socio-économiques. En effet, ces changements seront le moteur d'une mutation profonde des espaces agricoles dans les décennies à venir. Notons que la communauté internationale est aujourd'hui unanime sur le fait que les dégradations occasionnées par des évolutions non raisonnées des pratiques agricoles et des changements de la structuration des paysages agricoles seront beaucoup plus importantes que celles liées directement à une évolution du climat. Néanmoins, la volonté de conserver les ressources doit faire face à de nombreux défis qu'il est crucial de relever. Premièrement, nous devons admettre qu'il existe aujourd'hui un manque de connaissance sur les sols et de transfert de ces connaissances vers la société civile. Par ailleurs, la connaissance pour être utile doit être capitalisée via des outils et méthodes d'aide à la décision qui permettront à terme d'imaginer les bonnes stratégies adaptatives face aux différents changements.

Comme les autres productions, la production viti-vinicole, doit relever le défi de l'adaptabilité. Au-delà du maintien des rendements souvent présenté dans d'autres types de production, la dimension la plus importante et identitaire est certainement celle d'une conservation de la qualité des sols qui puisse garantir le niveau de qualité attendu pour les baies, même pour des conditions changeantes. Là, nous posons l'hypothèse que la connaissance induisant la maîtrise de la qualité des sols est un élément nécessaire pour produire une baie de qualité et que dans un second temps cette qualité de baie est un fait important pour produire de grands vins.

Dans notre représentation du système de production (Figure 1.1), le vigneron est l'acteur principal de l'adaptabilité. Ce système évolue sous l'effet des interactions multiples dont les interactions vigneron-vignoble et de forçages externes (climat, contexte) qui s'exercent

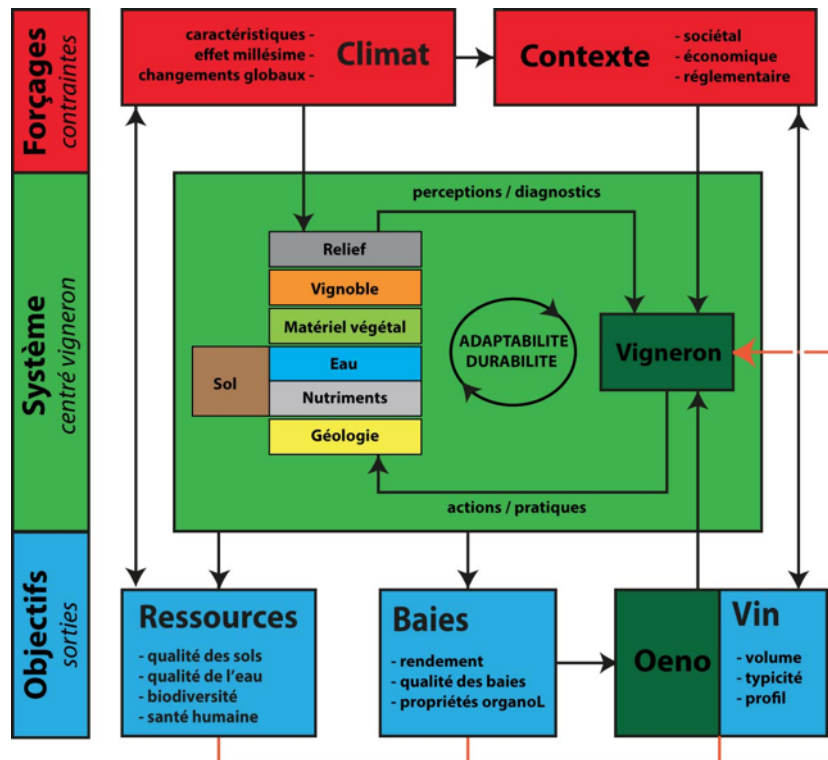


FIGURE 1.1 – Représentation systémique de la production viti-vinicole selon le mode centré-vigneron.

sur lui. De manière fonctionnelle, en relation au potentiel local de production (dimension terroir) et des éléments de contexte, le vigneron se fixe des objectifs de production (rendement et qualité). Objectifs auxquels s'ajoutent désormais des objectifs en termes de protection des ressources et des populations humaines. Sur le temps de l'année, cela se traduit par une observation et évaluation continue des conditions au vignoble, conditions variant sous l'effet des variations climatiques. L'enjeu pour le vigneron est donc d'adopter les pratiques les plus appropriées et parfois de faire des compromis entre ressource et production.

Même si perfectible, ce système fonctionne tant que le vigneron dispose des éléments de connaissance pour le guider dans sa prise de décision, ce qui est le cas pour des conditions de climat et de contexte stationnaires. Pourtant, nous savons que les prochaines décades seront affectées par des changements sensibles, des conditions inédites. Nous pensons qu'il est primordial de conduire, dès à présent, des travaux afin de produire, pour les vignerons, les éléments de l'adaptabilité future.

Dans ce travail de doctorat, les éléments critiques de l'adaptabilité sont l'alimentation hydrique et minérale de la vigne (Figure 1.2). C'est pourquoi nous avons centré nos efforts sur l'analyse des relations sol-eau car un élément fort de l'adaptabilité des systèmes résidera en la capacité à comprendre les facteurs des différents compartiments jouant sur l'alimentation hydrique ou minérale de la vigne (Figure 1.3).

L'objectif de notre travail était d'identifier les relations entre disponibilités des ressources en sol et en eau et les facteurs de qualité de la production viti-vinicole. Puis ces éléments

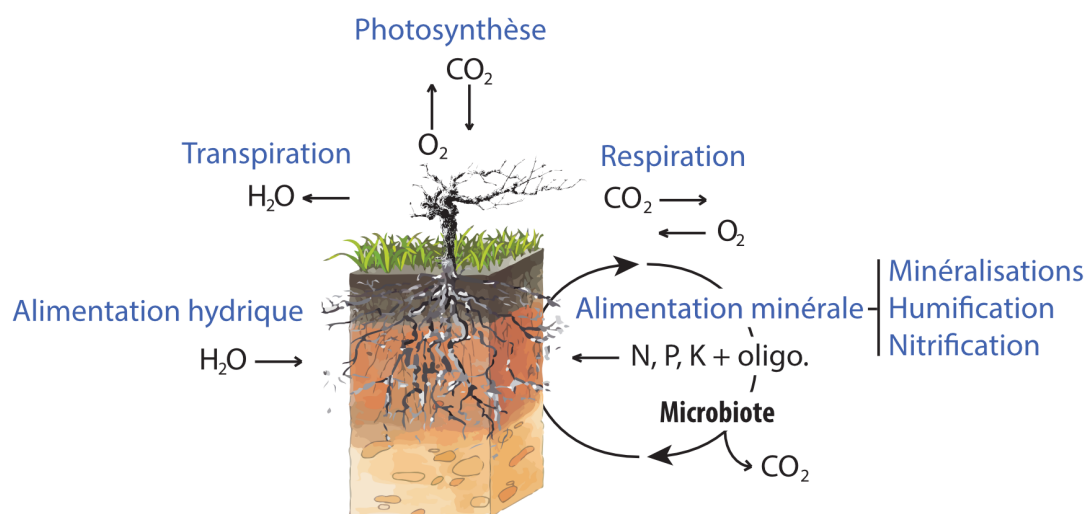


FIGURE 1.2 – Alimentation de la vigne (Follain, 2014).

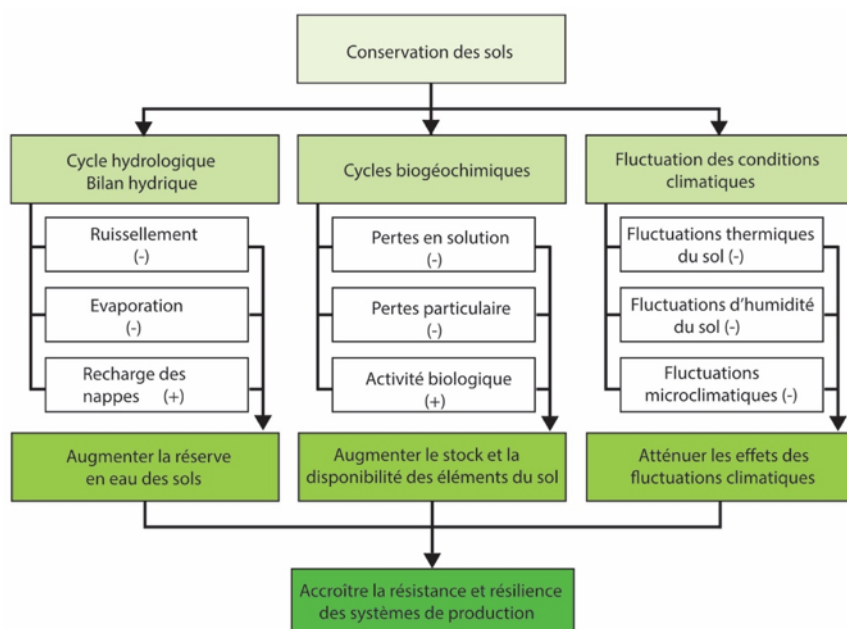


FIGURE 1.3 – Stratégies de conservation des sol (Follain et al., 2018).

étant connus, de proposer une analyse prospective de l'évolution future des facteurs prépondérants et de discuter des conséquences associées sur la qualité de la production.

Ce mémoire est structuré en 7 chapitres :

Le chapitre 1 — Introduction.

Le chapitre 2 – Physiographie des sites d'étude, propose une description des deux sites d'étude (Capet Guillet et Patache d'Aux), investigués pendant la thèse. Pour ces deux sites, les éléments de contexte sur le milieu de la production viticole sont exposés. Dans la suite du mémoire, seul le site de Capet-Guillet sera considéré, les données de Patache d'Aux étant livrées en annexes. Ce choix est lié à la stratégie de thèse sous convention CIFRE dans laquelle Capet-Guillet (plus richement documenté et de faible superficie) a été l'objet de prospections plus denses. En ce sens, il représentait dans cette thèse un réel site d'expérimentation et de recherche. Le site dit de Patache d'Aux, moins documenté, plus étendu spatialement et plus représentatif d'une réalité professionnelle a été considéré comme un site test afin d'évaluer si les méthodologies développées sur Capet-Guillet étaient transposables.

Le chapitre 3 – Caractérisation du milieu de la production, expose l'ensemble des outils et stratégies d'observation utilisés durant le Doctorat afin de caractériser le milieu de la production. Ce chapitre à forte dimension méthodologique ne présente pas de résultats, qui sont présentés dans les chapitres 3, 4 et 5. Une attention particulière est accordée aux outils et méthodes de caractérisation des eaux et des sols.

Le chapitre 4 – Identification des facteurs environnementaux qui contrôlent la qualité des vins, détaille une analyse des variables présentées dans le chapitre 2. L'objectif de ce travail était l'identification des facteurs environnementaux prépondérants, explicatifs de la qualité des vins, cas d'étude mené au Château Capet-Guillier (AOC Saint-Emilion grand cru). Ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans la revue Science of the Total Environment (IF = 5,6). Aussi, certaines des parties de ce chapitre sont redondantes avec d'autres sections rédigées de ce mémoire.

Le chapitre 5 – Apport de la géophysique de subsurface à la connaissance de la disponibilité des ressources – présente et discute les résultats d'une campagne de mesure de la conductivité électrique apparente des sols, menée suite à la cartographie pédologique. Souvent la géophysique est utilisée pour spatialiser une information pédologique peu dense ou orienter (stratifier) un échantillonnage pédologique. Là, l'information pédologique a été acquise en indépendance de l'information géophysique. Cette dernière est donc abordée comme une co-variable en capacité à valider le cartogramme pédologique et à renseigner de la variabilité conjointe des ressources en sol et en eau.

Le chapitre 6 – Modélisation du statut hydrique de la vigne – livre les premiers résultats d'une démarche de modélisation numérique visant à estimer la disponibilité en eau pour la vigne. Cette démarche originale qui met à profit le modèle BISWAT (Bertrand et al., 2018) ne propose pas une réelle modélisation spatialisée, plutôt une modélisation multi-locale dans laquelle la sensibilité aux paramètres hydro-pédologiques est analysée. Après la présentation de la phase de modélisation rétrospective sur l'année 2018, ce chapitre ouvre sur une démarche de modélisation prospective visant à simuler

l'évolution de la disponibilité en eau selon différents scénarii climatiques.

Le chapitre 7 – Discussion générale – reprend de manière synthétique l'ensemble des éléments et résultats prépondérants de la thèse. La discussion est centrée sur la notion d'adaptabilité des systèmes viti-vinicoles et la dépendance de cette adaptabilité à la production de connaissance. Cette discussion se nourrit des éléments de transposition entre le site de Capet-Guillet et celui de Patache d'Aux.

Ces travaux de thèse ont été réalisés sur deux domaines viticoles appartenant à la maison de vin Antoine Moueix, filiale bordelaise de AdVini SA, sous forme d'une collaboration de type CIFRE. Ces travaux s'inscrivent pour Antoine Moueix Propriétés dans une dynamique de restructuration des vignobles suite à l'acquisition des châteaux Capet-Guillier et Patache d'Aux.

Ces deux domaines viticoles sur lesquels ces travaux ont été réalisés sont des exploitations qui produisent du vin dans un but commercial. A notre connaissance, elles n'ont jamais fait l'objet de recherches scientifiques. De ce fait, la quantité de connaissances et de mesures réalisées sur les sols de ces vignobles sont relativement faibles. C'est pourquoi un effort intense de documentation et de prospection des sites d'étude a été nécessaire au démarrage de ces travaux.

Chapitre 2

Physiographie des sites d'étude

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le Sud-Ouest de la France dans la région viticole du Bordelais en Gironde, Nouvelle Aquitaine. Dans ce chapitre, nous repositionnons les vignobles de Bordeaux dans le contexte viticole français. Par la suite, nous présentons les conditions du milieu de la production et accordons une importance particulière à l'histoire géologique du Bassin aquitain. Dimension géologique qui permet de mieux comprendre les caractéristiques actuelles et la structuration de paysages viticoles régionaux (relief, sol, hydrologie). Enfin, pour chaque site d'étude, nous présentons l'aire d'appellation, le climat de la zone, le contexte géologique, géomorphologique et pédologique local, les pratiques viticoles suivies ainsi que l'itinéraire de vinification.

2.1 Les vignobles du Bordelais

Les vignobles de Bordeaux sont situés dans le département de la Gironde qui compte 114 356 ha de vignes en production pour l'année 2017 (Agreste Aquitaine, 2014, 2018). Ainsi, la Gironde représente plus de la moitié de la surface viticole de la Nouvelle Aquitaine et 15% de la surface viticole française. La production viticole en AOP en Gironde représente 3 855 322 hL soit 98,3% du volume total produit en 2017 pour le département. La production est dominée par les vins rouges qui représentent plus de 84% du volume produit en 2017. Minoritaires, les vins blancs (dont les vins liquoreux) représentent 9% et les rosés 4% du volume total du département (Agreste Aquitaine, 2018).

Les principaux cépages noirs plantés en Gironde sont par ordre d'importance : le Merlot N (66%), le Cabernet-sauvignon N (22,5%) et le Cabernet franc N (9,5%). Parmi les cépages blancs, le Sémillon B (47%) est principalement utilisé pour les vins blancs liquoreux, le Sauvignon B (45%) est quant à lui majoritaire pour les vins blancs secs (Chiffres d'après <https://www.bordeaux.com/fr/Notre-Terroir/Cepages>, consultés le 30/04/19).

Dans le Bordelais, comme dans le reste de la France depuis la crise du Phylloxera en 1863, les vignes (*Vitis Vinifera*) sont principalement greffées sur des plants américains (*Vitis Rupestris*, *Vitis Riparia*, *Vitis Berlandieri*, etc.) résistant à la piqure du puceron. Il existe des dizaines de porte-greffes autorisés en France, issus de nombreux croisements entre les différentes espèces de vignes. Le viticulteur peut choisir en fonction des caractéristiques de

sol (pH, calcaire, etc.), des conditions climatiques, pour sa résistance aux parasites, pour sa résistance aux excès ou aux déficits hydrique. Le porte-greffe a également un impact sur la vigueur de la vigne et le volume produit, c'est pourquoi il doit également être choisi en fonction du type de production recherchée. Les porte-greffes les plus fréquemment utilisés en Aquitaine sont : Riparia Gloire de Montpellier (RGM), 3309 Couderc (3309 C), 161-49 Couderc (161-49 C), 420 A Millardet de Grasset (420 A) , 101-14 Millardet de Grasset (101-14 MGt), 41 B Millardet de Grasset (41 B), 110 Richter (110 R), Sélection Oppenheim n°4 (SO4), Kober 5 BB (5 BB), Fercal et Gravesac.

2.2 Géologie régionale du bassin aquitain

L'Aquitaine est un bassin sédimentaire qui a servi de réceptacle aux sédiments provenant de l'érosion des massifs environnants : au Sud, les Pyrénées, et à l'Est la Montagne Noire et le Massif central. La subsidence rencontrée dans cette région lui a permis d'être une zone de sédimentation importante pendant des millions d'années au Mésozoïque et au Cénozoïque (Brunet, 1984, ; Platel and Dubreuilh, 1986).

2.2.1 Géodynamique aquitaine et pyrénéenne

L'histoire géologique du bassin aquitain est très fortement liée à l'histoire de la chaîne pyrénéenne qui s'est déroulée en deux phases. La première est une phase de divergence, nommée rifting, entre la plaque européenne et la plaque ibérique qui démarre au Trias. Le socle du bassin est alors constitué par les vestiges de la chaîne hercynienne qui commence à s'effondrer et forme des grabens. La divergence, démarrée au Trias jusqu'au Crétacé, provoque un amincissement de la croûte continentale puis la création d'un bassin intracontinental selon un axe quasiment Est-Ouest. Au Crétacé supérieur la dynamique s'inverse et les plaques entrent en compression. Les failles normales formées lors de la divergence rejouent et s'inversent en chevauchements (Puigdefàbregas et al., 1992 ; Seguret, 1972). L'orogénèse pyrénéenne démarre à l'Est du bassin par un jeu de rotation antihoraire de la plaque ibérique qui accompagne l'ouverture du Golfe de Gascogne. Puis la rotation s'inverse, la compression et les chevauchements associés progressent d'Est en Ouest provoquant la fermeture progressive du bassin intracontinental. La collision accélère et devient frontale à l'Eocène, elle va durer jusqu'au Miocène inférieur.

2.2.2 Environnements de dépôt et remplissage sédimentaire du bassin aquitain

Au début du Trias, les failles normales qui apparaissent dans le socle hercynien forment des fossés d'effondrement dans lesquels se déposent des sédiments continentaux composés de grès bigarrés et d'argile, sédiments qui deviennent évaporitiques à la fin du Trias.

Au Jurassique inférieur, la mer envahit progressivement le continent. La mer recouvre alors largement le bassin d'Aquitaine (Delfaud, 1970, 1971) ouvrant la mer Thétys, située à l'Est sur l'océan atlantique (Dercourt et al., 1993, 2000). Durant le reste du Jurassique,

l'effondrement du socle continue. Le centre du bassin laisse place à une mer relativement profonde où se déposent des sédiments marno-calcaires à céphalopodes (Hantzpergue, 1979). Sur la bordure Est du bassin, la mer est peu profonde. Le climat tropical permet le développement de récifs coralliens et de lagons. La fin du Jurassique est marquée par le démarrage d'une phase régressive qui va se poursuivre au Crétacé.

Le Crétacé inférieur est marqué par l'ouverture du Golfe de Gascogne et le recul général des mers sur le bassin aquitain. Cette régression générale conduit au confinement de plus petits bassins formés préalablement au Jurassique. Cette évolution aboutit à l'émersion complète du Bassin aquitain après le début du Crétacé inférieur avec la mise en place de dépôts sablo-argileux. Puis une phase transgressive redémarre et s'intensifie au Crétacé inférieur avec une sédimentation marine de plus en plus profonde. Une partie des calcaires jurassiques restent cependant émergés et sont soumis à une intense érosion et karstification.

Au Crétacé supérieur, on observe une remontée du niveau marin à l'échelle mondiale qui provoque une transgression générale à l'échelle du bassin. Au Nord et à l'Est, dans ces environnements peu profonds se déposent des formations de calcaires crayeux à silex. Au niveau des zones plus côtières, on retrouve des lagons et des récifs à rudistes (Figure 2.1). Plus au Sud, les apports en provenance du Massif central forment des sédiments sablo-argileux marins. Dans la partie Sud à Sud-Ouest du bassin, la subsidence s'accroît provoquant l'approfondissement de deux sous-bassins séparés, siège d'une sédimentation profonde de type flysch à dominante argileuse.

A la fin du Crétacé supérieur débute une régression générale provoquant un retrait progressif de la mer en Aquitaine qui va se poursuivre durant le Tertiaire. La partie Nord du bassin émerge (Dubreuilh, 1987) et la partie Sud reste dans un domaine marin où l'on retrouve une sédimentation carbonatée à tendance récifale (Serrano et al., 2001). L'Éocène est marqué par la surrection pyrénéenne qui va impacter l'ensemble de la plateforme aquitaine à travers les plissements induits par la compression. Les environnements marins profonds sont limités au triangle landais, et à l'Est les sédiments se déposent dans une vasière carbonatée peu profonde. La formation des Pyrénées et l'érosion associée à ce relief provoquent une importante augmentation d'apports détritiques continentaux sur toutes les bordures du bassin.

A l'Oligocène, le comblement du bassin se poursuit avec la fermeture du sillon de flysch pyrénéen. La mer est toujours présente à l'Ouest du bassin et les dépôts littoraux et marins se mettent en place lors de phases transgressives au Rupélien. La mer va se retirer à la fin de l'Oligocène et les environnements vont se continentaliser avec le dépôt de sables continentaux en Périgord et des Molasses de l'Agenais.

Au début du Miocène, une nouvelle phase transgressive va amener une mer peu profonde dans le bassin jusque dans les environs d'Agen où l'on va retrouver des dépôts coquilliers caractéristiques d'un environnement littoral (Figure 2.2). Puis dans la seconde partie du Miocène, un nouveau régime régressif comble progressivement le bassin par des sédiments sableux.

Au Pliocène, le Bassin aquitain possède déjà ses grands traits actuels : sur ses bordures, les reliefs des Pyrénées et de la Montagne noire sont en place, seuls les Landes et le

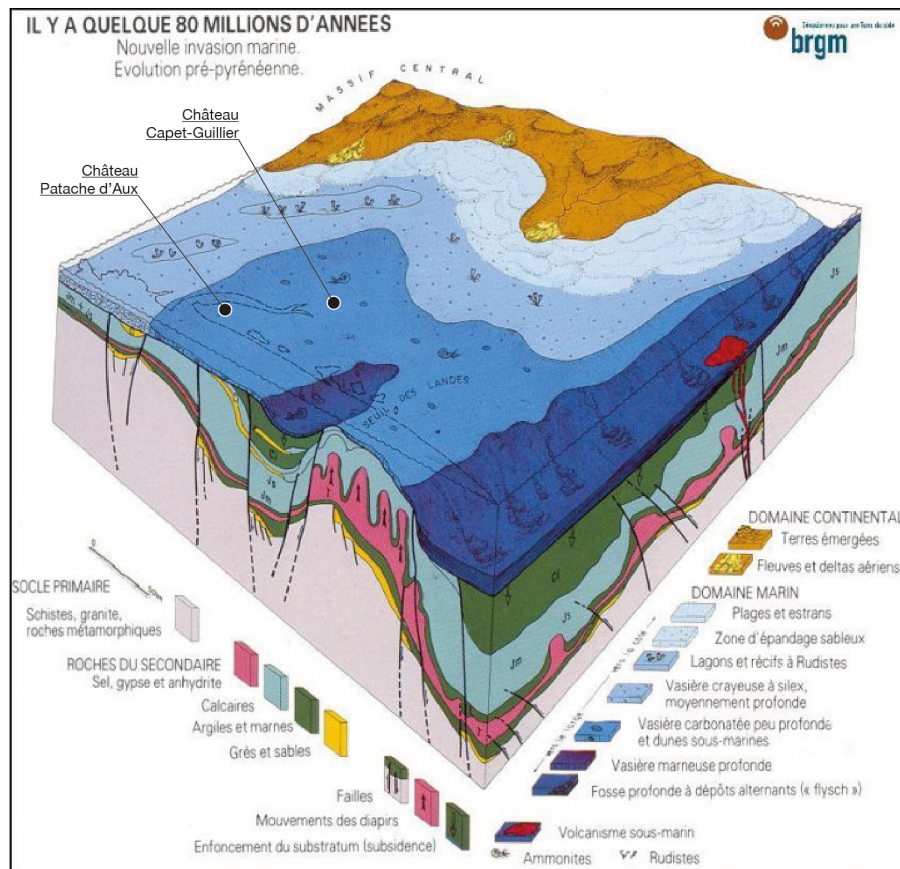


FIGURE 2.1 – Le bassin d'Aquitaine au Crétacé supérieur (adaptée de Platel et Dubreuilh, 1986).

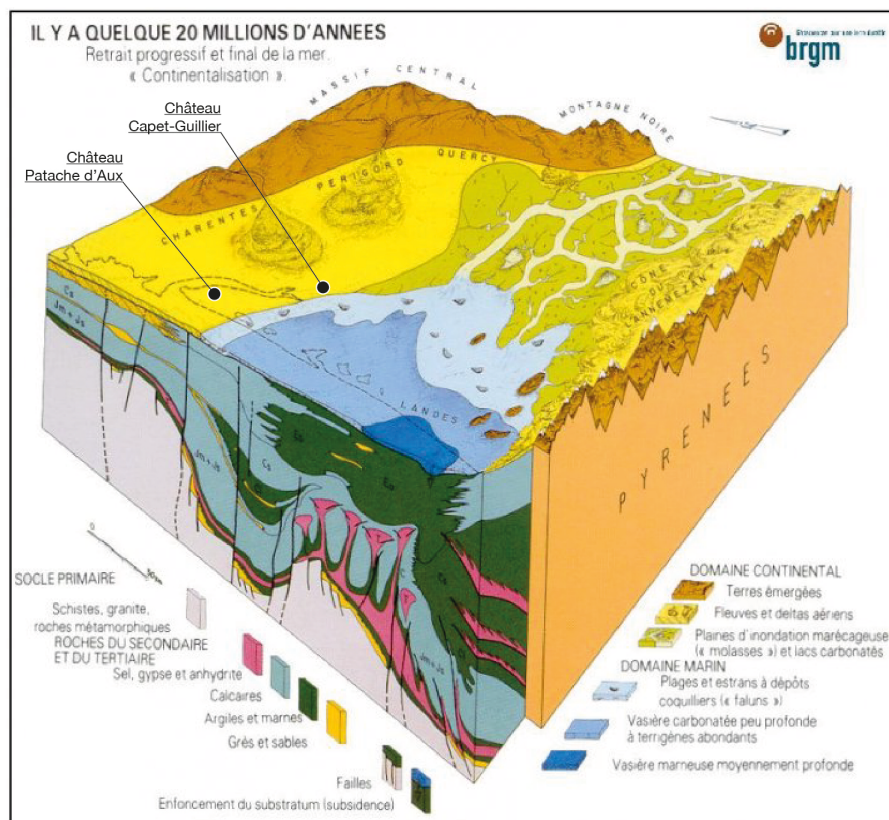


FIGURE 2.2 – Le bassin d'Aquitaine au Miocène (adaptée de Platel et Dubreuilh, 1986).

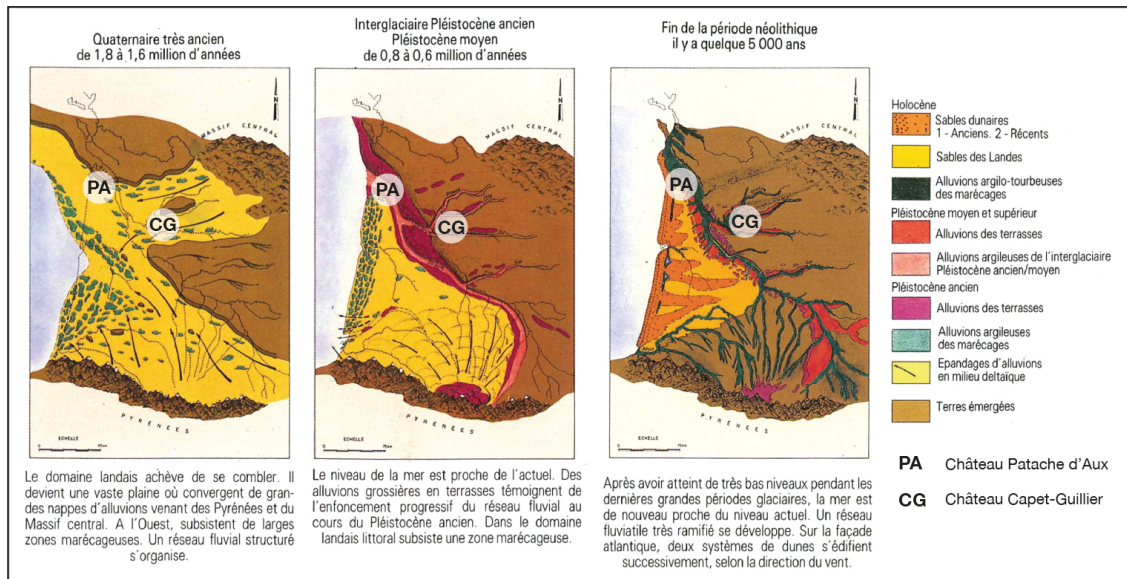


FIGURE 2.3 – Le bassin d'Aquitaine au Plio-Quaternaire (adaptée de Platel et Dubreuilh, 1986).

Médoc forment encore une cuvette régulièrement immergée lors des variations du niveau marin. Au centre du bassin, l'ancêtre de la Garonne est un grand fleuve qui débouche dans la zone toujours subsidente de Parentis. Les apports de sédiments en provenance du continent finissent par complètement combler le reste du bassin.

Au Quaternaire, le climat change, les températures chaudes du Tertiaire baissent avec l'initiation des périodes glaciaires du Pléistocène. Les Landes sont devenues une grande zone marécageuse dans laquelle le fleuve principal divague apportant des alluvions graveleuses de l'érosion intense des Pyrénées et du Massif central (Figure 2.3). Les modifications du climat changent les régimes des cours d'eau, les débits augmentent et le réseau hydrographique se structure progressivement alors que le cours de la paléo-Garonne progresse vers le Nord-Est et son lit actuel (Figure 2.3). Au cours des périodes glaciaires, le niveau marin baisse jusqu'à 120 m sous le niveau actuel provoquant un étagement des terrasses alluviales et un creusement du lit des fleuves, jusqu'à atteindre la cote -40 m NGF au niveau de l'aval de l'estuaire de la Gironde.

Puis la mer remonte à la période post-glaciaire, l'estuaire est ennoyé, des marais apparaissent et il est progressivement comblé par le sable (Figure 2.3). Sur le littoral atlantique, les vents façonnent des dunes ce qui isole les grands lacs littoraux de l'océan et favorise l'installation de marais et de tourbières (Hourtin-Carcans, Lacanau, Cazaux-Sanguinet, Biscarrosse-Parentis, etc.).

2.3 Les sites d'étude

Ces travaux ont été réalisés sur deux domaines viticoles du Bordelais en Gironde, au sein de deux appellations vinicoles différentes : le Château Capet-Guillier dans le Saint-

Emilionnais, et le Château Patache d'Aux dans le Nord du Médoc.

2.3.1 Le Château Capet-Guillier

Le Château Capet-Guillier (44°52'27" N ; 0°7'10" O) est situé au sein de la commune de Saint-Hippolyte à un peu plus de 3 km au Sud-Est de Saint-Emilion en Gironde, Nouvelle Aquitaine.

2.3.1.1 L'aire d'appellation Saint-Emilion

Le vignoble du Château Capet-Guillier est situé dans les Appellations d'Origine Protégée (AOP) vinicoles *Saint-Emilion* et *Saint-Emilion grand cru* (Figure 2.4). Ces deux appellations couvrent la même aire géographique sur neuf communes : Saint-Christophe-des-Bardès, Saint-Emilion, Saint-Etienne-de-Lisse, Saint-Hippolyte, Saint-Laurent-des-Combes, Saint-Pey-d'Armens, Saint-Sulpice-de-Faleyrens, Vignonet et Libourne. La surface en production associée représente 5 500 ha, soit près de 5% de la surface viticole du bordelais (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017b,a). L'appellation ne couvre que la production de vins rouges tranquilles et les cépages principaux autorisés par le décret d'appellation sont le Cabernet franc N, le Cabernet-sauvignon N, le Carménère N, le Cot N (ou Malbec) et le Merlot N. Le petit Verdot N est également autorisé comme cépage accessoire sous la limite de 10% de l'encépagement total (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017a).

Ces deux appellations se différencient de par un cahier des charges plus strict pour l'appellation grand cru qui impose un rendement maximal de 46 hectolitres par hectares ($\text{hL} \cdot \text{ha}^{-1}$) et un élevage du vin jusqu'au 1^{er} février de la deuxième année suivant la récolte (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017a). En appellation classique le rendement maximal est de 53 $\text{hL} \cdot \text{ha}^{-1}$ et l'élevage du vin est imposé jusqu'au 31 mars de la première année suivant la récolte (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017b).

2.3.1.2 Climatologie du Saint-Emilionnais

Le vignoble de Saint-Emilion bénéficie d'un climat tempéré océanique. Selon la classification de Köppen-Geiger Saint-Emilion est classé en *Cfb* (Peel et al., 2007), c'est-à-dire que le climat est qualifié de «*tempéré chaud sans saison sèche avec un été tempéré*». Dans la région bordelaise, les hivers sont doux et pluvieux et les étés sont modérément chauds et secs.

Sur une entrée sub-regionale, la station météorologique de Mérignac (*Météo France*), située à quelques kilomètres à l'est de Bordeaux (44°49'48" N ; 0°41'2" O), fournit des données de précipitations depuis 1920 et de température moyenne journalière depuis 1945. Sur la période 1987-2017, les précipitations annuelles représentent 912 mm (± 180 mm d'écart type) et la température moyenne annuelle est de 13,7 °C ($\pm 0,6^\circ\text{C}$). La variabilité climatique interannuelle est relativement forte, ce qui implique un fort effet millésime sur les vins (Bois et al., 2008). Le diagramme ombrométrique (Figure 2.5) montre que

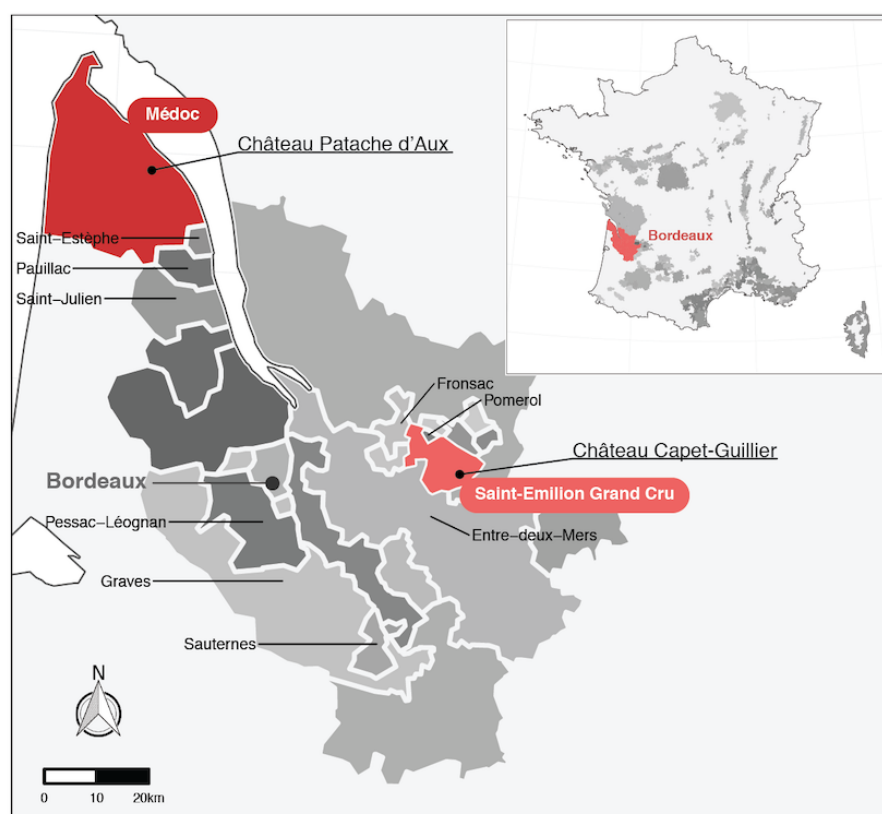


FIGURE 2.4 – Localisation des AOP Médoc et Saint-Emilion grand cru au sein du vignoble de Bordeaux.

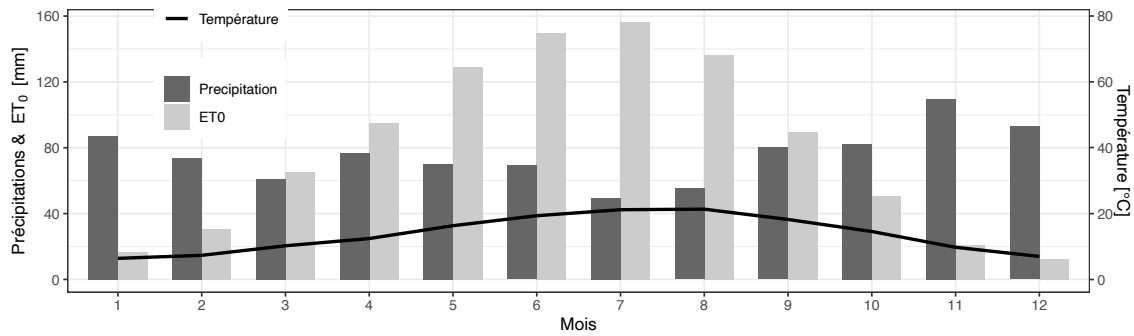


FIGURE 2.5 – Diagramme Ombrométrique moyen pour la période 1987-2017. Relevés de la station Météo France à Mérignac.

les précipitations sont distribuées sur l'ensemble de l'année sans déficit hydrique estival significatif.

2.3.1.3 Géologie et géomorphologie du Saint-Emilionnais

La géologie de la zone a été cartographiée au 1 :50 000^{ème} par le BRGM sur la feuille de Libourne (Dubreuilh, 1995). La zone est couverte par un empilement des sédiments tertiaires et quaternaires. En effet, pendant le Tertiaire et le Quaternaire, cette zone fut le lieu d'un fort taux de sédimentation. Le haut du Crétacé forme une dépression qui commence à se remplir de sédiments détritiques provenant de l'érosion du Massif central ancien et des Pyrénées tout juste formées. Un delta se développe au cours de l'Éocène progressant au Sud de Libourne et développant une plaine maritime au Nord-Est. Malgré l'augmentation des apports détritiques, une transgression à l'Éocène moyen amène au dépôt des Calcaires de Blaye bloquant la sédimentation dans le delta. Ensuite, un environnement fluvio-lacustre se met en place de l'Éocène supérieur à l'Oligocène inférieur aboutissant au dépôt de la formation des Molasses du Fronsadais sur environ 40 mètres d'épaisseur. La base de la formation correspond alors à une plaine d'inondation où apparaissent des canaux sablonneux. En fin de formation, les argiles deviennent grisâtres et carbonatées avec parfois des graviers et des sables micacés de faciès fluviaux latéraux. Ensuite, des dépôts fluviatiles à tendance lacustre apparaissent avec la mise en place d'une formation riche en sables et graviers feldspathiques avec de l'argile verdâtre et carbonatée. Sur cette dernière formation, on voit localement apparaître les Calcaires de Castillon (épais d'environ 10 m), formation lacustre déposée au Sud du village de Montagne. Cette formation est constituée d'argiles verdâtres et blanchâtres très carbonatées et de bancs de calcaire à faciès lacustre puis elle est surmontée par des marnes vertes sur environ 5 mètres. Au-dessus, on trouve les Calcaires à Astéries de Saint-Emilion correspondant à la transgression du Stampien. Cette formation de 10 à 15 mètres présente un faciès biodétritique carbonaté avec des fragments de coquillages, coraux et étoiles de mer.

Après la transgression stampienne, une régression repousse progressivement la mer vers l'Ouest près de Bordeaux. Les transgressions qui se sont produites après le Miocène étaient de plus faible ampleur et sont restées confinées à l'Ouest de la région bordelaise.

La région a ensuite fait l'objet d'une continentalisation. Au cours du Pliocène, les rivières

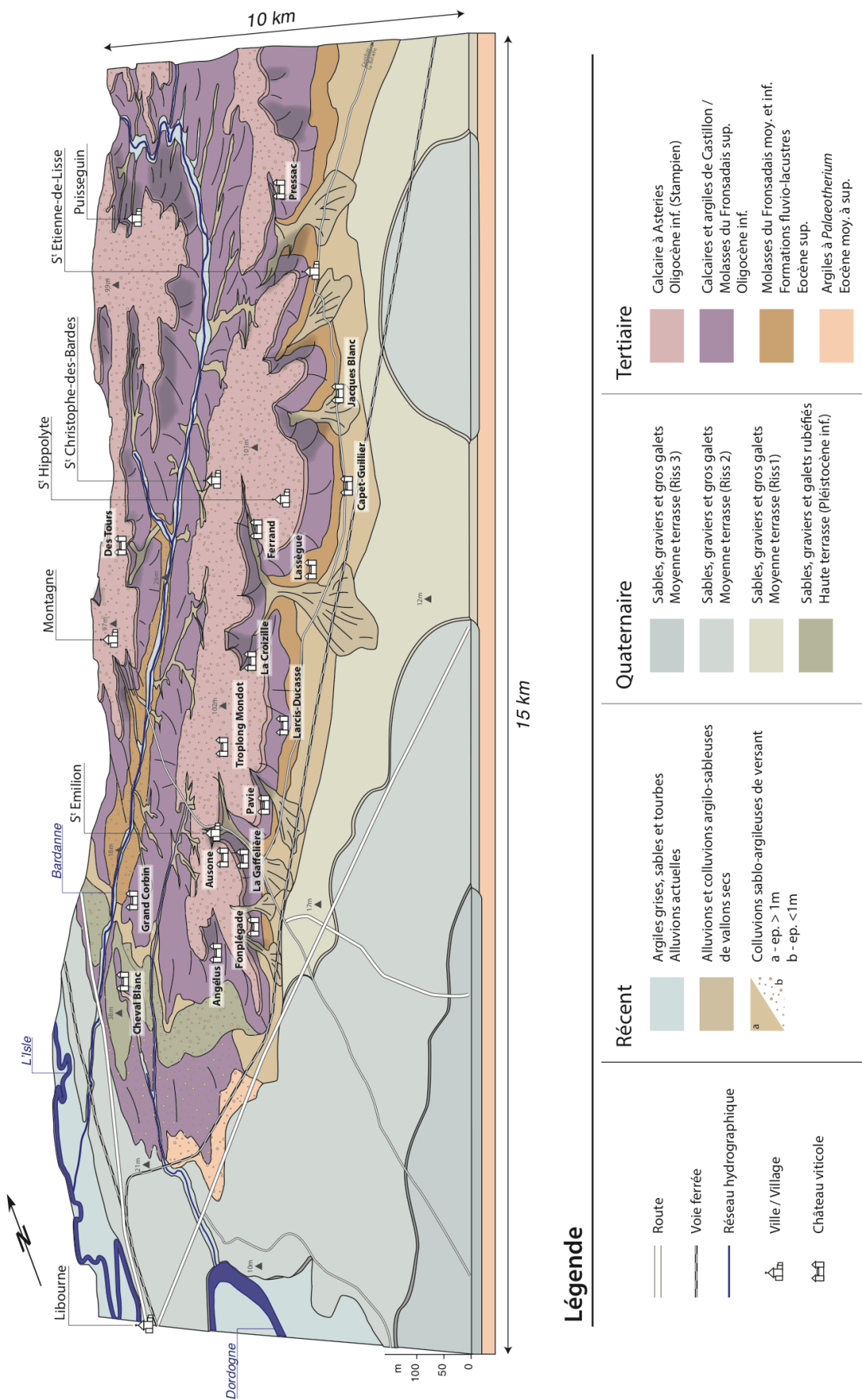


FIGURE 2.6 – Panorama géologique de Saint-Emilion et sa région, d'après la carte géologique de Libourne de Dubreuilh (1995)

apportant les matériaux détritiques du Massif central et des Pyrénées attirent les réseaux quaternaires. La sédimentation est ensuite concentrée sur le bassin landais qui est principalement rempli de sédiments des Pyrénées. L'actuel fleuve de la Dordogne creuse alors progressivement son lit dans les sédiments du Tertiaire.

De nos jours, le Calcaire à Astéries forme un plateau à une centaine de mètres au-dessus du niveau de la mer autour de Saint-Emilion (Figure 2.6). Ce plateau a été incisé par les réseaux hydrographiques au cours du Quaternaire. Au Nord et à l'Ouest de la zone, on trouve l'Isle qui prend sa source dans les monts du Limousin et afflue à la Dordogne au niveau de Libourne. Le Calcaire à Astéries (Oligocène supérieur, Stampien) est facilement observable en bordure du plateau. Cette formation d'une puissance d'une quinzaine de mètres au niveau de Saint-Hippolyte, est formée de plusieurs couches décimétriques à métrique de calcaire bioclastique de faciès Wackestone à Grainstone (Loisy et al., 2013) présentant des débris de coraux, bivalves et d'échinodermes (dont les osselets d'étoiles de mer qui donne son nom à la formation). Les faciès sont de plus en plus grossiers vers le sommet de la formation, on y voit apparaître des litages obliques témoignant de l'hydrodynamisme au moment du dépôt. Les bioclastes sont de taille plurimillimétrique à pluricentimétrique et la cimentation est relativement faible ce qui en fait une roche très poreuse et friable. Les mesures de porosité faites par Loisy et al. (2013) indiquent des valeurs allant de 20% dans la partie inférieure à 45% dans la partie supérieure.

Ce calcaire repose sur une épaisse formation dite des Molasses du Fronsadais (Éocène supérieur à Oligocène inférieur). C'est une formation peu indurée qui présente des faciès variés d'argiles silteuses carbonatés à plus sableuses localement, correspondant à des environnements de dépôt fluvio-lacustre (Dubreuilh, 1995). Cette roche tendre a été dégagée par l'érosion formant des systèmes de "combes" le long du versant Sud du plateau dans les alentours de Saint-Laurent-des-Combes.

La Dordogne coule aujourd'hui à un peu plus de 5 km au Sud de Saint-Emilion. Le fleuve a creusé une vallée d'environ 7 km de large dans cette zone. Les divagations des méandres ont rempli cette vallée au cours du Quaternaire formant la plaine alluviale actuelle. On y retrouve plusieurs phases de dépôts en terrasses fluviales correspondant aux périodes de glaciation au Pléistocène et à l'Holocène. Les aménagements et l'agriculture ont aujourd'hui lissé les légers dénivelés entre les terrasses, ce qui les rend difficiles à observer. Les sédiments de la plaine sont principalement sableux, avec quelques passées de sédiments plus fins, et des passages de graviers et galets.

2.3.1.4 Les sols du Saint-Emilionnais

En première approche, trois grands ensembles pédologiques sont distinguables sur l'emprise du domaine :

- dans le secteur de la plaine, les parcelles situées à l'Ouest présentent des sols très sableux avec peu d'éléments grossiers en surface : de manière éparse on trouve des cailloux et galets siliceux, parfois des pierres calcaires isolées, et quelques éléments d'apports anthropiques (tuiles, béton, etc.) ;

- les parcelles situées à l'Est du bloc (parcelles 3 et 4, Figure 2.10) ont des textures plus fines, assez difficiles à déterminer au toucher ;
- dans le secteur du coteau, les sols présentent des textures plus argileuses. Leur couleur, brun jaunâtre, est plus claire que celles des sols de la plaine. Le test à l'acide chlorhydrique donne une vive réaction indiquant la présence de carbonates en quantité significative. On retrouve fréquemment en surface des éléments calcaires dont la dimension va du gravier à la pierre.

Les sols de l'appellation Saint-Emilion ont été cartographiés par Van Leeuwen (1989) à l'échelle de 1 :25 000^{ème}. La figure 2.7 présente un extrait de cette carte qui a été réalisée suivant la classification de Commission de pédologie et de cartographie des sols (CPCS, 1967). Dans ce qui suit, nous avons transformé selon la table de correspondance les typologies CPCS en typologies de la classification Référentiel Pédologique (Baize and Girard, 2009). La cartographie levée par Van Leeuwen (1989) propose une classification des sols stratifiées selon différentes unités géomorphologiques de la zone :

- la partie centrale de l'appellation, où les sols sont développés sur des sédiments tertiaires qui forment des plateaux calcaires (Calcaire à Astéries) entourés de versants taillés dans les Molasses du Fronsadais, plus abrupts au Sud qu'au Nord ;
- la partie sur le calcaire à Astéries, où l'on trouve principalement des Calcosols leptiques proches de Rendosols ainsi que des Brunisols et Néoluvisols avec une épaisseur pouvant dépasser localement 2,5 m ;
- la partie de versant, où les sols sont généralement rencontrés des Calcosols à texture fine enrichie en limons fins. Ces sols sont « rajeunis » régulièrement par l'érosion de versant. Sur ces positions, on note la présence de sources et résurgences ;
- la partie Ouest, dans le secteur de Pomerol, où l'on rencontre des Brunisols sableux parfois hydromorphes, développés sur les terrasses quaternaires de l'Isle (affluent de la Dordogne à Libourne) ;
- la partie Sud, où les sols ont une texture principalement grossière et qui s'étend sur la plaine alluviale de la Dordogne. Sur cette partie de plaine, la variabilité typologique est relativement importante : on y rencontre tout aussi bien des Fluviosols à texture moyenne à fine, que des Brunisols sableux enrichis en graves en profondeur, des Néoluvisols, des sols à caractères hydromorphes et des Calcisols argileux.

Sur l'emprise du vignoble, la carte de Van Leeuwen (1989) indique la présence de 5 sols différents. Dans la partie du coteau, les quatre parcelles (C1 à C4, Figure 2.10) sont situées dans la même unité : “*Calcosols à texture fine*”. Dans le secteur de la plaine, quatre unités apparaissent sur le vignoble, d'Ouest en Est on trouve :

- des “*Brunisols Eutriques à texture grossière, recarbonaté en surface*” au niveau de la parcelle P (Figure 2.10) ;
- des “*Néoluvisols à texture grossière et à pseudogley apparaissant entre 40 et 60 cm*” au niveau des parcelles 1a, 1b, 2, 6 et 7 (Figure 2.10) ;
- des “*Rédoxisols à pseudogley superficiel à texture fine et recarbonaté en surface*” au niveau des parcelles 2, 3, 4, 5 et 6 (Figure 2.10) ;
- des “*Néoluvisols à texture grossière et à pseudogley apparaissant à moins de 40 cm*” au niveau des parcelles 3 et 4 (Figure 2.10).

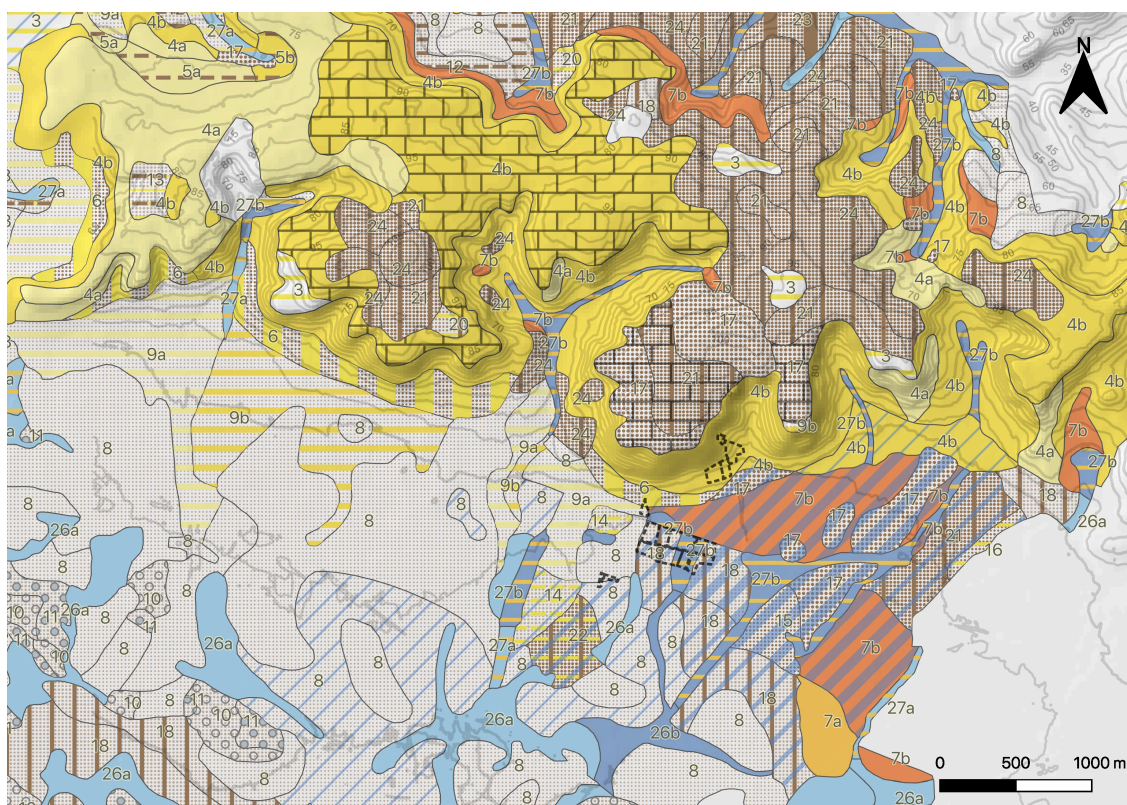


FIGURE 2.7 – Extrait de la carte des sols de Saint-Emilion (Van Leeuwen, 1989). En pointillés noirs : les parcelles du Château Capet-Guillier.

Unités cartographiques de sols (UCS)

-  3 Sols blancs calcaires lithiques (terre blanche calcaire)
-  4a Sols bruns calcaires a texture grossiere a moyenne (terre argilo-calcaire, legere)
-  4b Sols bruns calcaires a texture fine (terre argilo-calcaire, lourde)
-  5a Sols bruns calcaires a texture grossiere a moyenne, au-dessus d'un niveau non calcaire (terre argilo-calcaire profonde, legere, a sous-sol peu ou pas calcaire)
-  6 Sols bruns calcaires colluviaux, au-dessus de sable fluvatile non calcaire (terre argilo-calcaire de bas de versant)
-  7a Sols bruns calcaires a texture grossiere a moyenne (sable argileux avec calcaire en sous-sol)
-  7b Sols bruns calcaires a texture fine (argile avec calcaire en sous-sol)
-  8 Sols bruns a texture grossiere (sable ou sable argileux)
-  9a Sols bruns a texture grossiere, recarbonate en surface (sable faiblement calcaire en surface, de pied de cote)
-  9b Sols bruns a texture grossiere, recarbonate et enrichi en elements fins en surface (sable argileux faiblement calcaire en surface, de pied de cote)
-  10 Sols bruns a texture grossiere, au-dessus de graviers et cailloux (sable ou sable argileux sur graves)
-  11 Sol brun gravelo-sableux (graves)
-  12 Sols bruns sableux ou sablo-argileux, au-dessus d'un niveau a texture plus fine (sable ou sable argileux sur argile)
-  13 Sols bruns sableux ou sablo-argileux, au-dessus d'un niveau a texture plus fine, recarbonate en surface (sable ou sable argileux, faiblement calcaire en surface, sur argile)
-  14 Sols bruns sableux ou sablo-argileux, au-dessus d'un niveau a texture plus fine et calcaire (sable ou sable argileux sur argile calcaire)
-  15 Sols bruns a texture moyenne (sable argileux ou limon (terre clape, terre battante))
-  17 Sols bruns a texture fine (argile)
-  18 Sols bruns lessives a texture grossiere (sable ou sable argileux sur argile)
-  21 Sols bruns lessives a texture moyenne (limon (terre clape, terre battante) sur argile)
-  23 Sols lessives a texture moyenne (limon (terre clape, terre battante) sur argile)
-  24 Sols bruns lessives a texture fine (argile)
-  26a Sols hydromorphes a pseudogley superficiel a texture grossiere a moyenne (sable ou sable argileux barirole, avec nappe d'eau superficielle)
-  27a Sols hydromorphes a pseudogley superficiel a texture grossiere a moyenne, recarbonate en surface (sable ou sable argileux, faiblement calcaire en surface, barirole, avec nappe d'eau superficielle)
-  27b Sols hydromorphes a pseudogley superficiel a texture fine, recarbonate en surface (limon ou argile, faiblement calcaire en surface, barirole, avec nappe d'eau superficielle)

Surcharges

-  Présence d'un pseudogley à moins de 40 cm de la surface
-  Présence d'un pseudogley entre 40 et 60 cm
-  Présence d'un pseudogley entre 60 et 80 cm
-  Sol au dessus du Calcaire à Astéries

FIGURE 2.8 – Extrait de la légende de la carte des sols de Saint-Emilion (Van Leeuwen, 1989).

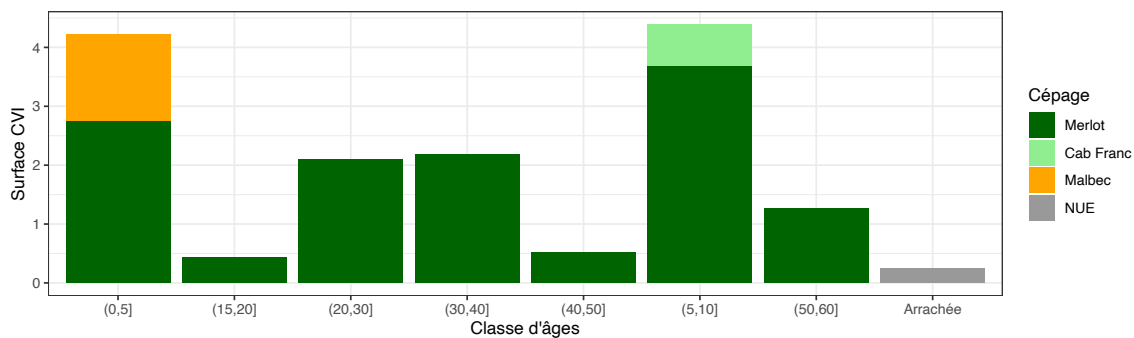


FIGURE 2.9 – Pyramide des âges (en 2019) du vignoble du Château Capet-Guillier.

2.3.1.5 Viticulture au Château Capet-Guillier : itinéraire technique et calendrier

Caractéristiques du vignoble et matériel végétal

Le vignoble du château couvre 13,2 ha de vignes en production pour une surface culturale de 15,3 ha (surface CVI). La surface moyenne des parcelles est d'environ 1 hectare avec une moyenne d'âge des vignes de 13 ans (de 0 à 54 ans) (Figure 2.9). La distance inter-rang est de 1,5 m et pour une distance inter-cep qui varie en fonction des parcelles de 0,85 à 1,20 m. La densité de plantation varie entre 5 556 et 8 114 pieds par hectare avec une moyenne de 6 645 pieds par hectare. Le vignoble est composé de deux îlots de parcelles et de quelques parcelles satellites (Figure 2.10). Le premier îlot (9,56 ha) qui est situé dans une zone de plaine représente est constitué des parcelles numérotées de 1 à 7. A cet agglomérat s'ajoutent i) une parcelle satellite (nommée P) de 0,31 ha, ii) deux autres parcelles au Sud (H1 et H2), d'une surface totale de 0,37 ha. Le deuxième îlot (2,94 ha) est positionné au Nord-Est du château sur le coteau Sud du plateau. Il est composé de 4 parcelles (C1 à C4) dont seules les parcelles C1 à C3 sont aujourd'hui en production (soit 2,77 ha).

La production du domaine est dédiée à la production de vin rouge en appellation *Saint-Emilion grand cru* avec le Merlot N comme cépage majoritaire (85% de la surface), classique à Saint-Emilion. Le Cabernet franc N est également présent à hauteur de 5%, et du Cot N a été planté en 2016 (10%). Deux principaux portes-greffe sont associés au Merlot N : 101-14 Millardet et de Grasset (101-14 MGt) et Riparia Gloire de Montpellier.

Travail du sol et gestion de l'enherbement

L'abandon des herbicides sur la propriété depuis 2009 impose un travail du sol régulier afin de limiter la pousse de l'herbe au cours de la saison. Sous le rang de vigne, le sol est travaillé à l'aide d'un outil inter-cep (Décalex), c'est-à-dire une charrue munie d'un palpeur qui permet le retrait de l'outil au niveau de chaque cep de vigne. Ce travail est réalisé sur une quinzaine de centimètres de profondeur et sur 25 cm de large de chaque côté du rang. Les inter-rangs sont quant'à eux soit enherbés avec des cultures de service semées (2 rangs sur 3), soit en enherbement spontané (1 rang sur 3). Pour les plantes de services, il s'agit le plus souvent d'un mélange d'avoine (*Avena sativa*), de seigle (*Secale cereale*) et de vesce (*Vicia sativa*) dans des proportions variables. Le rang en enherbement

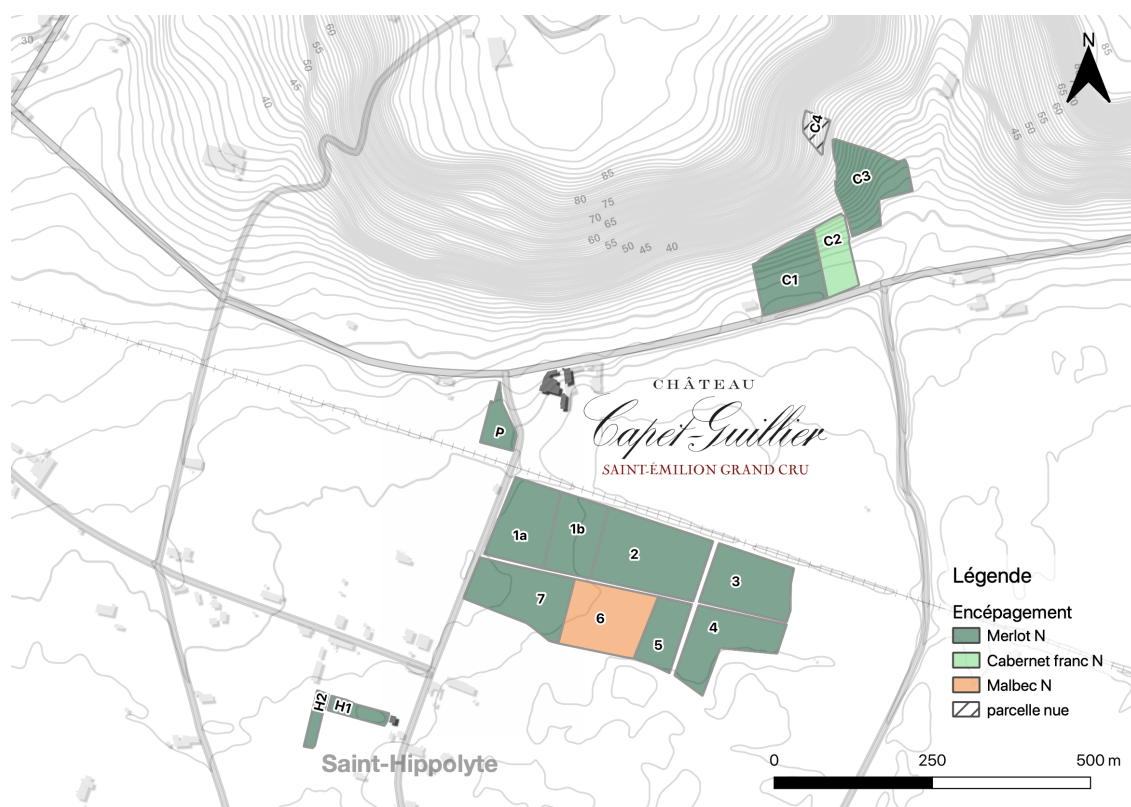


FIGURE 2.10 – Carte des parcelles et encépagement du château Capet-Guillier.

spontané sans travail de sol est tondu au girobroyeur afin de favoriser la portance du sol et augmenter la traficabilité en cas de pluie. Sur la propriété, trois types de travail du sol sont réalisés :

- un travail superficiel (15 cm) réalisé régulièrement au cours de la saison afin de gérer la pousse de l'herbe. Au cours de la saison, le viticulteur utilise la compétition avec l'enherbement de l'inter-rang pour gérer le statut hydrique de la vigne. Lorsque la contrainte hydrique est trop forte, il décide de détruire l'enherbement de l'inter-rang afin de supprimer la compétition. Pour cela, il utilise un outil de type griffe (Actisol ®) sur les quinze premiers centimètres du sol ;
- un travail plus profond (25 cm) après les vendanges, où la totalité des inter-rangs sont travaillés avec un outil de type disque afin de décompacter les sols avant l'hiver et les préparer au semis de début novembre ;
- un travail de sol profond (50 cm) réservé à la préparation des parcelles pour la replantation. A l'arrachage de la parcelle, les ceps et leurs racines sont arrachés avec un peigne dans le but de limiter la transmission de viroses d'une plantation à l'autre. La parcelle est ensuite laissée au repos pendant une saison avec une culture de service. Au début de l'année suivante, le sol est travaillé à 50 cm avec une charrue, puis un passage de disques avant la plantation permet de niveler la parcelle.

Au cours de la saison, le viticulteur utilise la compétition avec l'enherbement de l'inter-rang pour gérer le statut hydrique de la vigne. Lorsque la contrainte hydrique est trop forte, il décide de détruire l'enherbement de l'inter-rang afin de supprimer la compétition. Pour cela, il utilise un outil de type griffe (Actisol ®) sur les quinze premiers centimètres du sol.

2.3.1.6 Éléments de vinification au Château Capet-Guillier

Deux crus sont produits au château : le cru *Château Capet-Guillier* qui constitue la cuvée haut de gamme, et le cru *Château Tour de Capet* qui est la cuvée de milieu de gamme. Les lots de vin de qualité inférieure sont vendus à un négociant pour être commercialisés sous l'étiquette d'une marque distributeur en appellation Saint-Emilion générique.

Dates des vendanges : Chaque année la date de la vendange de chaque parcelle est déterminée grâce à un suivi de l'évolution des baies au cours de la fin de saison. Les baies sont dégustées plusieurs fois par semaine par le directeur technique, le maître de chai, ainsi qu'un expert consultant. La dégustation est faite dans plusieurs rangs au sein de chaque parcelle afin d'évaluer la variabilité intra-parcellaire. La date exacte des vendanges est déterminée afin d'obtenir des raisins avec une maturité phénolique si l'état sanitaire le permet. La pellicule, la qualité des pépins, l'équilibre sucre/acide ainsi que les arômes sont pris en compte dans la dégustation des raisins. La maturité optimale est obtenue lorsque la pellicule des Merlots devient noir opaque et qu'elle éclate sous la dent, que les pépins ont des arômes de noisette, et que la baie n'est plus acide, mais donne des arômes fruités. Avant cette maturité les baies sont acides et astringentes. Cette étape de dégustation des raisins permet également d'évaluer leur qualité afin d'adapter l'itinéraire technique

de vendange par la suite. Un contrôle de maturité (obligatoire) est réalisé au laboratoire œnologique de Castillon la Bataille, afin de mesurer le degré d'alcool potentiel, l'acidité totale, la teneur en azote assimilable et le pH du moût. L'équipe technique s'appuie sur ces analyses, même si une grande importance est accordée à la dégustation des baies.

Réception de la vendange : Le défi pour le maître de chai est de mettre en cuve des baies de raisins les plus entières possible. Pour cela, les raisins destinés au cru haut de gamme *Château Capet-Guillier*, sont récoltés à la main. L'équipe de vendangeur réalise un premier tri dans la parcelle où seuls les raisins à maturité sont récoltés. Les grappes sont transportées jusqu'au chai dans des cagettes afin de limiter le tassement des baies. La chaîne de réception est composée :

- d'un éraffoir qui sépare les baies de la rafle,
- d'une table vibrante qui égoutte les baies,
- d'un trieur densimétrique qui élimine les déchets et les baies non mures,
- d'une table de tri manuel avec quatre personnes pour éliminer les derniers déchets,
- entre les éléments de la chaîne, un élévateur à bande est placé lorsque la vendange a besoin d'être remontée.

Pour des raisons économiques, les raisins les moins qualitatifs, destinés au second cru *Tour de Capet*, sont vendangés à l'aide d'une vendangeuse mécanique. Les raisins sont éraflés directement par la vendangeuse et celle-ci réalise un premier tri qui écarte une partie des feuilles, raisins verts ou pourris qui auraient pu être captés par la machine. Le transport jusqu'au chai est réalisé par une benne basculante à bec vibrant. Une fois au chai, le tri de la vendange est réalisé par une table vibrante pour égoutter les baies puis un trieur densimétrique qui élimine les déchets et les baies non mures. Après le tri, la vendange est convoyée dans des chariots jusqu'à un élévateur à bande qui la déverse ensuite dans la cuve en cours de remplissage.

Cuvier : Le chai du Château Capet-Guillier est constitué de 23 cuves en béton brut, pour une capacité de 1200 hL, et de 4 foudres en bois, pour une capacité de 140 hL. La contenance moyenne des cuves est de 52 hL ce qui permet de séparer les raisins des différentes parcelles (ou sous parcelles) au moment de la réception de la vendange. Les cuves en béton disposent d'une ou deux trappes d'accès large (diamètre 1,20 m) qui facilite l'accès au chapeau de marc au moment des vinifications. Les foudres en bois sont ouvertes sur le dessus permettant une vision complète du marc. Le chai est équipé d'un système de régulation thermique : chaque cuve est dotée d'un thermomètre et d'un échangeur thermique qui est alimenté soit par un réseau d'eau chaude soit par un réseau d'eau froide permet de contrôler la température à l'intérieur de chaque cuve.

Processus de vinification : Une fois le raisin en cuve, démarre la vinification qui consiste à transformer le raisin (le moût) en vin et qui se déroule selon plusieurs phases : la macération pré-fermentaire, la fermentation alcoolique, la fermentation post-fermentaire, l'écoulage et le pressurage du marc et enfin la fermentation malo-lactique.

Suite à l'encuvage, démarre la macération pré-fermentaire à froid : le raisin est refroidi pendant 3 jours pour le maintenir entre 10 et 13°C. Le démarrage de la fermentation est ainsi retardé et permet d'extraire de façon sélective certains composés hydrosolubles tels que des pigments, des arômes et tanins.

La fermentation alcoolique démarre suite à un levurage de la cuve. La température de la cuve est remontée pour favoriser le démarrage de l'activité biologique. Puis une fois démarrée, la fermentation alcoolique dégage beaucoup de chaleur, la température est donc régulée grâce au système de froid entre 25 et 30°C. Lors de cette phase, le sucre contenu dans le moût est progressivement consommé par les levures qui le transforment en alcool. Dans la cuve les baies de raisin éclatent sous la pression, la pellicule et les pépins, plus légers que le jus remonte et forme un "*chapeau*" de marc. L'extraction des composés pelliculaires est une étape importante pour la production de vin rouge. En effet, les pellicules contiennent un ensemble de composés (polyphénols, tanins, etc.) recherchés dans un vin rouge de qualité. Afin d'extraire ces composés vers le jus, deux techniques sont utilisées par le Château Capet-Guillier : (i) les remontages qui consiste à arroser le chapeau de marc avec le jus de la cuve afin de le mettre en contact avec les pellicules ; (ii) le pigeage qui consiste à enfoncer le chapeau de marc dans le jus pour l'immerger. Ces deux méthodes d'extraction sont dites "*douces*" afin de limiter l'extraction de tanins astringents et amers présents dans les pépins qui ne sont pas désirés ici.

La fermentation alcoolique dure le plus souvent une quinzaine de jours, elle est considérée comme terminée lorsque la quantité de sucre est inférieure à 2 g/L. On laisse alors le vin en cuve avec son chapeau de marc pour la macération post-fermentaire. Le vin est maintenu à 28°C pour favoriser la synthèse de composés phénoliques et améliorer la qualité des tanins. Pour déterminer la durée de cette macération, le vin est goûté régulièrement par toute l'équipe technique.

Une fois la macération post-fermentaire terminée, on procède à l'écoulage de la cuve. Celle-ci est soutirée pour en extraire le "*vin de goutte*" qui sera stocké dans une cuve vide. Une fois égoutté, le marc restant dans la cuve est pressé dans un pressoir hydraulique vertical. Le vin récupéré par ce procédé est appelé "*vin de presse*" et celui-ci sera stocké séparément du vin de goutte. Il est à noter que durant l'étape de presse plusieurs qualités de vin sont extraites en fonction de la pression appliquée sur le marc. Ces différents lots sont séparés afin de préserver les meilleurs.

Le vin est alors remis soit en cuve soit en barrique, et des analyses sont réalisées pour connaître l'avancement de la fermentation malo-lactique. Cette fermentation est imposée par le cahier des charges de l'appellation (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017a), car la transformation de l'acide malique en acide lactique influence la qualité organoleptique du vin. Afin de favoriser cette fermentation, le vin est maintenu entre 20 et 22°C.

Une fois la vinification terminée, les vins vont pouvoir commencer leur élevage nécessaire avant la mise en bouteille. On notera qu'à ce moment, les différents lots de vins de goutte en provenance des différentes parcelles sont encore séparés. Les lots de vins de presses quant à eux sont assemblés en fonction de leur qualité.

Chaque lot de vin de goutte fait alors l'objet d'une dégustation par le directeur technique, le maître de chai et le consultant œnologue. Une note, comprise entre A et C, est attribuée à chacun des lots : A (la meilleure note) et C (la moins bonne). Pour la dégustation, 6 critères organoleptiques sont quantifiés : (i) la longueur en bouche, (ii) la tension et l'équilibre en bouche entre alcool et acidité, (iii) la charge tanique, (iv) l'intensité de la

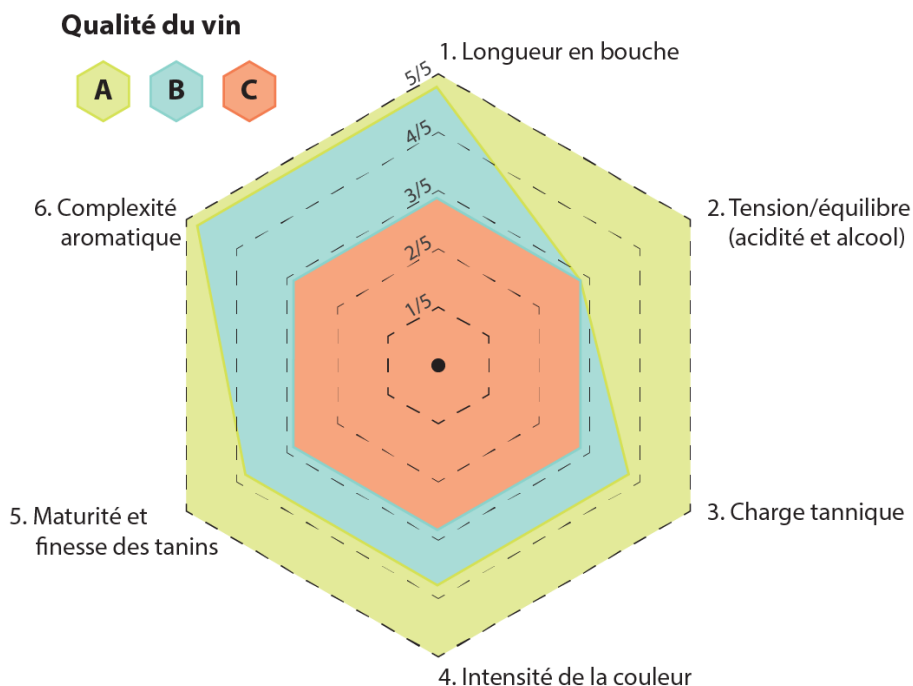


FIGURE 2.11 – Notes de qualité du vin de A (meilleur) à C (moins bon), et les critères de notation utilisés pour la dégustation. Le diagramme indique l'intervalle du score nécessaire à l'obtention de la note finale de qualité.

couleur, (v) la maturité et la finesse des tanins, (vi) la complexité aromatique. Chaque critère est évalué par un score entre 1 et 5. La note finale de qualité du vin (de A à C) est attribuée selon la note de qualité la plus élevée lorsque les scores minimums pour tous les marqueurs sont atteints (Figure 2.11).

Élevage : Les vins sont élevés jusqu'au printemps de la deuxième année qui suit la récolte (c'est-à-dire que le millésime récolté en 2016 a été élevé jusqu'au printemps 2018). Une partie de cet élevage est réalisé en barrique en chêne pédonculé (*Quercus robur*) français d'une contenance de 225 litres. Le parc de barriques comprend de 250 à 300 barriques selon les années, et celles-ci sont renouvelées sur un cycle de 3 ans. Ainsi, chaque année, le parc dispose d'un tiers de barriques neuves. Les lots les plus qualitatifs sont sélectionnés pour un élevage en barrique neuve. L'élevage des autres lots est réalisé dans des barriques d'un ou deux vins et en cuve béton. Au cours de l'élevage, des analyses micro-biologiques sont régulièrement réalisées sur les différents lots afin de vérifier la qualité de chacun.

Assemblage et mise en bouteille : Une fois l'élevage terminé, le vin est dégusté par l'équipe technique afin de prendre la décision pour l'assemblage final des différents crus. Cet assemblage prend en compte la qualité et le volume disponible de chacun des lots. L'enjeu est alors de trouver le bon compromis entre la qualité et le volume des différents crus obtenus. Les vins sont ensuite assemblés dans des cuves de grande contenance, le vin est collé et filtré afin d'éliminer les particules en suspension qui n'auraient pas décantés avec les lies lors de l'élevage. Suite à cette étape, le vin est prêt pour la mise en bouteille. Mise en bouteille opérée au château par un prestataire de service.

Les grandes étapes des travaux viti-vinicoles réalisés au Château Capet-Guillier ont été

synthétisés sur une frise chronologique présentée par la figure 2.12.

2.3.2 Château Patache d'Aux

2.3.2.1 L'aire d'appellation Médoc

Le Château Patache d'Aux se situe au sein de l'AOC *Médoc* (Figure 2.4). Le Médoc est une presqu'île située au Nord-Ouest de Bordeaux, elle est bordée par la côte atlantique à l'Ouest, et par l'estuaire de la Gironde à l'est. Très contrasté d'un point de vue géographique, il comporte des formations dunaires le long du littoral atlantique, des formations sableuses occupées par la culture des pins maritimes au centre, des marais salés plus ou moins poldérisés le long de la Gironde et des formations graveleuses à l'Est organisés en croupes sur la bordure d'estuaire. La partie Sud est couverte par l'AOC *Haut-Médoc* et la partie Nord par l'AOC *Médoc*. L'aire géographique de l'appellation couvre un ensemble de 51 communes pour environ 5800 ha de vigne plantée. Le décret d'appellation autorise 6 cépages noirs : le Cabernet franc N, le Cabernet-sauvignon N, le Carménère N, le Merlot N, le Cot N (ou Malbec) et le petit Verdot N. L'appellation limite le rendement à 55 hectolitres par hectare, et impose un élevage jusqu'au 31 mai de l'année suivant la récolte (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018).

2.3.2.2 Climatologie du Nord Médoc

Le climat du Médoc est de type océanique tempéré. Il est fortement influencé par la proximité de la mer et l'absence d'obstacle aux vents venant de l'Ouest. La classe climatique de Köppen pour cette zone est la même que pour la région de Saint-Emilion : *Cfb* (Peel et al., 2007).

La station météorologique de Pauillac (*Météo France*, 45°13'0" N ; 0°46'55" O), est en service depuis 1962. Elle ne fournit des données de température seulement depuis septembre 2014. Sur la période 1987-2017, les précipitations annuelles représentent 841 mm (± 157 mm d'écart type) et sur la période 2004-2017 la température moyenne annuelle est de 13,4 °C ($\pm 0,7^\circ\text{C}$).

2.3.2.3 Géologie et géomorphologie du Nord Médoc

La géologie du Médoc a été entièrement cartographiée par le BRGM à l'échelle de 1 :50 000^{ème}. L'emprise du vignoble du Château Patache d'Aux se situe à la jonction entre les feuilles de Saint-Vivien de Médoc – Soulac-sur-Mer n°730 (Marionnaud and Dubreuilh, 1972) au Nord, et Lesparre-Médoc – Forêt de Junca n°754 (Dubreuilh et al., 1973) au Sud.

Au début du Tertiaire (Paléocène), la région est émergée suite à un soulèvement général du continent. A l'Éocène inférieur, de grands fleuves charrient des sédiments détritiques en provenance du Massif central et se déversent dans la mer située plus à l'Ouest. A la fin de l'Éocène inférieur, à plus de 200 km au Sud de l'actuelle ville de Bordeaux la formation

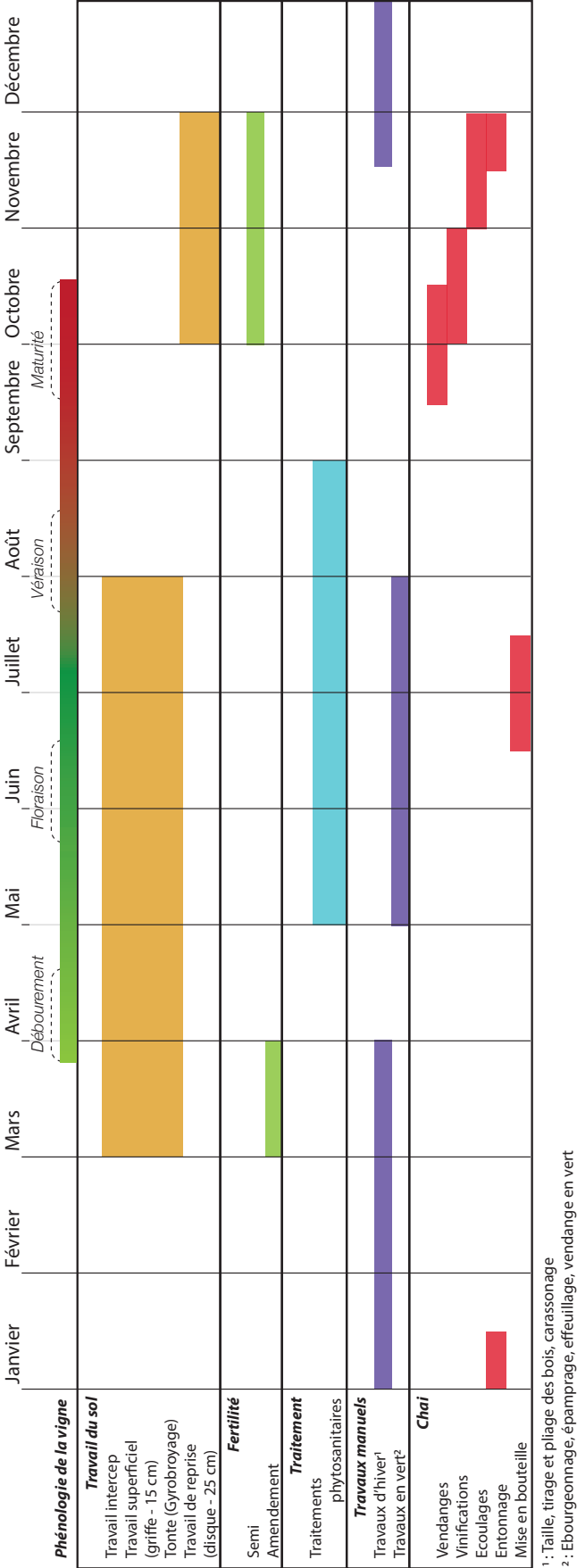


FIGURE 2.12 – Frise chronologique des travaux viti-vinicoles d’une année type au Château Capet-Guillier.

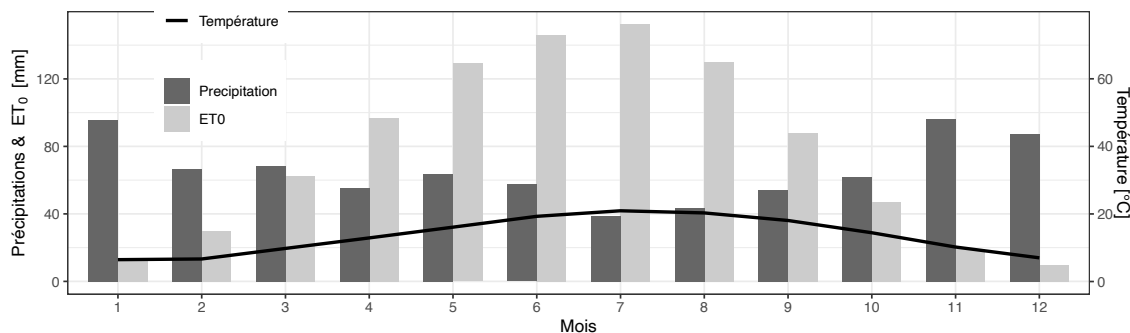


FIGURE 2.13 – Diagramme Ombrométrique moyen pour la période 2005-2018. Relevés de la station Météo France à Pauillac

de la chaîne Pyrénéenne démarre. Les failles normales du bassin jurassique s'inversent lors des mouvements de compression. Ces plissements provoquent un affaissement du bassin aquitain et la mer revient dans la région lors la transgression lutétienne (-49 Ma). Dans le Nord du Médoc, la mer est alors peu profonde permettant le dépôt des Calcaires de Couquèques qui sont particulièrement riches en débris fossiles d'oursins. A cette période, le niveau marin relatif n'est pas très stable et les environnements de dépôt oscillent entre des milieux lacustres et palustres (Argiles à *Ostrea Cucullaris* et le « Calcaire lacustre de Plassac ») et des milieux marins (Calcaires et Marnes de Saint-Estèphe). A la fin de l'Éocène, la mer est progressivement repoussée vers l'Ouest. Au cours de cette régression, les dépôts sableux fluviatiles progressent dans cette même direction et viennent recouvrir le Médoc correspondant au dépôt des Molasses du Fronsadais. Un nouvel épisode marin arrive au début de l'Oligocène matérialisé aujourd'hui par un dépôt de type lagunaire de marnes blanches (marnes de Bel-Air), avant de redevenir plus continental avec les dépôts marneux et carbonatés lacustres de type Castillon. Puis le reste de l'Oligocène est marqué par une phase de transgression marine plus importante : les dépôts présentent des faciès de plus en plus marins, passant de faciès lagunaires à des faciès plus externes à algues et polypiers équivalents stratigraphiques des calcaires à Astéries (Dubreuilh et al., 1973). A la fin du Miocène, la mer se retire définitivement. Les sédiments carbonatés alors émergés subissent une phase d'altération et de karstification. Les sédiments quaternaires couvrent une grande partie du Médoc. Au début du Pléistocène, la Garonne acquiert sa position actuelle, puis les terrasses fluviatiles se mettent en place sur la bordure est du Médoc au Pléistocène moyen et supérieur. Ces dépôts, mis en place au cours des périodes du Riss et du Würm, évoluent d'Ouest en Est pour devenir de plus en plus grossiers. La fin du Pléistocène est marquée par des épandages de sables. La période de l'Holocène correspond à la mise en place des cordons dunaires sur le littoral atlantique et au colmatage des zones basses ayant abouti aux marais qui bordent la Gironde (Dubreuilh et al., 1973).

Le relief dans la zone médocaine est relativement plat, avec un point culminant à 43 m au niveau du dôme de Listrac (Courrèges, 1997). Dans la partie Nord de la zone, l'altitude est encore plus faible : 10 à 15 m. Les terrasses fluviatiles du Pléistocène moyen et supérieur ont enfoui les buttes résiduelles lissant le relief du Médoc. Au Nord-Est de Lesparre, les sédiments tertiaires affleurent au niveau d'un anticlinal appelé dôme de Couquèques. Ces dépôts calcaires karstifiés forment un relief de plateaux ondulés aux creux comblés par

des argiles lourdes (Wilbert, 1978). Plus au Sud, sur la rive gauche de la Gironde, les anciennes terrasses alluviales forment un alignement de plateaux à galets connus sous le nom de “Graves du Médoc”. Tous ces reliefs ont été disséqués en bordure de Garonne par des cours d'eau au cours de la glaciation du Würm alors que le niveau marin était bas. Ces incisions sont maintenant comblées par des tourbes puis des alluvions fluvio-marines à texture fine. Aujourd'hui, ces dépressions forment des plaines marécageuses reliées à l'estuaire, appelées localement “palus”.

2.3.2.4 Les sols du Nord Médoc

Wilbert (1978) détaille dans sa carte pédologique de la région de Lesparre, les différents sols de la partie Nord du Médoc. Il distingue 7 paysages : le cordon dunaire, le chapelet de marécages du revers des dunes, la plaine sableuse forestière, les marais du Médoc, le dôme tertiaire, la bordure sableuse et les terrasses caillouteuses des “graves” viticoles. Les sols concernés par la production viticole correspondant aux trois derniers des paysages cités ci-devant. Ici encore, les descriptions des sols faites par Wilbert (1978) ont été faites en suivant la classification CPCS. Par la suite, nous avons décrit les sols en utilisant le Référentiel Pédologique (Baize and Girard, 2009) et la table des correspondances avec la classification CPCS.

Dans le paysage du **dôme tertiaire**, les sols ont une texture assez variable en lien avec la charge en éléments détritiques des différents calcaires sous-jacents. On y rencontre principalement des Rendosols, des Calcosols ainsi que des Calcisols. Dans la **bordure sableuse**, située en contrehaut des marais du Médoc et en bordure des terrasses caillouteuses, les sols présentent une texture sableuse sur des argiles rougeâtres (altération des calcaires oligocènes). On y rencontre des sols allant de Brunisols à des Néoluvisols, mais également des sols podzolisés. Enfin, dans les **terrasses caillouteuses** la charge en cailloux est exclusivement siliceuse (quartzs blancs, quartzites et quelques lydiennes) et la texture est très variable, même localement. Les sols ont une tendance à la podzolisation dans les parties hautes des terrasses, et tendent vers des Brunisols ailleurs et des Peyrosols pour les références les plus chargées en éléments grossiers.

Le vignoble de Patache d'Aux, se trouve presque totalement dans l'unité cartographique de sol (UCS) n°18 : “*Calcosols limono-argileux à argilo-limoneux sur colluvions issues de calcaires tendres à bancs durs*” d'après la carte de Wilbert (1978) (Figure 2.14). Néanmoins, dans la partie sud-ouest, quelques parcelles sont sur l'UCS n°32 : “*Néoluvisols à Luvisols, sur sable reposant sur une argile sableuse*”. Au Nord-Est, certaines parcelles sont très proches des UCS :

- n°26 : “*Brunisols, parfois à tendance Néoluvisols, acides, à Bt fréquemment en bandes, sur sable grossier quartzeux.*”
- n°28 : “*Brunisols sableux profonds à pseudogley très exprimé, peu profond.*”
- n°31 : “*Néoluvisols sur sable, reposant sur du matériel argileux rubéfié de décarbonatation du Stampien, faciès "calcaire à Astéries".*”

La zone est également couverte par le Référentiel Régional Pédologique (RRP) à l'échelle 1 :250 000^{ème} (Richer-de-Forges and Arrouays, 2014). Sur cette carte, les parcelles du



FIGURE 2.14 – Extrait de la carte pédologique de Lesparre-Médoc (Wilbert, 1978). Zoom sur Bégadan et les communes alentours. En noir, les parcelles du Château Patache d'Aux.

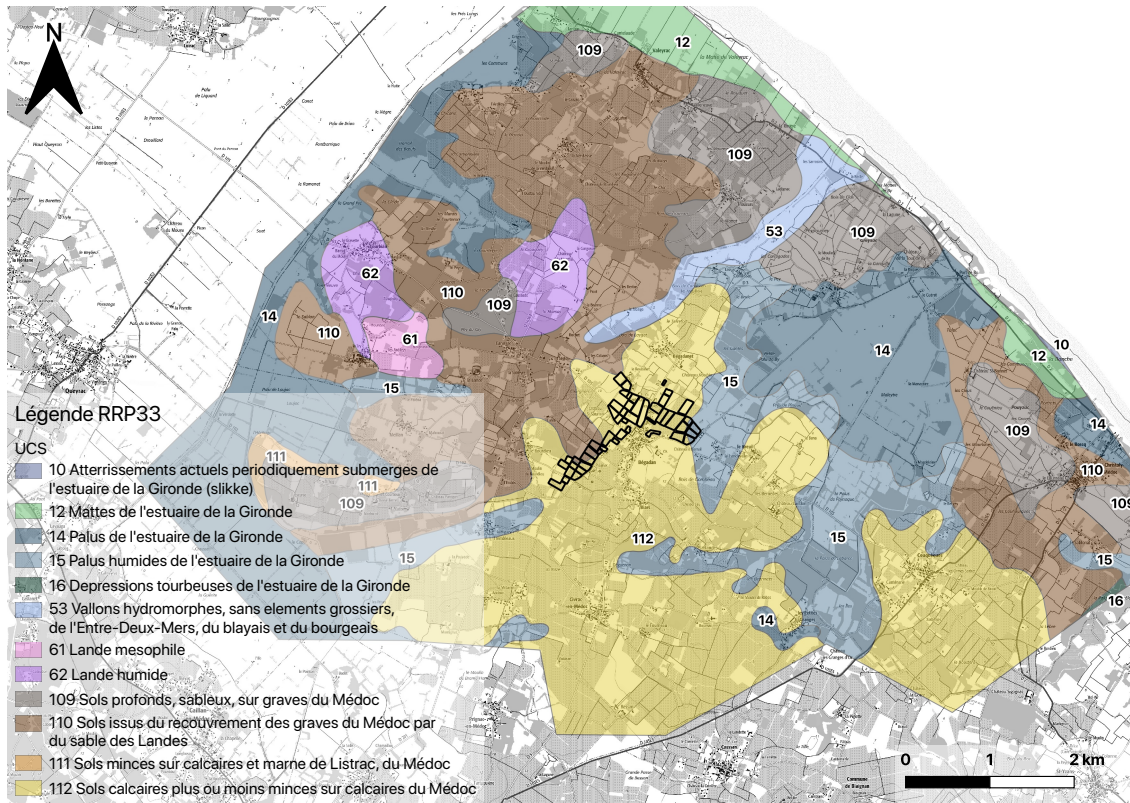


FIGURE 2.15 – Extrait du Référentiel Régional Pédologique de la région Nouvelle-Aquitaine (Richer-de-Forges et Arrouays, 2014) avec fond SCAN25-IGN. Zoom sur Bégadan et les communes alentours. En noir, les parcelles du Château Patache d'Aux.

Château Patache d'Aux sont situées en quasi-totalité dans l'UCS n°112 "*Sols calcaires plus ou moins minces sur calcaires du Médoc*" (Figure 2.15). Dans la partie Ouest, quelques parcelles sont sur l'UCS n°110 "*Sols issus du recouvrement des graves du Médoc par du sable des Landes*", et dans la partie basse à l'Est le parcellaire touche l'UCS n°15 "*Palus humides de l'estuaire de la Gironde*".

D'après la base de données associée au RRP (Richer-de-Forges, 2014), l'UCS 112 présente :

- 60% de "*Rendosol pachique argileux, peu profond, calcaire, non hydromorphe, à graviers et cailloux calcaires, sur calcaire et marne de Listrac*",
- 30% de "*Calcosol, moyennement profond, calcaire, non hydromorphe, sans éléments grossiers, sur calcaire de Listrac*",
- 10% de "*Calcisol, argileux, peu profond, calcique, non hydromorphe, sans éléments grossiers, sur calcaire du Médoc*".

2.3.2.5 Viticulture au Château Patache d'Aux : itinéraire et calendrier

Caractéristiques du vignoble et matériel végétal

Le vignoble du château couvre 45,6 ha de vignes en production pour une surface culturale de 51,6 ha (surface selon le Casier viticole informatisé, CVI) sur la commune de Bégadan

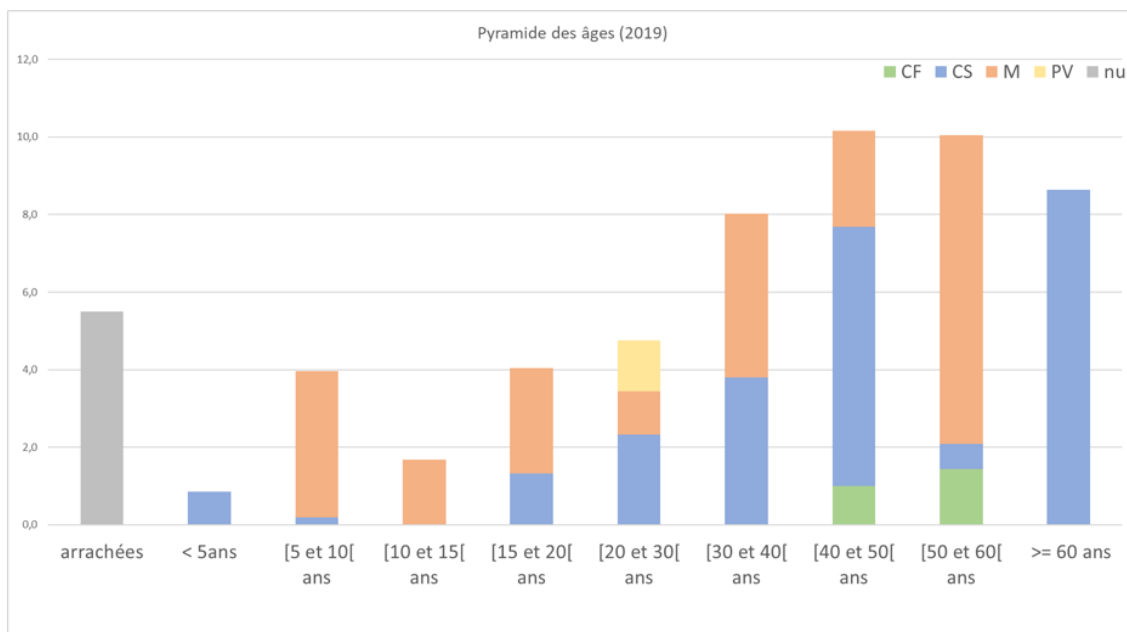


FIGURE 2.16 – Pyramide des âges (en 2019) du vignoble du Chateau Patache d'Aux.

(Figure 2.17). La production du domaine est exclusivement dédiée à la production de vin rouge en appellation *Médoc* avec le Cabernet-Sauvignon N comme cépage majoritaire (50% de la surface en 2019). Le Merlot N est également très présent sur la propriété (44%) qui compte également quelques parcelles de Cabernet franc N (4%) et Petit Verdot N (2%).

Le vignoble est actuellement planté avec i) une densité de 9090 pieds par hectare, avec un schéma de plantation de 1 m inter-rangs sur 1,10 m inter-pieds sur 44 ha (CVI) et ii) et à 5000 pieds par hectare pour un schéma de plantation de 2 m inter-rangs sur 1m inter-pieds sur 8 ha (CVI), soit une densité moyenne de 8500 pieds par hectare pour l'ensemble de l'exploitation. Actuellement 5,5 ha sont non plantés et seront replantés prochainement à 9090 pieds.ha⁻¹.

La surface moyenne des parcelles est d'environ 1 hectare avec une moyenne d'âge des vignes de 41 ans en 2019 (la parcelle la plus ancienne date de 1930). L'hétérogénéité de renouvellement et le vieillissement du vignoble (Figure 2.16) expliquent la phase de restructuration actuelle.

Travail du sol et gestion de l'enherbement

Dans le but d'arrêter l'utilisation de produits herbicides, la propriété augmente progressivement depuis 2013 les surfaces de sols travaillées mécaniquement. En 2018, le travail mécanique intégral du sol couvrait environ 24 ha des 52 ha (CVI) de la propriété. Les cavaillons travaillés mécaniquement sont entretenus par buttage et décavaillonnage et par des outils de type lames inter-ceps en saison végétative. Sur les 28 ha restants, le désherbage chimique est réalisé uniquement sous le rang. Ces herbicides sont sélectifs et non CMR (cancérogène, mutagène et reprotoxique). Les zones travaillées de la propriété correspondent aux zones de jeunes vignes les plus qualitatives de la propriété. La propriété

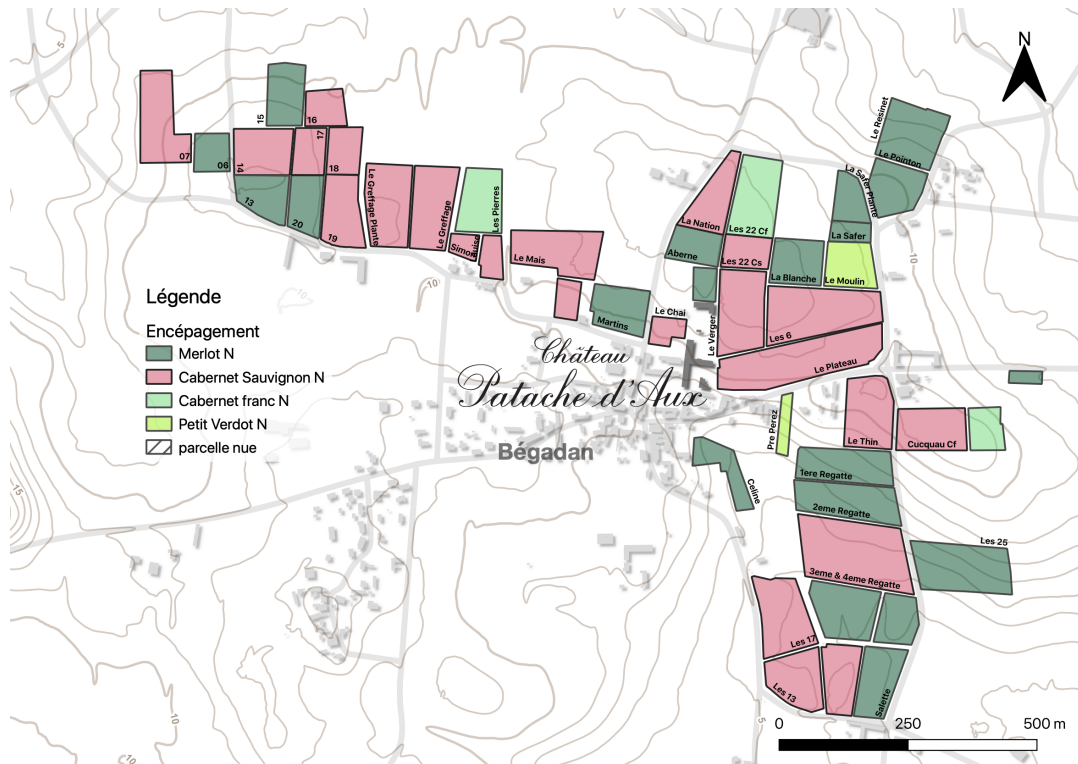


FIGURE 2.17 – Carte des parcelles du château Patache d'Aux et de leur cépage respectif.

s'est fixé l'objectif de passer en travail mécanique intégral sur la totalité du vignoble à l'horizon 2022.

Sur l'ensemble de la propriété, les inter-rangs sont entretenus par un travail mécanique (outil de type griffe) ou par tonte (gyrobroyeur) avec une gestion proche de celle du Château Capet-Guillier (cf. 2.3.1.5). Le maintien ou la destruction des couverts de l'inter-rangs en saison sont pilotés en fonction de l'âge de la parcelle, de la vigueur et du niveau de déficit hydrique en cours d'été. Sur les parcelles de vigueur élevées et à faible occurrence de contrainte hydrique, des semis d'enherbement assez concurrentiels sont semés tous les 3 à 5 ans selon l'état du couvert à base de Raygrass anglais et de fétuque rouge rasante. Ces couverts sont entretenus par tonte toute la saison. Sur les vieilles vignes présentant des équilibres végétatifs et des rendements satisfaisants et à faible occurrence de contrainte hydrique en cours de saison, les enherbements naturels maîtrisés (ENM) sont maintenus pendant l'ensemble de la campagne. Sur les jeunes vignes ou vignes de vigueur un peu faible, des semis d'engrais verts sont mis en place. Ces semis à base de céréales (orge (*Hordeum vulgare*), avoine (*Avena sativa*)) ou de céréales et légumineuses (orge ou avoine (*Avena sativa*) et vesce (*Vicia sativa*)) sont mis en place juste après les vendanges. Ils forment ainsi un couvert végétal dense pendant l'hiver dans le but de limiter les risques d'érosion et de structurer les sols. Ces semis sont ensuite enfouis avec un outil à disques au début du printemps. Sur les vieilles vignes, les céréales sont maintenues tardivement au printemps et enfouies plus tardivement en période d'été, afin de maintenir de la portance pour les machines.

2.3.2.6 Éléments de vinification au Château Patache d'Aux

Dans le processus de vinification du Château Patache d'Aux, plusieurs éléments sont redondant avec le processus décrit précédemment pour le Château Capet-Guillier (cf. 2.3.1.6). Par conséquent, seuls les éléments qui diffèrent sont détaillés ci-après.

Dates des vendanges : La décision de récolter est prise par l'ensemble de l'équipe technique (directeur technique, chef de culture et maître de chai) en collaboration avec les consultants extérieurs qui accompagnent la propriété. Deux semaines avant les vendanges puis pendant la durée des vendanges, un tour complet de chaque parcelle est effectué avec l'équipe technique et les consultants. Pour chacune des parcelles sont notés : l'état sanitaire, le rendement moyen et taille des baies, l'avancement de la maturité technologique et phénolique par dégustation des baies, un zonage à l'échelle de la parcelle si le niveau de maturité ou de qualité est hétérogène. Le chef de culture effectue lui, un tour quotidien des parcelles les plus mûres afin d'appréhender l'état sanitaire et de modifier ou non le planning de vendanges. Ces dégustations et observations sont accompagnées de prélèvements de raisin deux fois par semaine, pour partie envoyée au laboratoire pour analyse complète (indicateurs de la maturité technologique (alcool potentiel, acidité totale, pH, acide malique)).

Réception de la vendange : La vendange est faite mécaniquement sur l'ensemble de la propriété. Le Château Patache d'Aux utilisait ses propres machines à vendanger jusqu'en 2016. Depuis 2017, la direction du domaine a fait le choix de louer des machines plus modernes, qui effectuent un premier tri des baies à la récolte, en complément. Les raisins sont réceptionnés au chai par deux lignes de tri symétriques composées de :

- un conquêt de réception basculant, doté d'un bec vibrant ;
- un premier convoyeur à bande ;
- une unité de tri mécanique (Pellenc Winery ou Viniclean Socma Cube), alimentée par le convoyeur et qui procède aux opérations d'éraflage, extraction des baies trop petites et écrasées et autres débris ;
- un second convoyeur acheminant la vendange à l'étage au niveau des trappes des cuves de vinification ;
- une pompe à vendange, positionnée à l'entrée du cuvier et au même niveau que les trappes de cuve, reçoit et pousse la vendange à plat, horizontalement, dans les tuyaux jusqu'à déversement dans la cuve correspondante.

Cuvier : L'unité de vinification du château Patache d'Aux se compose de 2 chais :

- un chai avec une cuverie béton d'une capacité de 4200 hL dans lequel les vins du Château patache d'Aux sont vinifiés. Celui-ci est constitué de 35 cuves en béton brut thermorégulées similaires à celles utilisées au Château Capet-Guillier (cf. 2.3.1.6) mais de capacités supérieures allant de 75 à 175 hL.
- un chai avec 10 cuves en acier inoxydable d'une capacité totale de 2635 hL dans lequel sont vinifiés un autre cru bourgeois (qui ne concerne pas notre étude) et quelques jeunes vignes du Château Patache d'Aux.

Process de vinification et élevage : A l'encuvage, une fois la cuve remplie, la vendange est thermorégulée et ensemencée avec les levures sélectionnées. La fermentation

alcoolique démarre sans maturation pré-fermentaire. Durant toute la fermentation alcoolique, les extractions sont pilotées par remontages, pigeages et délestages¹, avec un protocole d'extraction spécifique selon le niveau de maturité et le profil du raisin de chaque cuve. Les cuves sont dégustées et les chapeaux sont observés chaque jour afin de piloter au plus juste les extractions.

Les cuvaisons varient entre 15 et 30 jours selon le profil du vin. Puis suite à l'écoulage, le pressurage est effectué avec un pressoir pneumatique. Les vins de presse sont ensuite dissociés en deux qualités.

Les fermentations malo-lactiques sont faites en cuve sans ensemencement spécifique sauf en cas de non-départ de celles-ci avant décembre. Les lots sont ensuite pré-assemblés par profil et entonnés en barriques de chêne français, à proportion de 1/3 de barriques neuves, 1/3 de barriques de 1 vin et 1/3 de barriques de 2 vins. Les élevages varient entre 10 et 14 mois selon les lots. Dans la majorité des millésimes, aucun soutirage n'est effectué pendant l'élevage. Certains lots sont élevés en cuve pour garder un profil fruité et frais, bénéfique à l'assemblage final. La proportion de bois varie entre 60 et 80% du volume.

L'assemblage final du cru bourgeois est effectué entre décembre et janvier de l'année N+2 après soutirage, et décidé par les équipes techniques en collaboration avec les consultants oenologues. Trois vins sont produits sur la propriété : le Château Patache d'Aux, le Relais de Patache, et les Chevaux de Patache.

Le vin sera ensuite mis en bouteille au château après les contrôles et analyses imposés par la réglementation.

1. Opération qui consiste à vider complètement la cuve pour ensuite réincorporer le jus par-dessus le chapeau de marc.

Chapitre 3

Caractérisation des sites d'étude

3.1 Cartographie pédologique

3.1.1 Le terroir et le vin

Le concept de « terroir » est largement utilisé, notamment dans le monde viticole. Ce concept est relié à une forte notion de qualité et de typicité des productions agricoles (Falcetti, 1994). Depuis les années 1970, les travaux scientifiques portés sur le terroir en lien avec la vigne s'attachent à établir les liens entre la qualité des raisins et les facteurs environnementaux qui peuvent impacter la vigne (Seguin, 1970, ; Duteau and Seguin, 1977, ; Morlat, 1989, ; Jackson and Lombard, 1993, ; Bohmrich, 1996, ; Deloire et al., 2005, ; Van Leeuwen and Seguin, 2006).

Selon Lebon (1993), le terroir résulte de l'interaction entre le sol et le climat. Mais le terroir est un concept plus complexe, car il fait appel à plusieurs dimensions (Vaudour, 2002) :

- une dimension centrée sur la capacité de l'environnement à fournir un milieu favorable à la vigne (Vaudour, 2002, ; Van Leeuwen and Seguin, 2006, ; Deloire et al., 2005), soit un service d'approvisionnement (Walter et al., 2015) ;
- une dimension géographique des paysages (Vaudour, 2002) ;
- une dimension humaine à travers la conscience d'appartenance et les traditions associées (Seguin, 1986, ; Vaudour, 2002, ; Van Leeuwen and Seguin, 2006) ;
- une dimension commerciale à travers la valorisation de l'image renvoyée par le terroir (Vaudour, 2002).

Depuis 2010, l'Organisation Internationale de la vigne et du vin (OIV, 2010) propose une définition large et unifiée du terroir : « *Le « terroir » vitivinicole est un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace. Le « terroir » inclut des caractéristiques spécifiques du sol, de la topographie, du climat, du paysage et de la biodiversité* ». Cette définition reste imprécise sur les dimensions spatiales considérées. Pourtant, comme le souligne Vaudour (2002), la racine latine du mot “terratorium”, étant

lui-même une déformation de “territorium”, le terroir est très fortement lié au territoire et nécessite d'en délimiter spatialement les limites. D'ailleurs, c'est en relation à cette nécessité que depuis 1935, en France, les Appellations d'Origine Contrôlée (AOC) ont été mises en place par l'Institut National des Appellations d'Origine (INAO). L'objectif était alors de garantir la provenance et la qualité des vins (Barham, 2018). A l'origine, dans ces délimitations, de nombreux zonages étaient fondés sur des limites administratives (Laville, 1993, ; Gade, 2004), exception faite des Climats de Bourgogne. Ces dernières années les directives prennent plus en compte les sols et les climats pour délimiter les terroirs (OIV, 2012).

Parmi les propositions de définition du concept de terroir, nombre d'auteurs préfèrent adopter une approche plus technique (Morlat, 1989, ; Laville, 1993). Pour ces auteurs, l'ambition est de définir le terroir à travers l'usage de critères mesurables et des variables d'état comme le climat (précipitations, températures, vent), la topographie (pente, exposition, insolation, encaissement dans le paysage) et caractéristiques géologiques et pédologiques (minéralogie, induration, granulométrie, profondeur de sol, réserve en eau, etc.). Ainsi, Laville (1993) définit l'unité de terroir naturel (UTN) comme : « *L'unité de terroir naturel est un volume de la biosphère terrestre caractérisé par un groupe spécifique de valeurs stables du relief, du climat, du sous-sol et du sol, c'est-à-dire très peu variables dans ce volume alors que ces valeurs varient brutalement en passant aux unités mitoyennes* ». Dans cette volonté d'une caractérisation technique des terroirs, Morlat (1989) proposa une méthode de caractérisation intégrée des terroirs viticoles, basée sur le concept d'Unité de Terroir de Base (UTB), méthode depuis mise en oeuvre par Morlat et al. (2001) et Bodin (2003). Cette méthode est largement basée sur la caractérisation de la nature de la roche-mère, de la caractérisation physico-chimique du sol et de l'identification des processus pédogénétiques. L'ensemble de ces paramètres étant par la suite croisés avec les caractéristiques du mésoclimat. Elle définit l'UTB comme une entité territoriale pour le fonctionnement de la vigne (Morlat et al., 2001). Carbonneau (2001) amendera ce concept en faisant ressortir la nécessité d'une plus forte considération de l'aspect viticole l'amenant à proposer l'Unité de Terroir Viticole (Viticultural Terroir Unit, VTU, Figure 3.1). Dans cette proposition, le vigneron est perçu comme un agent modifiant certaines composantes intrinsèques des VTU (lumière, température ou microclimat autour des grappes), influençant donc la qualité de la vendange et la typicité du vin. Soulignons que cette approche de VTU (Carbonneau, 2001) n'est pas en phase avec la définition proposée par Laville (1993) pour qui les pratiques humaines ne devraient pas être inclus dans le terroir. Cette opposition conceptuelle était déjà soulignée par Enjalbert (1978).

Quelle que soit la nature de l'intégration de l'activité humaine, une analyse plus pragmatique fut engagée par Vaudour (2002). Dans ces travaux, Vaudour dressa un inventaire de 47 études sur le terroir, études réalisées entre 1937 et 2001. De manière effective, la plupart de ces travaux sur le terroir se basent sur une cartographie des sols. Depuis 2002, le nombre de travaux portant sur la cartographie des terroirs a considérablement augmenté, et la plupart de ces travaux sont des études à grande échelle (étude de site et viticulture de précision) (Vaudour et al., 2015). Aujourd'hui, ces études mettent souvent à profit les outils d'analyses multivariées et les systèmes d'informations géographiques (SIG) qui permettent d'améliorer considérablement le zonage et la caractérisation des unités spatiales

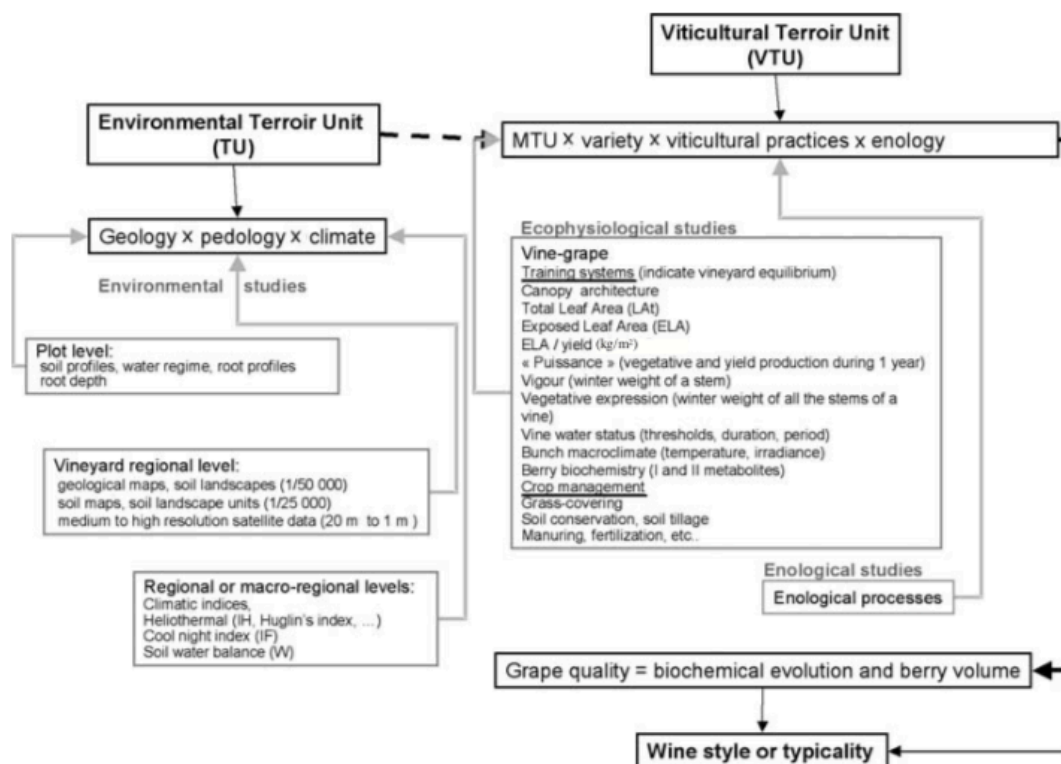


FIGURE 3.1 – Schéma conceptuel du terroir selon Deloire et al. (2005).

en confrontant des données haute résolution de diverses sources : climat, géologie, sol, topographie, etc. (Clingeffer, 2014).

3.1.2 Caractérisations pédologiques

Une des attentes du vigneron vis-à-vis de la vendange est d'encuver des lots de raisins de qualité la plus homogène possible. Là, l'objectif est souvent de mener de manière différenciée, chacune des cuvées, jusqu'à l'assemblage final. Pour autoriser cette division des cuvées, il est nécessaire de connaître le potentiel de baies de manière distribuée sur les domaines. En effet, la qualité des baies est variable à l'échelle des parcelles (Bramley and Hamilton, 2007). Aussi des prospections à grande échelle sont nécessaires pour adopter une gestion parcellaire voir intraparcellaire (White, 2003, ; Bramley, 2005). Considérant cette haute variabilité spatiale de qualité des baies en relation au potentiel pédologique, les prospections pédologiques que nous avons menées sur les deux vignobles ont été réalisées dans le but de produire une carte des sols à grande échelle (1 :2 500^{ème}).

Pour produire ces cartes, nous avons adopté une démarche de cartographie des sols fondée sur une approche de Morphopédologie, qui reprend l'adoption explicite de l'horizon pédologique comme élément morphologique structurant (Bocquier, 1971). Par ailleurs, dans notre démarche, nous avons essayé d'intégrer les effets de l'anthropisation des systèmes sur la distribution des organisations pédologiques. En effet, dans le cas des sols agricoles, les forçages anthropiques de nature agricole peuvent être catégorisés en deux classes (Follain, 2015) :

- ceux qui modifient directement les propriétés intrinsèques des sols ou indirectement via une modification des propriétés stationnelles ;
- ceux qui modifient le parcellaire, la structure de l'espace agricole et donc la géométrie et les propriétés des couvertures pédologiques (De Jong and Kowalchuk, 1995 ; Follain, 2005, 2015 ; Follain et al., 2006, 2009 ; Papendick and Miller, 1977 ; Salvador-Blanes et al., 2006).

Aussi, la prise en compte de la composante anthropique doit être envisagée sur des temps suffisamment longs pour intégrer l'effet des organisations paysagères passées les plus significatives, dont les effets seraient toujours rémanents. Dans le cadre de cette thèse, il ne s'agissait pas d'effectuer une reconstitution historique des différents parcellaires, mais d'amorcer une analyse morpho-paysagère. Nous avons donc décidé de mettre à profit les archives photographiques de l'IGN (<http://professionnels.ign.fr/>), afin d'identifier les potentielles phases de remembrement post seconde guerre mondiale. Les photographies obtenues les plus anciennes pour Capet-Guillier et Patache d'Aux datent respectivement de 1945 et 1947. Dans la mesure du possible, nous avons préféré des clichés pris au cours de la saison végétative de la vigne. Ces photographies ont été géoréférencées via le module de géoréférencement de QGIS (QGIS Development Team, 2019) puis la structure parcellaire du vignoble a été numérisée.

Dans un premier temps, nous avons levé une pré-carte des sols avec pour ambition de caractériser la variabilité pédologique globale des sites d'étude. Cette première carte a mis à profit les levées d'une première campagne de sondages des sols avec une tarière

manuelle, soit de la surface topographique jusqu'à 1,2 m de profondeur. Pendant cette campagne, les descriptions de sol, la classification des horizons et des sols ont adopté les recommandations du Référentiel Pédologique 2008 (Baize and Girard, 2009) et du guide de la FAO pour la description des sols (Jahn et al., 2006). Pendant les prospections de terrain, l'ensemble des levées ont été géoréférencées. Enfin, l'ensemble des données pédologiques et géographiques ont été saisies dans une base de données avant leur exploitation dans un logiciel de système d'information géographique (QGIS Development Team, 2019).

Dans un second temps, la pré-carte a été confrontée à une analyse morpho-paysagère intégrant les conditions de relief (géomorphologie) et la structuration du paysage (dimension anthropique). Le résultat de ce processus a été la production d'un plan d'échantillonnage de fosses pédologiques, stratifié sur la pré-carte et l'analyse morpho-paysagère. Par la suite, les fosses ont été creusées à l'aide d'une mini-pelle mécanique jusqu'à la profondeur maximale atteignable : soit la profondeur maximale de prospection de l'engin, soit la profondeur maximale locale en sol non saturée en eau. En moyenne, la profondeur des fosses réalisée est de 1,6 m. Pour chacune des fosses pédologiques, la description des fosses a également été réalisée selon les recommandations du Référentiel Pédologique 2008 (Baize and Girard, 2009) et du guide de la FAO pour la description des sols (Jahn et al., 2006). Durant ce chantier dont l'objet était de préciser l'horizonation, chaque horizon a été minutieusement décrit, puis échantillonné de manière systématique (un échantillon composite d'au moins 300 g de terre). En complément de ces échantillons pour analyse chimiques, les fosses ont fait l'objet de mesure de densité apparente (D_a) selon la méthode du cylindre (250 cm³). Au laboratoire, pour les échantillons composites, nous avons effectué une réduction du nombre d'échantillons pour des analyses géochimiques plus poussées (Table 3.1). Les échantillons non sélectionnés ont été stockés en pédothèque. Pour les échantillons sur cylindre, nous avons mené une procédure classique de séchage et pesées afin de déterminer les humidités volumiques et les densités apparentes (séchage 105°C, pendant 48h).

TABLE 3.1 : Liste des analyses physico-chimiques réalisées sur les échantillons avec les unités, incertitudes et normes associées.

Paramètre	Unité	Limite de quantification	Incertitude	Norme
Argile	g/100g	0,1	10%	NF X 31-107
Limon fin	g/100g	0,1	15%	NF X 31-107
Limon grossier	g/100g	0,1	10%	NF X 31-107
Sable fin	g/100g	0,1	10%	NF X 31-107
Sable grossier	g/100g	0,1	15%	NF X 31-107
COT	g/100g	0,5	10%	NF ISO 14235
Matière organique	g/100g	0,86	10%	Calcul : 1,72 x COT
Azote total	g/kg	0,3	10%	NF EN 13342
C/N	[-]		20%	Calcul
pH H ₂ O	[-]		2%	NF ISO 10390
pH KCl	[-]		3%	NF ISO 10390
CaCo ₃ actif	g/100g	0,2	25%	NF X 31-106

Paramètre	Unité	Limite de quantification	Incertitude	Norme
Total CaCo3	g/100g	0,2	10%	NF ISO 10693
CaO	mg/kg	5	20%	NF X 31-108
MgO	mg/kg	0,5	10%	NF X 31-108
K2O	mg/kg	0,5	20%	NF X 31-108
Na2O	mg/kg	0,5	40%	NF X 31-108
CEC (Metson)	cmol+/kg	2,5	10%	NF X 31-130
Taux de saturation	g/100g		60%	Calcul
P2O5 Dyer	mg/kg	10	10%	NF X 31-160
P2O5 JH	mg/kg	20	10%	NF X 31-161
Cu EDTA	mg/kg	1	20%	NF X 31-120
Fe EDTA	mg/kg	5	20%	NF X 31-120
Mn EDTA	mg/kg	1	10%	NF X 31-120
Zn EDTA	mg/kg	0,5	10%	NF X 31-120
Fe Oxalate	mg/kg	12,5	20%	Méthode Juste
Al Echangeable	mg/kg	25	20%	Méthode Jackson
Cd Total	mg/kg	0,25	35%	NF EN ISO 11885
Cr Total	mg/kg	0,63	30%	NF EN ISO 11885
Cu Total	mg/kg	0,63	25%	NF EN ISO 11885
Ni Total	mg/kg	0,63	20%	NF EN ISO 11885
Pb Total	mg/kg	0,63	25%	NF EN ISO 11885
Zn Total	mg/kg	0,63	25%	NF EN ISO 11885
Soufre SO4	mg/kg	2	20%	Méthode SCOTT

3.1.2.1 Plan d'échantillonnage pour le vignoble de Capet-Guillier

Avec 80 sondages manuels sur le vignoble de Capet-Guillier, la densité de tarières est proche de 6 tarières par hectare. Les prélèvements des horizons de surface ont été réalisés en 131 points, soit environ 10 points par hectares, et 32 ont été sélectionnés pour des analyses plus poussées (soit 2,4 échantillons par hectare). 16 fosses ont été ouvertes sur le vignoble de Capet-Guillier (1,2 fosse par hectare) dont la moitié a fait l'objet d'analyses géochimiques plus poussées en laboratoire (Table 3.1). 4 forages carottés ont été décrits, échantillonnés et analysés jusqu'à une profondeur maximale de 4,5 m (Table 3.2 et figure 3.2).

TABLE 3.2 : Effectifs d'observations et d'échantillons sur le vignoble de Capet Guillier.

Modalités	Horizons de surface	Carottages	Fosses	Tarières	Total
Avec analyses	32	4	8	0	44
Sans analyses	99	0	8	80	187
Total	131	4	16	80	231

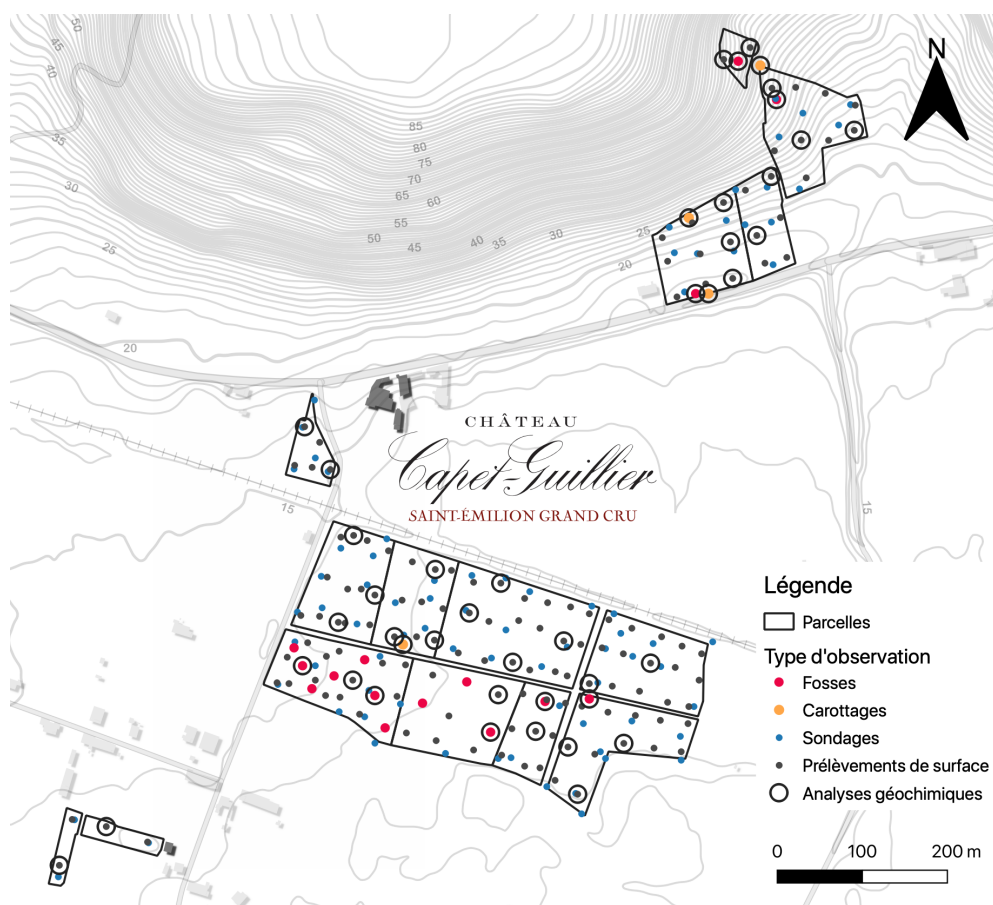


FIGURE 3.2 – Plan d'échantillonnage de Capet-Guillier.

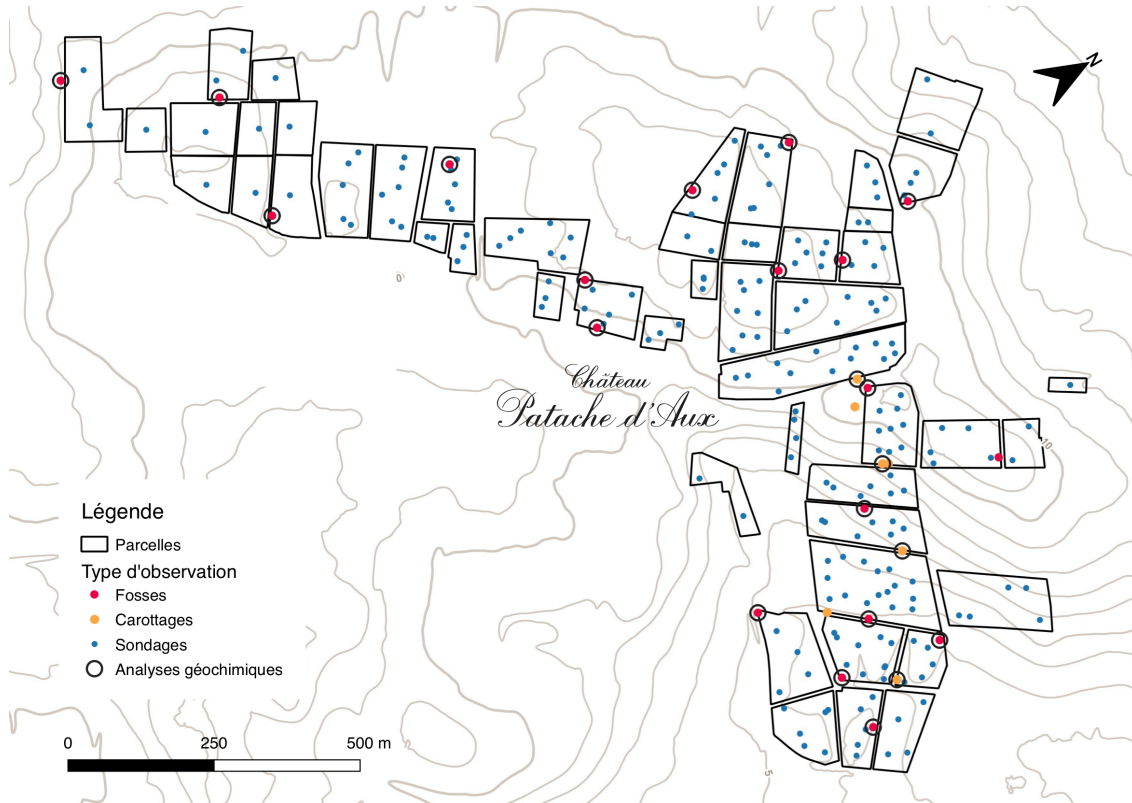


FIGURE 3.3 – Plan d'échantillonnage de Patache d'Aux.

3.1.2.2 Plan d'échantillonnage pour le vignoble de Patache d'Aux

Un total de 223 sondages à la tarière a été réalisé sur les 45,6 ha du Château Patache d'Aux, soit presque 5 par hectare. 18 fosses ont été creusées (soit une fosse pour 2,5 ha), décrites et prélevées. Les carottages sont au nombre de 7, dont 3 ont été envoyés au laboratoire pour analyses géochimiques.

TABLE 3.3 : Effectifs d'observations et d'échantillons sur le vignoble de Patache d'Aux.

Modalités	Carottages	Fosses	Tarières	Total
Avec analyses	4	18	0	22
Sans analyses	3	0	223	227
Total	7	18	223	249

3.2 Données météorologiques

Une station météorologique a été installée sur chacun des deux vignobles afin de relever les paramètres météorologiques classiques tels que les précipitations, la température, l'hu-

midité (air et sol), le vent et le rayonnement global. L'évapotranspiration de référence Penman-Monteith (ET_0) a été calculée en utilisant l'équation décrite par Allen et al. (1998). Les mesures ont démarré au mois d'avril 2019.

3.3 Caractérisation de la zone saturée du sol

L'alimentation en eau de la vigne joue largement sur la qualité et la typicité des vins (White, 2003, ; Morlat and Bodin, 2006, ; Bonfante et al., 2011, ; Brillante et al., 2016, ; Costantini et al., 2013, ; Deloire et al., 2005, ; Dry, 2016, ; Marciniak et al., 2013, ; Van Leeuwen, 2010). Pourtant le suivi de la dynamique de la nappe au cours de la saison est très peu étudié en viticulture.

L'alimentation en eau de la vigne joue largement sur la qualité et la typicité des vins (White, 2003, ; Morlat and Bodin, 2006, ; Bonfante et al., 2011, ; Brillante et al., 2016, ; Costantini et al., 2013, ; Deloire et al., 2005, ; Dry, 2016, ; Marciniak et al., 2013, ; Van Leeuwen, 2010). Pourtant le suivi de la dynamique de la nappe au cours de la saison est très peu étudié en viticulture.

Afin de comprendre comment la dynamique la zone saturée du sol impacte le sol, l'architecture racinaire de la vigne et le fonctionnement hydrique de la vigne, nous avons mis en place un système de suivi des niveaux piézométriques. Ces piézomètres ont été installés au cours des campagnes de forages mécaniques réalisés sur chacun des sites d'étude. Les forages ont été réalisés à l'aide d'une foreuse mécanique munie d'un trépan à vis jusqu'à atteindre la zone saturée. Les piézomètres sont équipés d'un tube PVC de diamètre 10 cm avec une partie crépinée sur 1 m à la base du tube. De la bentonite a été utilisée pour assurer l'étanchéité du piézomètre : à la base du forage, sous la crépine, au-dessus de la crépine, et à la surface. Sur la hauteur de la crépine, le forage est comblé par des graviers, puis les matériaux évacués par la foreuse sont utilisés pour combler le reste (Figure 3.4). Pour monitorer le niveau piézométrique en continu durant l'année, certains piézomètres ont été équipés avec une sonde pressiométrique, une sonde de température et un enregistreur de données (Rugged TROLL 100). L'enregistrement des données a débuté à la fin du mois d'octobre 2017 avec deux mesures par heure. La correction barométrique a été effectuée avec les données barométriques provenant des stations météorologiques que nous avons installées localement.

Au Château Capet-Guillier, deux piézomètres ont été installés en 2017 (Figure 3.5). P1 est situé dans le secteur de la plaine alluviale (cote +12,9 m NGF) et P3 dans le secteur du coteau (cote +16,8 m NGF). Tous deux ont été équipés avec une sonde pour un suivi continu du niveau piézométrique.

Au Château Patache d'Aux, trois piézomètres ont été installés en 2017 dans la partie Est (Figure 3.6). Les forages situés dans le reste du vignoble, plus hauts en altitude n'ont pas permis d'atteindre la nappe. F1 est le plus bas en altitude (+2,4 m NGF), il est situé dans la zone la plus basse du domaine, proche d'une zone de palus. F4 est situé un peu plus d'un mètre au-dessus (+3,8 m NGF), il est presque situé dans l'axe d'un talweg. F3 est le piézomètre le plus haut dans la topographie locale (+5,9 m), il est situé dans la

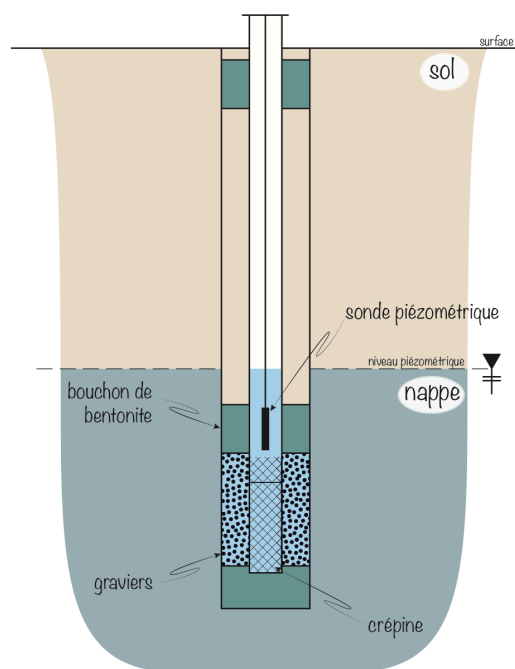


FIGURE 3.4 – Schéma d'un piézomètre équipé.

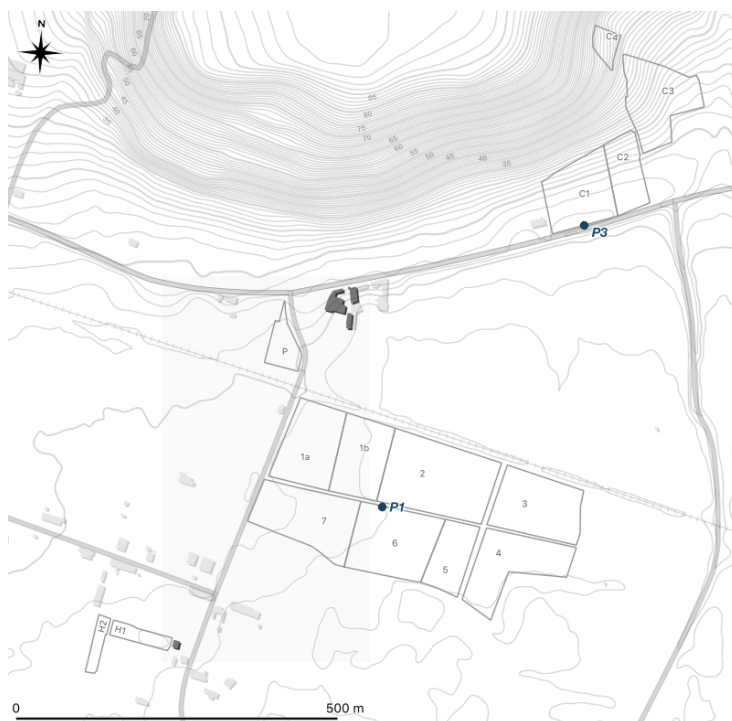


FIGURE 3.5 – Localisation des deux piézomètres équipés (en bleu) P1 et P3 au sein du vignoble de Capet-Guillier.

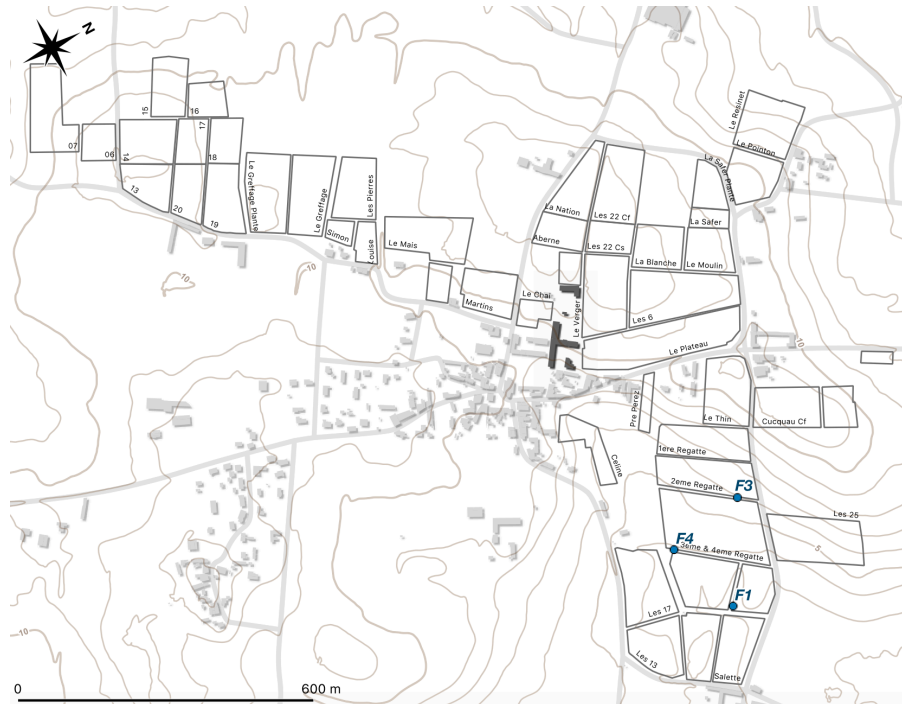


FIGURE 3.6 – Localisation des trois piézomètres (en bleu) F1, F3 et F4 au sein du vignoble de Patache d'Aux.

penne entre le secteur du plateau à l'Ouest et la zone de palus à l'Est. Ce dernier n'étant pas en eau toute l'année, seuls F1 et F4 ont été équipés pour suivi continu du niveau piézométrique.

Des prélèvements d'eau pour analyses géochimiques ont été réalisés dans les piézomètres P1 et P3 au Château Capet-Guillier, et dans les piézomètres F1, F3 et F4 au Château Patache d'Aux le 13 mars 2018. La liste des analyses réalisées sont regroupées dans la table 3.4.

TABLE 3.4 : Analyses réalisées au laboratoire des eaux de Limoges, unités et normes associées.

Paramètres	Unités	Méthodes
Carbone Organique Dissous	mg/L	NF EN 1484
Carbone Organique Total	mg/L	NF EN 1484
Titre Alcalimétrique	°f	NF EN ISO 9963-1
Titre Alcalimétrique Complet	°f	NF EN ISO 9963-1
Sodium	mg/L	NF EN ISO 14911
Potassium	mg/L	NF EN ISO 14911
Magnésium	mg/L	NF EN ISO 14911
Calcium	mg/L	NF EN ISO 14911
Bromures	mg/L	NF EN ISO 10304-1
Fluorures	g/L	NF EN ISO 10304-3
Chlorures	mg/L	NF EN ISO 10304-3

Paramètres	Unités	Méthodes
Nitrates (en NO ₃)	mg/L	NF EN ISO 10304-3
Sulfates (en SO ₄)	mg/L	NF EN ISO 10304-3
Silicates (en SiO ₂)	mg/L	Méthode interne - MO_CEP N°221
Orthophosphates (en PO ₄)	mg/L	NF EN ISO 10304-3
Fer Total	g/L	NF EN ISO 17294-2
Cadmium	g/L	NF EN ISO 17294-2
Cuivre	mg/L	NF EN ISO 17294-2

(Note : le titre alcalimétrique est exprimé en degré français (°f) et 1 °f = 3,4 mg/l d'ion hydroxyde HO⁻ = 6,0 mg/l d'ion carbonate CO₃²⁻).

3.4 Cartographie de la résistivité électrique des sols

La prospection de résistivité électrique apparaît comme une méthode très intéressante pour la caractérisation des sols (Michot, 2003 ; Samouëlian et al., 2005). Contrairement aux mesures et observations classiques qui sont intrusives, la résistivité électrique est non destructive et peut fournir des mesures continues. Les applications ont été faites dans des domaines aussi divers que l'agronomie, la pédologie, la géologie, l'archéologie et le génie civil. En agronomie, le développement des techniques de résistivité électrique se fait conjointement aux innovations en agriculture de précision grâce aux développements de l'informatique. En pédologie, l'un des enjeux majeurs de l'utilisation de la résistivité électrique est la spatialisation de variables d'intérêt pédologique telle que l'argilosité ou l'humidité.

3.4.1 Principe de la mesure

3.4.1.1 Paramètres influençant la résistivité électrique d'un sol

La résistivité électrique d'un matériau, symbolisé par la lettre ρ , correspond à sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. C'est une grandeur physique exprimée en $\Omega \cdot m$ (Ohms-mètres) qui correspond à la résistance (R en Ω) d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur (L) et d'un mètre carré de section S (Eq. (3.1)). La résistivité correspond à l'inverse de la conductivité (σ) qui représente la capacité du matériau à permettre le passage courant électrique (en Siemens par mètre, $S \cdot m^{-1}$).

$$\rho = \frac{S}{L} R = \frac{S U}{L I} = \frac{1}{\sigma} \quad (3.1)$$

Dans le sol, la matrice est généralement considérée comme isolante. Ainsi la conduction électrique est essentiellement électrolytique et se fait grâce au déplacement des ions en solution dans l'eau présente dans la porosité du sol (de Boüiard, 1965, ; Jackson, 1975, ; Michot, 2003, ; Samouëlian et al., 2005). La résistivité électrique d'un sol dépend donc de plusieurs facteurs :

- la porosité et tous ses paramètres associés (volume poral, taille et forme des pores, tortuosité et connectivité de l'espace poral),
- nature des éléments solides (minéralogie, granulométrie),
- quantité d'eau dans les pores (saturation),
- la conductivité électrique de l'eau porale (reliée à la concentration ionique),
- la température du sol.

La résistivité est influencée par la partie solide à travers la densité de charges électriques présente à la surface des grains. Ainsi la texture, et particulièrement le taux d'argile, influence la résistivité électrique du sol, alors que le sable aura peu d'influence. C'est pourquoi Archie (1942) considère tout d'abord une roche, ou un sol, sans argile et saturé pour établir la relation entre la résistivité électrique de cette roche ρ_r et la résistivité électrique du fluide poral ρ_w :

$$\rho_r = a\rho_w\Phi^{-m} = \rho_w F \quad (3.2)$$

Avec Φ la porosité de la roche, m une constante appelée "facteur de cimentation" et a une constante reliée au type de roche. Introduit par Archie (1942), F est le facteur de formation défini par $F = a\Phi^{-m}$. Ainsi lorsque la résistivité du fluide augmente ou que la porosité de la roche diminue, la résistivité du sol augmente.

Cependant le sol n'est pas toujours saturé et la porosité peut être partiellement remplie d'air, alors considéré comme isolant. Keller and Frischknecht (1966) relie la résistivité d'un sol non saturé ρ et celle d'un sol saturé ρ_{sat} à la saturation S :

$$\frac{\rho}{\rho_{sat}} = S^{-n} \quad (3.3)$$

où n est l'exposant de saturation, en général égal à 2.

La loi d'Archie (Archie, 1942) peut alors s'écrire sous la forme :

$$\rho_r = a\rho_w\Phi^{-m}S^{-n} \quad (3.4)$$

Dans les sols argileux, les charges négatives présentent à la surface des particules argileuses participent au passage du courant et contribuent à diminuer la résistivité du sol (Rhoades et al., 1976, ; Mitchell and Soga, 1993, ; Fukue et al., 1999). Ce phénomène rend les modèles simples de conduction électrique dans des sables "propres" inadaptés aux sols riches en argile. Michot (2003) a listé des modèles de plus en plus complexes développés depuis les années 1950 afin de prendre en compte l'influence de l'argile. Cependant ces modèles restent très théoriques et leurs conditions d'application restreignent leur validité et donc leur emploi.

Michot (2003) introduit dans sa thèse, deux groupes de facteurs jouant sur la résistivité du sol :

- les variables intrinsèques pérennes qui ne varient pas au cours du temps. Cela comprend la texture et le taux d'argile, la teneur en carbonates (CaCO_3), la pierrosité,

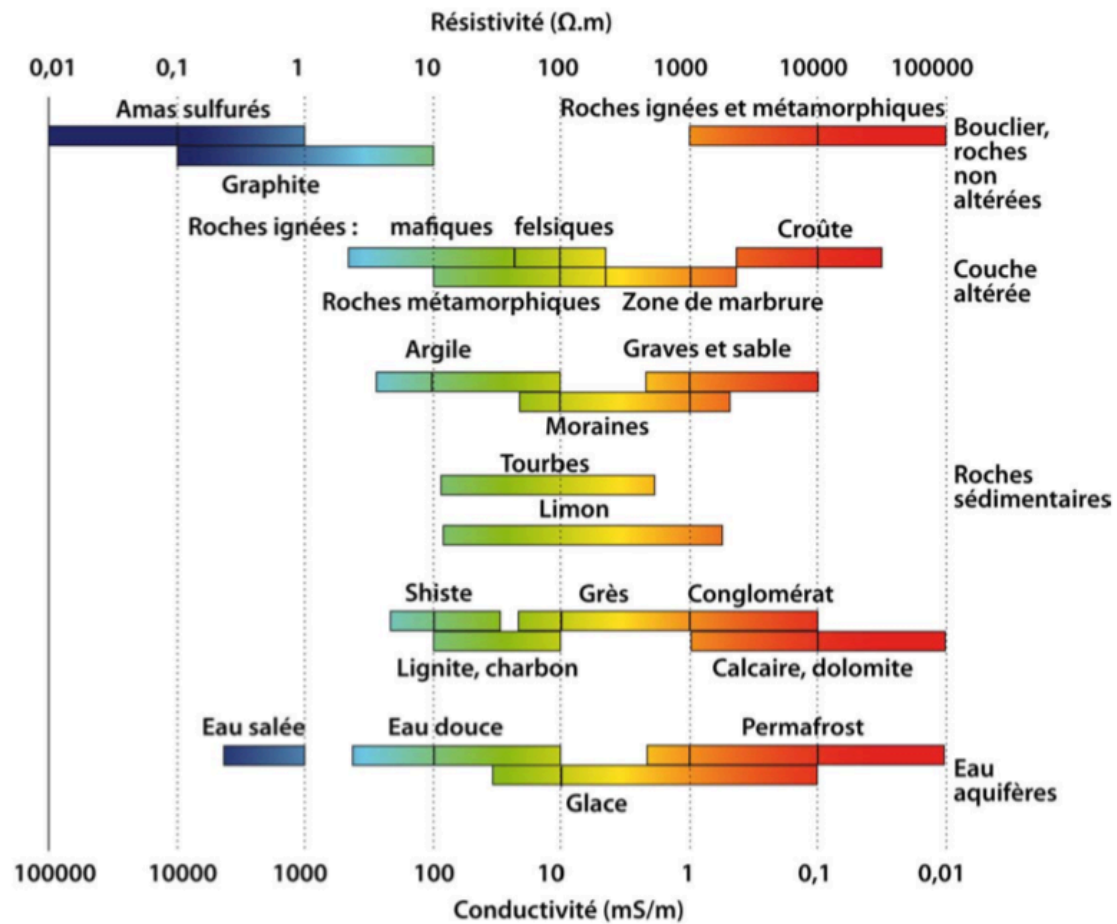


FIGURE 3.7 – Gamme de résistivités des matériaux rencontrés en géophysique (Penz (2012) adapté d'après Palacky (1988)).

la profondeur de sol et le type de substrat géologique. Généralement, lorsque la taille des constituants du sol diminue, et particulièrement lorsque le taux d'argile augmente, la résistivité électrique du sol diminue.

- les variables d'état diachroniques qui varient au cours du temps. Elles comprennent la saturation en eau, la concentration ionique de l'eau du sol, le taux de matière organique, et la température. L'augmentation de ces trois paramètres va entraîner une diminution de la résistivité.

Pour une application de cartographie en science du sol, on voit donc que les mesures de résistivité permettent de mettre en évidence une variabilité spatiale des caractéristiques intrinsèques du sol (Figure 3.7). Cependant, il est important de souligner que les mesures seront également fortement impactées par les variables d'état au moment de la prospection telles que l'humidité du sol et la température. D'où l'intérêt de porter une attention particulière aux conditions climatiques au moment de l'acquisition des données.

3.4.1.2 Application à la science du sol

Les méthodes électriques ont largement été utilisées pour mesurer la variabilité des sols, verticalement et horizontalement. Dans la littérature, la lecture de Chery (1995), Michot (2003), Samouëlian et al. (2005) et Loke et al. (2013) permet de comprendre les différentes techniques mises en oeuvre en science du sol.

Michot (2003) décrit particulièrement bien dans son premier chapitre l'historique du développement des méthodes de mesure de la résistivité électrique : initialement principalement appliquées aux sols salés dans la fin des années 1960, les mesures *in situ* étaient réalisées à l'aide de cellules en céramique munies de deux électrodes en platine puis à l'aide de quadripôles en configuration Wenner à différentes profondeurs. Ces méthodes intrusives ne permettant qu'une mesure très ponctuelle et non représentative de la variabilité des sols, une équipe de chercheurs californiens, sous l'impulsion de J.D. Rhoades a développé une technique de mesure de la conductivité à partir de quadripôles d'électrodes installés en surface.

Les méthodes de mesure de résistivité électrique présentées à la suite utilisent les quadripôles d'électrode. Le courant est injecté au niveau d'une paire d'électrodes d'injection A (pôle +) et B (pôle -), et la différence de potentiel est mesurée entre les deux électrodes de mesure : M et N. Les électrodes d'injection sont également parfois dénommées C1 et C2 (*current electrodes*), et les électrodes de mesure P1 et P2 (*potential electrodes*). Les trois principales configurations de quadripôles sont les dispositifs Wenner, Schlumberger et dipôle-dipôle, mais il existe également des configurations de type pôle-dipôle, pôle-pôle et nombreuses autres variantes (Figure 3.8). La configuration et la distance inter-électrode doit être judicieusement choisie, car la résolution des mesures et la profondeur d'investigation en dépendent. Le facteur géométrique (k) est défini pour chaque dispositif et la résistivité apparente (ρ_a) est calculée par la formule (Koefoed Otto, 1979 ; Samouëlian et al., 2005, ; Loke et al., 2013) :

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (3.5)$$

Dans le dispositif **Wenner**, l'écart inter-electrode (a) est constant (Figure 3.8) : $a = \overline{AM} = \overline{MN} = \overline{NB}$. Le facteur géométrique correspond alors à $k = 2\pi a$.

La résistivité calculée (ρ_a) est alors une résistivité apparente correspondant à une valeur de résistivité intégrée sur le volume de sol traversé par le courant électrique.

La profondeur de la mesure est liée à l'écartement entre les électrodes du quadripôle utilisé. Ainsi dans le cas d'une configuration Wenner, l'augmentation de la distance a permet d'augmenter la profondeur d'investigation. Il est communément admis que la profondeur de la mesure est entre $0,75 \times \overline{AM}$ et $\overline{AM}$ (Chery, 1995).

3.4.1.3 Cartographie des sols

Les méthodes géophysiques et plus particulièrement les méthodes électriques ont rapidement constitué un outil intéressant pour la prospection et la cartographie des sols. Les

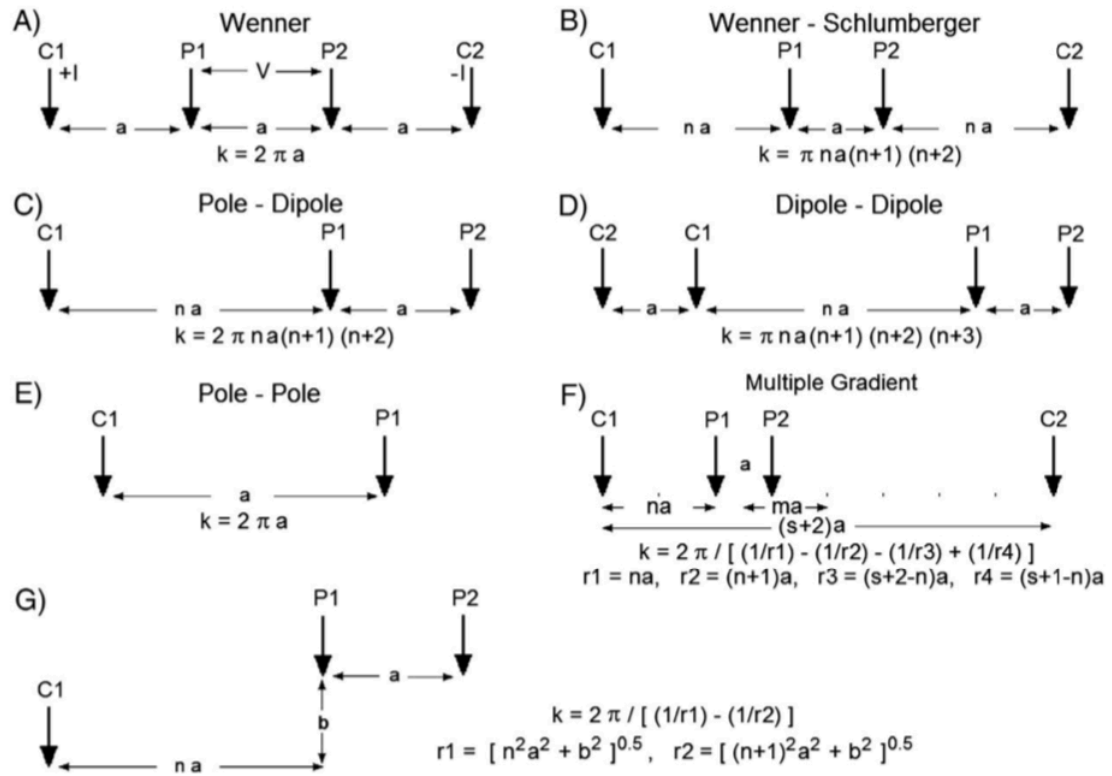


FIGURE 3.8 – Quadripôles d'électrodes couramment utilisés et leurs facteurs géométriques. British Geological Survey (c) NERC 2013 *in* Loke et al. (2013)

outils multi-électrodes permettent de décrire des variations latérales et verticales de résistivité électrique du sol (Michot, 2003). On distingue les dispositifs fixes permettant de faire des sondages 1D et de la tomographie, et les dispositifs mobiles comme le système du MUCEP (*Multipole Continuous Electrical Profiling*).

3.4.2 Tomographie par résistivité électrique (ERT)

3.4.2.1 Principe de la mesure

La tomographie par résistivité électrique (*Electrical Resistivity Tomography*, ERT), également appelée panneau électrique correspond à un système composé de n électrodes généralement alignées. Les électrodes sont reliées à un résistivimètre par un système de câbles multibrins, et le résistivimètre est équipé d'un système permettant la commutation automatique des électrodes de mesure et d'injection lors des mesures (Griffiths and Turnbull, 1985). Chaque mesure de résistivité apparente est associée au centre du quadripôle et à une profondeur proportionnelle à la distance séparant les dipôles. Les mesures sont réparties en niveaux correspondant au nombre d'intervalles entre le dipôle d'injection et le dipôle de mesure. Au cours de l'acquisition des données, le résistivimètre procède aux mesures niveau par niveau selon toutes les combinaisons possibles permises par le quadripôle choisi et calcul la résistivité apparente avec la formule (3.5).

Augmenter le nombre d'électrodes permet d'augmenter la longueur du profil mesuré ou de réduire l'espace entre les électrodes pour améliorer la résolution de la mesure.

3.4.2.2 Acquisition

Les mesures ont été réalisées sur le vignoble du Château Capet-Guillier dans l'îlot des parcelles de la partie plaine sur les parcelles 4 à 7. Les parcelles 6 et 7 alors en cours de replantation n'étaient pas palissées ce qui facilite la mise en place du dispositif, le profil étant perpendiculaire aux rangs de vigne (Figure 3.10).

La résistivité électrique a été mesurée avec un résistivimètre Syscal R2 multi-électrodes (Iris Instruments) associé avec 72 électrodes espacées de 50 cm et selon un dispositif Wenner sur une distance de 35,5 m. Chaque mesure a été faite avec 2 à 3 injections de 0,250 s avec un signal carré.

Afin de réaliser la distance totale de 450 m, nous avons réalisé des séquences de type *Roll Along*. Ce système permet d'avancer en ne déplaçant que la première moitié des électrodes optimisant ainsi le temps d'acquisition qui s'est étalé sur 4 jours entre le 13 et le 19 avril 2018 en mobilisant quatre personnes.

Au démontage du dispositif, la localisation de chaque électrode est assurée par un GPS Trimble Geo 7X avec corrections différentielles. La précision du positionnement planimétrique est de l'ordre de 1 à 2 cm en horizontal et en vertical.

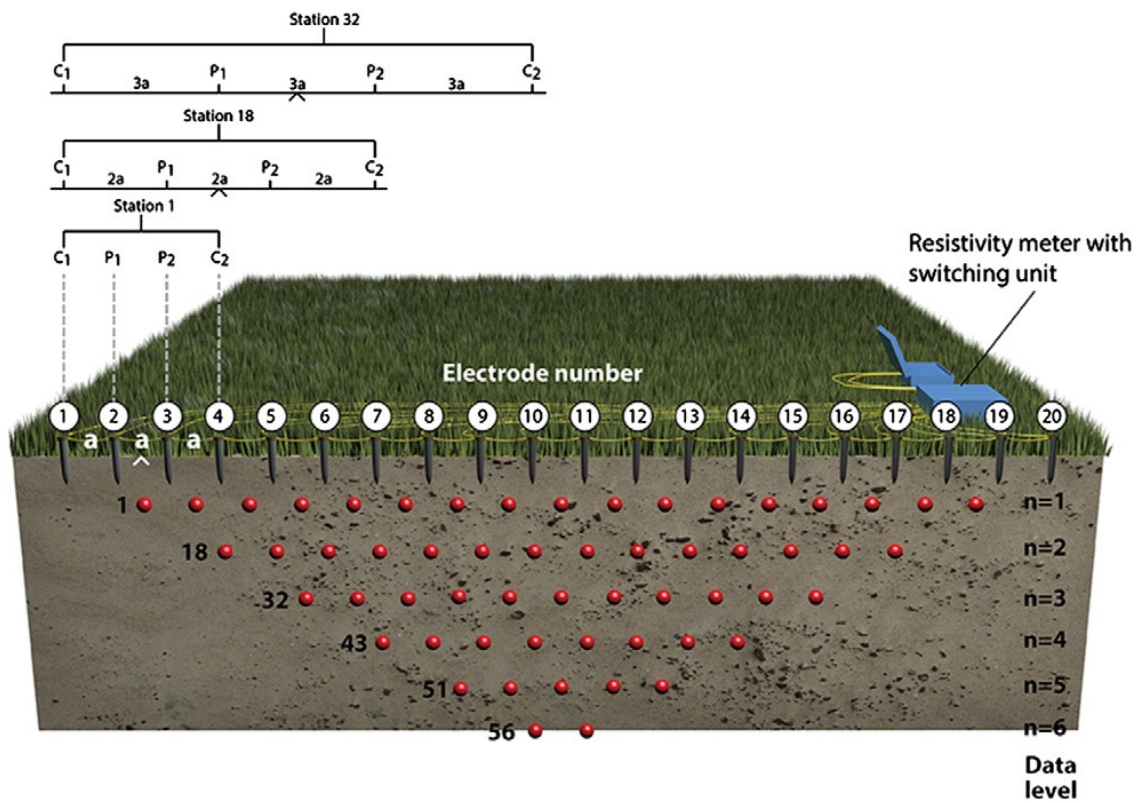


FIGURE 3.9 – Schéma d'un système multi-électrode, et une séquence de mesures pour créer une pseudosection 2D. British Geological Survey (c) NERC 2013 *in* Loke et al. (2013)

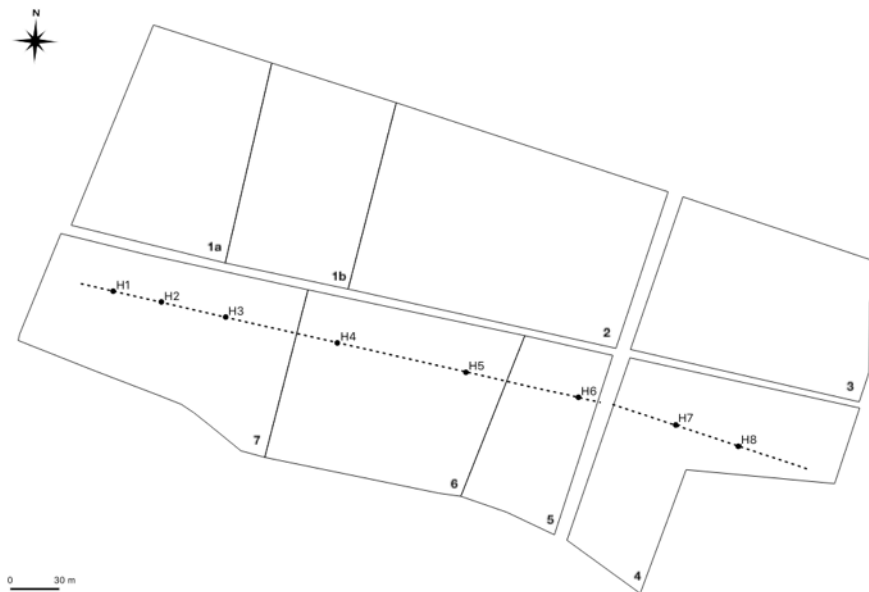


FIGURE 3.10 – Plan de prospection de l'ERT sur les parcelles du Château Capet-Guillier. En pointillés le tracé du profil, et localisation des mesures d'humidité (H1 à H8).

3.4.2.3 Mesures de la teneur en eau et estimation de la saturation

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. 3.4.1), la quantité d'eau présente dans le sol, et plus spécifiquement, le taux de saturation en eau de la porosité du sol a un fort impact sur la résistivité électrique.

Des prélèvements de sol ont été réalisés régulièrement le long du profil de tomographie (Figure 3.10). Les profondeurs d'échantillonnages sont 0-20 cm, 50-70 cm, 100-120 cm et 150-170 cm, en faisant en sorte de ne pas mélanger deux types d'horizons. Les échantillons ont ensuite été traités de la même manière que les échantillons utilisés pour la densité apparente (cf. 3.1.2). La différence de poids entre l'échantillon humide et sec permet de mesurer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Cette masse rapportée à la masse totale de l'échantillon humide permet de calculer la teneur en eau massique (ω) de ce dernier. Les densités apparentes (D_a) mesurées sur les fosses des plus proches des unités de sol, en concordance avec la carte des sols, ont été utilisées pour convertir ω en teneur en eau volumique (θ) :

$$\theta = \frac{D_a}{D_{eau}} \omega \quad (3.6)$$

La densité retenue pour l'eau est $D_{eau} = 1 \text{ g.cm}^{-3}$.

La porosité (ϕ) a été calculée avec la formule (3.7) proposée par Dane et al. (2002), en tenant compte que la densité réelle de la matrice minérale du sol (essentiellement siliceuse) peut être estimée à $D_r = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ (Blake, 2008).

$$\phi = 1 - \frac{D_a}{D_r} \quad (3.7)$$

La saturation (S_r) est ensuite estimée par la formule (3.8) :

$$S_r = \frac{\theta}{\phi} \quad (3.8)$$

3.4.2.4 Inversion de la résistivité

Les données une fois extraites du résistivimètre sont chargées dans un ordinateur. Pour chaque mesure, la position des électrodes utilisées est indiquée, on peut donc en déduire le niveau de chacune ainsi que sa pseudoprosfondeur. Les mesures peuvent alors être représentées en 2D sur une pseudosection avec sur l'axe X la direction de progression du profil, et en Z la pseudoprosfondeur en niveaux. Cependant, ce type de représentation donne une image approximative et déformée de la distribution des résistivités du sol. En effet, la profondeur effective de la mesure dépend de la position relative des électrodes d'injection et de mesure. Cependant, la profondeur d'investigation effective est également liée à la nature des matériaux sous la surface, car une couche conductrice réduit la profondeur d'investigation (Samouëlian et al., 2005). De plus, le sol n'étant pas un milieu homogène,

la résistivité mesurée correspond à une valeur moyennée intégrant les hétérogénéités du sol jusqu'à la pseudoprofondeur d'investigation.

Une bonne interprétation des données n'est possible qu'après inversion. Le principe de l'inversion est de déterminer un modèle qui se rapproche au mieux des mesures de résistivité apparente. Ce modèle sera utilisé pour estimer les valeurs de résistivité dite "vraie" (ou "inversée") aux profondeurs réelles, par opposition à la pseudoprofondeur attribuée à la résistivité apparente.

L'inversion des données a été réalisée avec le logiciel *Res2DInv* 3.55 (GEOTOMO SOFTWARE SDN. BHD., Gelugor, Penang, Malaysia). Préalablement, une correction de la côte et de l'altitude des électrodes a été réalisée à partir des relevés faits par GPS afin de limiter les erreurs induites par la topographie.

3.4.3 Mesures de résistivité apparente par traîné électrique (MUCEP)

Dans le cadre d'une application à la cartographie des sols, la mesure de résistivité par MUCEP constitue une méthode intéressante. En effet, le système d'électrodes traînées diminue significativement le temps d'acquisition et permet de couvrir une surface significative en une journée de travail (1 à 10 ha) (Dabas et al., 1989).

L'acquisition de données de résistivité par traîné électrique nécessite un matériel spécifique développé seulement par quelques sociétés spécialisées. Nous avons donc dû faire appel à la société GéoCarta afin de réaliser ces mesures.

Le matériel fourni par GéoCarta a été monté sur un tracteur inter-rang au Château Capet-Guillier et sur un enjambeur au Château Patache d'Aux. Il s'agit d'un dispositif ARP (*automatic resistivity profiler*), évolution du MUCEP développé par Panissod et al. (1997). C'est un dispositif tracté à 4 paires d'électrodes : une paire d'électrodes d'injection à l'avant et 3 paires d'électrodes de mesures avec des écartements différents : 0,5 m ; 1 m ; 2 m. Les électrodes sont reliées à un résistivimètre qui est lui-même piloté par un ordinateur embarqué contrôlant l'acquisition et la mémorisation des données (Figure 3.11). La localisation des mesures est assurée par un GPS StarFire iTC avec corrections différentielles SF II. La précision du positionnement planimétrique est de l'ordre de 10 cm. Les résistivités apparentes mesurées par les trois paires d'électrodes sont enregistrées sous forme de trois voies différentes (V1, V2 et V3) correspondant à des profondeurs de prospection croissantes.

Les mesures sont effectuées dans les rangs de vigne avec un espacement de 6 m entre chaque rang de mesure. Le GPS a été configuré pour prendre une mesure par seconde, et la résistivité est mesurée tous les 10 cm dans le rang.

Pour des raisons techniques, la paire d'électrodes de mesures correspondant à V2 n'a pas pu être installée sur l'enjambeur du Château Patache d'Aux. Cette contrainte limite donc les mesures aux voies 1 et 3.

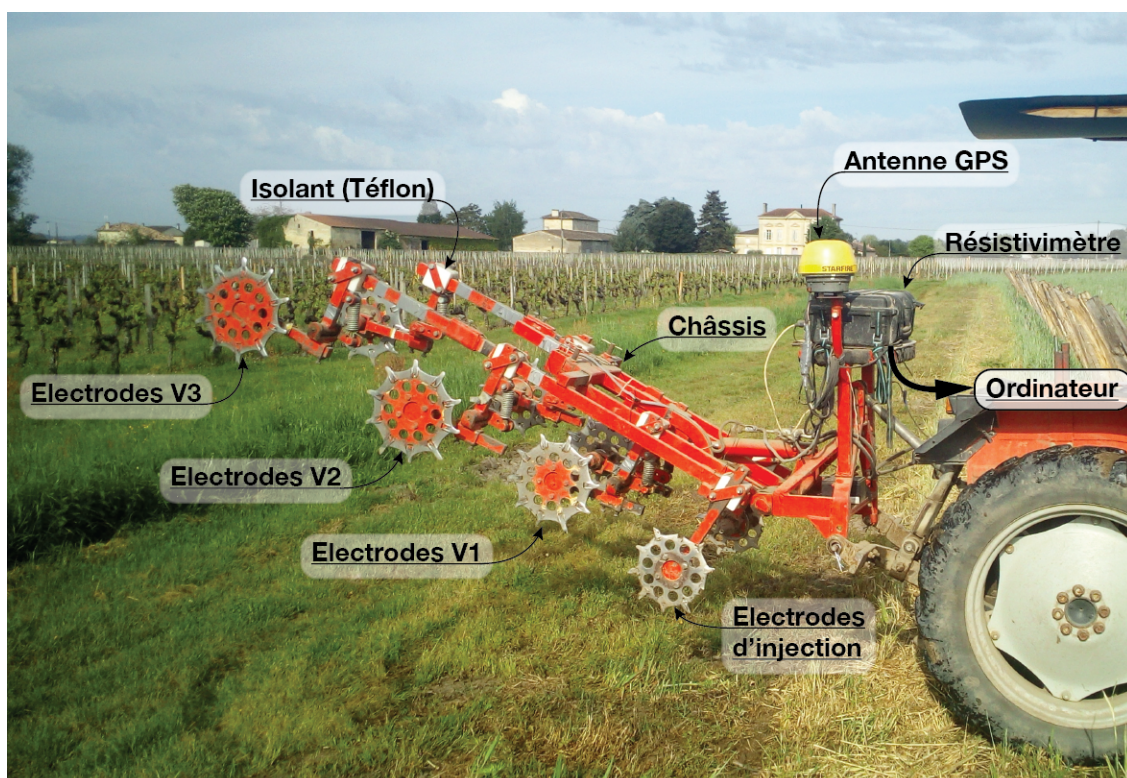


FIGURE 3.11 – Installation du MUCEP sur le tracteur inter-ligne.

Chapitre 4

Facteurs environnementaux et qualité du vin

Cette partie de ce mémoire de thèse a fait l’objet d’une publication dans la revue *Science of the Total Environment*. Le titre de cet article est “Identification des facteurs environnementaux contrôlant la qualité du vin — Cas du Château Capet-Guillier, AOP Saint-Emilion Grand Cru” (en anglais “*Identification of environmental factors controlling wine quality : A case study in Saint-Emilion Grand Cru appellation, France*”), il est visible en accès libre en ligne : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133718>.

Pour faciliter la lecture du mémoire, une version française de l’article est présentée dans ce chapitre. Pour des raisons de publication, la classification des sols utilisée dans l’article est la *Word Reference Base for Soil Ressources* (WRB) plus reconnue à l’international que le Référentiel Pédologique. Nous avons conservé la version originale des figures qui sont donc en anglais dans cette version, et les figures et tables additionnelles dans l’article original ont été incorporées.

4.1 Introduction

Le sol est un élément clé de la production viticole (White, 2003) et une composante principale du concept de terroir (Deloire et al., 2005, ; Van Leeuwen et al., 2004, ; Vaudour, 2002), même si les relations entre les caractéristiques sensorielles du vin et les caractéristiques géologiques ou pédologiques ont été largement discutées (Maltman, 2008, ; Matthews, 2016). La relation de base entre le vin et le sol est basée sur les besoins en eau et en nutriments de la vigne (White, 2003). La variabilité des sols dans l’espace, le temps et les interactions sols-climat sont les principaux facteurs de différenciation du terroir à grande échelle spatiale (Costantini et al., 2018, ; Costantini et al., 2015, ; Garcia et al., 2018, ; Priori et al., 2019, ; Rodrigo-Comino, 2018, ; Vaudour, 2002). Pour une résolution spatiale plus fine, les effets humains sont essentiels ; avec le temps, la structure du paysage humain et les pratiques à court terme peuvent modifier considérablement les propriétés pédologiques et la variabilité à l’échelle d’une placette de terrain (Costantini et al., 2015)

tout en affectant la dynamique de l'eau et du carbone et donc l'érosion du sol (Costantini et al., 2018, ; Garcia et al., 2018).

Les caractéristiques du sol, telles que le pH et l'apport en nutriments, sont principalement dérivées des roches géologiques et sont critiques pour la croissance des vignes et la qualité du vin (Kodur, 2011, ; Retallack and Burns, 2016). La relation entre la teneur en éléments nutritifs du sol et la qualité du vin varie selon la physiologie de la vigne et les interactions environnementales (Blotevogel et al., 2019, ; Garcia et al., 2001, ; Mackenzie and Christy, 2005). L'ajout de la dynamique de l'eau aux propriétés physiques du sol module la disponibilité en eau et l'architecture des racines de la vigne, et donc la composition en eau et en nutriments (Morlat and Bodin, 2006). Cette complexité des études sur les éléments nutritifs explique pourquoi la majorité des travaux sur les interactions sol-vin ont porté sur les relations de l'état hydrique. La principale conclusion de ces études est que la qualité du vin rouge est souvent associée à un déficit hydrique modéré (Bonfante et al., 2011, ; Brillante et al., 2016, ; Costantini et al., 2013, ; Deloire et al., 2005, ; Dry, 2016, ; Marciniak et al., 2013).

Une partie de la complexité pour les vignerons dans l'élaboration de vins de qualité réside dans l'adaptation de leurs pratiques aux conditions et spécificités du terroir dans l'espace et le temps. A l'avenir, l'adaptabilité des pratiques vitivinicoles sera une question clé pour l'adaptation des appellations viticoles aux changements climatiques tels que prévus par les projections du changement climatique futur (IPCC, 2014). Les variations climatiques et les spécificités sont déjà reconnues comme les principaux facteurs contrôlant la maturation, l'arôme et la coloration du raisin (Baciocco et al., 2014, ; Camps and Ramos, 2012, ; Jones and Davis, 2000, ; Tonietto and Carbonneau, 2004, ; Van Leeuwen et al., 2004), qui font partie de l'identité du vin. Cependant, le succès de cette adaptabilité suppose une bonne compréhension des interactions entre le sol, le climat et la vigne.

La connaissance des facteurs environnementaux qui modulent le fonctionnement du sol et qui contrôlent la production de vin de qualité fait défaut, ce qui constitue une lacune potentielle pour l'adaptabilité future (Hannah et al., 2013). En général, les études axées sur les nutriments portent sur les horizons superficiels du sol, alors que les systèmes racinaires de la vigne prospectent de grands volumes à la fois dans les horizons organo-minéraux et minéraux du sol (Archer and Saayman, 2018). De plus, les études axées sur l'eau tiennent compte de la disponibilité de l'eau à l'échelle du profil de sol ou pour des conditions pédologiques théoriques sans tenir compte des conditions limites d'entrée et de sortie ni de la dynamique du niveau des nappes phréatiques. Pour ces raisons, nous proposons que les études futures couplent les études sur les nutriments et l'approvisionnement en eau en se basant sur une description fine et une analyse du profil pédologique, de l'horizon de surface à la profondeur d'enracinement maximale comme proposé par Costantini and Bucelli (2014).

L'objectif de cette étude était d'identifier les facteurs environnementaux qui contrôlent à la fois l'apport en nutriments et l'approvisionnement en eau de la vigne et affectent ensuite la qualité du vin rouge. Tout d'abord, nous avons réalisé des études pédologiques à haute résolution intégrant les propriétés physico-chimiques, les observations des racines de vigne et la dynamique de profondeur de nappe phréatique sur un vignoble de Saint-Emilion

Grand Cru. Ensuite, nous avons analysé les résultats sur la base d'une stratification à partir d'une carte de qualité des vins élaborée par le vigneron du domaine. Enfin, nous avons discuté et proposé un modèle conceptuel pour la disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs en tenant compte de la profondeur totale du profil du sol et en intégrant les conditions limites induites par les différentes conditions environnementales.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Site d'étude

L'étude a été réalisée sur l'aire d'appellation Saint-Emilion Grand Cru (Figure 4.1), qui fait partie de la zone viticole bordelaise. L'appellation Saint-Emilion Grand Cru (Appellation d'Origine Contrôlée - AOC) s'étend sur neuf communes de 5 500 ha de vignes (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2017b)). Un décret officiel autorise cinq cépages : Merlot (60%), Cabernet franc (30%), Cabernet sauvignon (10%), Malbec et Carmenere (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2017a)). Dans cette aire d'appellation, le site d'étude est le vignoble du Château Capet-Guillier, situé sur le territoire du village de Saint-Hippolyte (44°52'27" N ; 0°7'9" O), à 5 km à l'Est de Saint-Emilion. Le Château Capet-Guillier est un vignoble d'environ 13 ha en production, qui produit du vin rouge à partir de trois cépages : Merlot (85%), Cabernet franc (5%) et Malbec (10%). Les parcelles ont une superficie moyenne de 1 ha ($\pm 0,57$ ha d'écart-type) et sont situées en pied de pente exposée sud (figure 2.10).

Le cépage principal est le Merlot N associé à deux porte-greffes : *101-14 Millardet et de Grasset* (101-14 MGt) et *Riparia Gloire de Montpellier*. La densité moyenne de plantation sur le site d'étude est de 6 745 ceps par hectare avec un inter-rang de 1,45 m ou 1,50 m. Les inter-rangs sont utilisés avec des cultures de couverture et des cultures de services (*Avena sativa*, *Secale cereal* et *Vicia sativa*). Les opérations typiques de travail du sol sont (i) le travail du sol en profondeur, comme le labour en profondeur à des profondeurs d'environ 0,5 m au moment du pré-semis, (ii) le travail du sol en surface à une profondeur de 0,10 m, comme le griffage pendant toute la saison et (iii) le désherbage mécanique à 0,2 m en profondeur à l'aide d'un outil à disques, afin de préparer le prochain semis de la culture de service en novembre. Une fertilisation d'entretien annuelle à base d'engrais organiques a été réalisée par le vigneron. Selon les besoins de chaque parcelle de vigne, la quantité appliquée peut varier de 300 à 400 kg.ha⁻¹.

La géologie de l'appellation Saint-Emilion (1 :50 000) a été cartographiée par le BRGM (Dubreuilh, 1995). Cette carte montre une formation calcaire (calcaire d'Asteries) qui est recouverte de sédiments tertiaires et constitue le relief du plateau. Ce plateau a été façonné par trois rivières, la Dordogne, l'Isle et la Barbanne, qui coulent dans les sédiments tertiaires. Les couches géologiques plus profondes, sous le calcaire d'Asteries, comprennent le calcaire et l'argile de Castillon, qui constituent la partie supérieure du système de pente. La partie inférieure de la pente est formée par les Molasses du Fronsadais (une formation calcaire composée de sable, de limon et d'argile) affectées par des colluvionnements dans la partie inférieure. Au sud se trouve une plaine alluviale, formée par la Dordogne pendant

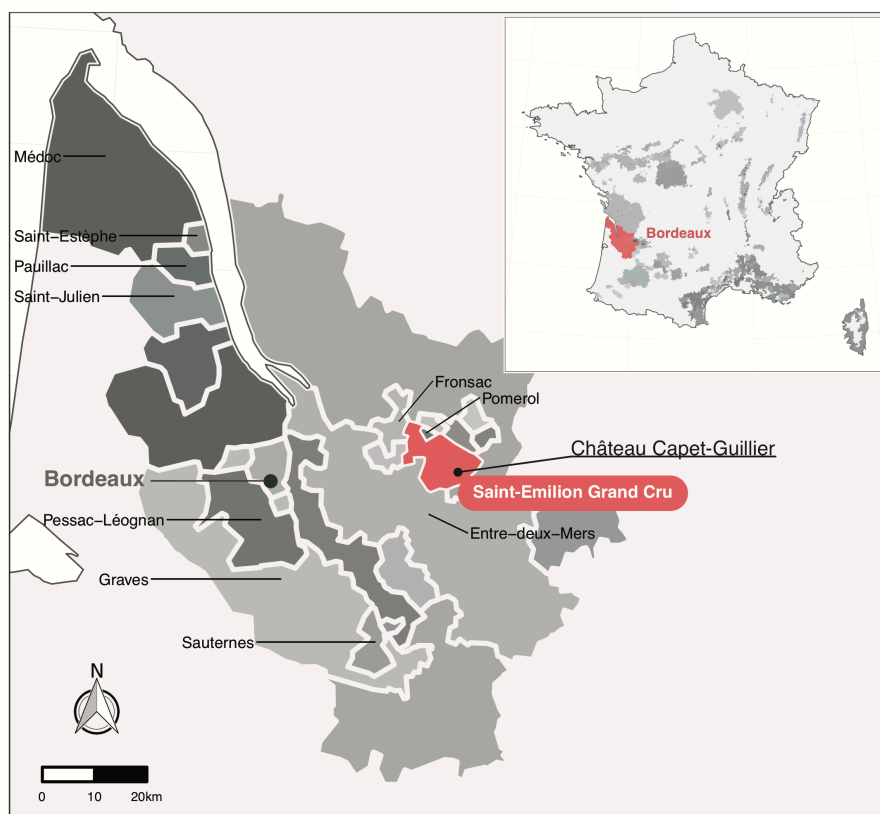


FIGURE 4.1 – Localisation du site d'étude : Château Capet-Guillier en appellation Saint-Emilion Grand Cru.

la période quaternaire. Les sédiments alluviaux associés sont principalement des sables avec des terrasses de gravier clairsemées (Dubreuilh, 1995). Les parcelles du Château Capet-Guillier sont situées sur différentes formations géologiques : des formations calcaires tertiaires sur le système de coteaux aux alluvions sableuses quaternaires sur le système de plaine.

Une carte pédologique de l'appellation Saint-Emilion (1 :25 000) a été réalisée par Van Leeuwen et al. (1989). La carte proposait la catégorisation de la diversité des sols en fonction des zones géomorphologiques. La classification des sols utilisée par Van Leeuwen a été transformée en classification WRB (IUSS Working Group WRB, 2015). La carte avec la nouvelle classification des sols définit deux zones géomorphologiques sur le périmètre du vignoble du Château Capet-Guillier : (i) le système de pente avec des Calcaric Cambisols à limons fins, et (ii) le système de plaine avec des Calcaric Cambisols, des Calcaric Cambisols (arenic) et des Epicalcaric Stagnosols (clayic) (IUSS Working Group WRB, 2015).

Le climat de la région est océanique tempéré, classé *Cfb* dans la classification Köppen (Peel et al., 2007). Selon les données de la station météorologique de Mérignac (44°49'48" N ; 0°41'2" E) de *MétéoFrance* pour la période 1981-2010, les hivers sont doux et pluvieux, les étés modérément chauds et secs avec des précipitations moyennes de 944 mm par an et une température annuelle moyenne de 13,8°C. La variabilité climatique interannuelle est relativement élevée et implique un fort effet millésime sur les vins (Bois et al., 2008). Un diagramme ombrométrique (Figure 2.5) montre que les précipitations sont réparties tout au long de l'année sans période sèche significative en été.

4.2.2 Collecte de données

4.2.2.1 Prospections pédologiques

La prospection pédologique (Figure 3.2) a été réalisée pour obtenir une carte pédologique à haute résolution (1 :2 500). Tout d'abord, une carte de base a été produite à l'aide d'une tarière jusqu'à 1,2 m de profondeur, avec une densité spatiale de six tarières par hectare. Chaque sondage à la tarière a été décrit et échantillonné selon les règles de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) pour la description des sols (Jahn et al., 2006). Ensuite, l'horizon et les types de sols, identifiés sur le terrain, ont été classés selon la base de référence mondiale (IUSS Working Group WRB, 2015). Afin d'affiner cette carte de base, trois autres types d'observations ont été inclus : (ii) quatre carottes mécaniques, qui ont été forées, décrites et échantillonnées jusqu'à une profondeur maximale de 4,50 m, et deux ont été transformées en piézomètres permanents et utilisées pour surveiller le niveau de la nappe phréatique ; et (iii) 15 fosses pédologiques ont été creusées pour décrire les principaux traits morphologiques du sol et pour échantillonner avec précision le volume du sol dans chaque type de sol. La profondeur moyenne des fosses était de 1,60 m. Pour toutes ces stratégies d'échantillonnage du sol, tous les échantillons prélevés ont été séchés à l'air (48 h à 40 °C) et passés à travers un tamis de 2,0 mm pour la détermination préalable des paramètres chimiques classiques. La densité apparente des différents horizons a été mesurée par échantillonnage de la carotte de sol (5 cm de haut,

8 cm de diamètre). L'abondance, la taille et l'orientation particulière des racines ont été décrites selon la méthodologie donnée par la directive de la FAO (Jahn et al., 2006).

4.2.2.2 Données climatiques et indice météorologique

Deux séries de données météorologiques différentes ont été utilisées dans cette étude. La première série provenait de la station météorologique régionale de Mérignac (44°49'48" N ; 0°41'24" E) du Service météorologique national français (*MétéoFrance*). Cette série fournit des données quotidiennes à partir de 1920. La deuxième série provenait d'une station météorologique locale sur le site d'étude (Davis®). Cette station a été installée dans la plaine alluviale en avril 2017 et enregistre des données horaires. Elle permet d'enregistrer et de calculer des paramètres météorologiques classiques tels que les précipitations, la température, l'humidité (air et sol), le vent et le rayonnement global. L'évapotranspiration de référence Penman-Monteith (ET_0) a été calculée en utilisant l'équation décrite par Allen et al. (1998).

Pour analyser les caractéristiques climatiques en rapport à la production viticole, des indices climatiques classiques couramment utilisés dans les sciences de la vigne ont été utilisés (Tonietto and Carbonneau, 2004) : l'indice héliothermique (*Heliothermal Index*, HI), l'indice nuit fraîche (*Cool Night Index*, CNI), et l'indice de sécheresse (*Dryness Index*, DI).

Le HI, décrit par Huglin, est un indice de chaleur bioclimatique développé pour le vignoble. Comme l'indice de Winkler (Winkler et al., 1974), il s'agit d'un indicateur de la somme des chaleurs, corrigée par un coefficient de la durée du jour lié à la latitude. Le calcul de l'indice utilise à la fois la température moyenne journalière (°C) et la température maximale journalière (°C), toutes deux réduites d'une température de référence (10 °C pour la vigne) (Huglin, 1978). Nous avons calculé l'HI quotidienne d'avril à septembre avec un coefficient de latitude $d = 1.04$ suivant les données et l'équation (Eq. (4.1)) donnée par Tonietto and Carbonneau (2004). T_m est la température moyenne de l'air (°C), et T_x est la température maximale (°C).

$$HI = \sum_{01.04}^{30.09} \frac{(T_m - 10) + (T_x - 10)}{2} \cdot d \quad (4.1)$$

Le CNI prend en compte les températures nocturnes minimales moyennes (°C) pendant le mois précédant la récolte, lorsque les baies mûrissent (Eq. (4.2)). L'objectif de cet indice est d'évaluer le potentiel qualitatif des régions viticoles, notamment en ce qui concerne les métabolites secondaires du vin. Dans l'hémisphère nord, le mois de septembre a été choisi pour calculer le CNI (Tonietto and Carbonneau, 2004).

$$CNI = \text{average minimum air temperatures in September (°C)} \quad (4.2)$$

Le DI a également été calculé selon la méthode donnée par Tonietto and Carbonneau (2004) (Eq. (4.5)). Cet indice évalue la demande climatique d'un vignoble standard sans

ruissellement et sans évaporation du sol nu. Comme pour le HI, le DI a été calculé d'avril à septembre. Premièrement, E_S et T_V ont été calculés mensuellement selon le calcul décrit par Tonietto and Carbonneau (2004) : (i) E_S est l'évaporation directe du sol (mm) pour la durée considérée (Eq. (4.3)), où ET_0 est l'évapotranspiration mensuelle de référence selon la méthode Penman (Penman, 1948), N est le nombre de jours du mois, k est lié à l'architecture des vignes et varie avec l'augmentation de la superficie des feuilles en saison : $k=0.1$ en avril, $k = 0,3$ en mai et $k = 0,5$ de juin à septembre (dans l'hémisphère nord), et JP_m est calculé en utilisant le total des précipitations du mois en mm divisé par 5 (correspondant à une estimation du nombre de jours d'évaporation effective, donc doit être $\leq N$). (ii) T_V est la transpiration potentielle dans le vignoble (mm) pour la durée considérée (Eq. (4.4)). Le DI est basé sur un calcul du bilan hydrique (Eq. (4.5)), où W_0 est une valeur initiale théorique de l'eau (200 mm), P est la quantité totale de précipitations (mm) pour la durée considérée.

$$E_S = \frac{ET_0}{N} \cdot (1 - k) \cdot JP_m \quad (4.3)$$

$$T_V = ET_0 \cdot k \quad (4.4)$$

$$DI = W_0 + \sum_{01.04}^{30.09} P - E_s - T_V \quad (4.5)$$

4.2.2.3 Surveillance des eaux souterraines

Deux piézomètres équipés (4,50 m de profondeur) ont été installés en 2017, un dans chaque secteur géomorphologique (Figure 4.3). Le premier est situé dans le secteur de la plaine alluviale (P1, cote +12,9 m NGF) et le second dans le secteur du coteau (P3, cote +16,8 m NGF). Tous deux ont été fournis avec une sonde de pression et un enregistreur de données (*Rugged TROLL 100*). La surveillance de l'enregistrement des données a commencé en novembre 2017 avec deux mesures par heure. La correction barométrique pour les piézomètres a été effectuée avec les données barométriques de la station météorologique installée.

4.2.2.4 Estimation de l'eau disponible de la vigne

Compte tenu de l'influence de l'approvisionnement en eau sur la qualité des baies, nous avons estimé la quantité d'eau disponible (*Available Water Content*, AWC) pour la vigne, à partir des propriétés du sol déterminées dans les fosses (tableau 1). Les calculs ont été effectués à l'aide des fonctions de pédotransfert de Bruand et al. (2004), qui estiment les humidités caractéristiques des horizons en fonction de la texture, de la densité apparente et du type d'horizon (organo-minéral ou minéral) (cf. 4.3.3 et Table 4.3). Ensuite, l'AWC a été estimée en intégrant différentes conditions de la zone racinaire : (i) C-AWC, AWC calculée à la profondeur conventionnelle de 1,0 m, et (ii) P-AWC, AWC potentielle calculée en fonction de la profondeur d'enracinement potentielle maximale observée dans les

fosses du sol. De plus, compte tenu des limites associées au calcul de la AWC (Lacape et al., 1998, ; Pellegrino et al., 2004, ; Ratliff et al., 1983), nous avons également calculé l'eau transpirable totale du sol (*Total Transpirable Soil Water*, TTSW) selon la formule (Eq. (4.6)) développée par Bertrand et al. (2018), qui prend en compte la profondeur de la densité racinaire maximale et considère la capacité des racines à extraire l'eau à un potentiel hydrique différent du point théorique du flétrissement (*wilting point*) (Pellegrino et al., 2004, ; Ratliff et al., 1983).

$$TTSW = \int_0^{Erd} (\theta_{fc}(z) - \theta_{minus}(z)).dz \quad (4.6)$$

Avec Erd la profondeur d'enracinement ; $\theta_{fc}(z)$ l'humidité de capacité de champ pour chaque horizon de sol estimée en utilisant les fonctions de pédotransfert par Bruand et al. (2004) selon la texture du sol et la densité apparente ; $\theta_{minus}(z)$ le seuil minimum d'humidité du sol pour chaque horizon sous lequel la vigne ne peut plus extraire l'eau. Les valeurs de θ_{minus} dépendent des caractéristiques du sol et des plantes. Les valeurs que nous avons utilisées pour la vigne ont été estimées suivant le protocole de paramétrage BISWAT tel que suggéré dans Bertrand et al. (2018) : les auteurs fournissent un modèle simple utilisant deux paramètres α et β pour calculer θ_{minus} depuis $\theta_{wilting\ point}$: α étant le paramètre de la plante en relation avec son caractère anisohydrique, la valeur utilisée est 1,4 pour la vigne selon les mesures d'humidité présentées par Pellegrino et al. (2004) ; β correspondant à la profondeur à partir de laquelle la densité des racines commence à diminuer. Selon ce modèle, θ_{minus} est calculé comme suit :

- (i) de la surface à la profondeur β : $\theta_{minus} = \alpha.\theta_{wilting\ point}$
- (ii) de la profondeur β à la profondeur Erd (profondeur d'enracinement) : θ_{minus} augmentation linéaire jusqu'à $\theta_{field\ capacity}$.

$\theta_{field\ capacity}$ et $\theta_{wilting\ point}$ sont les mêmes humidités caractéristiques que celles utilisées dans le calcul de l'AWC (en utilisant les fonctions de pédotransfert de Bruand et al. (2004)).

4.2.2.5 Enquête sur la qualité du vin

Plusieurs études centrées sur l'effet terroir ont évalué la qualité du raisin en utilisant des mesures de vignes ou de baies (Dry and Loveys, 1998, ; Vaudour, 2002, ; Ruth de Andrés-de Prado et al., 2007, ; Van Leeuwen et al., 2009, ; Van Leeuwen, 2010, ; Bonfante et al., 2011, ; Costantini and Bucelli, 2014). Dans cette étude, nous avons intégré le classement de la qualité des vins par le vigneron. Plusieurs facteurs sont à l'origine de cette situation : (i) une bonne qualité des baies n'est pas suffisante pour impliquer une bonne qualité de vin ; (ii) considérant que la qualité du vin en bouteille est potentiellement biaisée, car il est courant dans la région bordelaise d'assembler différents cépages et parcelles d'un vignoble dans un vin ; (iii) la prise en compte de la qualité du vin intègre un facteur humain à l'analyse ; (iv) la carte des notes de qualité représente l'intégration, en temps et en espace, d'un nombre d'années de production et l'expérience acquise au travers des différents millésimes.

A Saint-Emilion, le cépage prédominant est le Merlot assemblé avec du Cabernet franc. Pour améliorer la qualité finale du vin, la pratique actuelle consiste à séparer les raisins pendant la vendange, à l'échelle de la parcelle ou de la sous-parcelle (zonage micro terroir). Par la suite, ces différents lots de raisins sont placés dans des cuves différentes pendant les vinifications. A la fin du processus de séparation, le vigneron peut identifier la qualité de chaque (sous-)parcelle et choisir le meilleur assemblage avant la mise en bouteille. Sur la base de ces pratiques, le vigneron évalue parcelle par parcelle la qualité et le potentiel qualitatif de son vignoble.

Au Château Capet-Guillier, les raisins de chaque parcelle sont vinifiés en cuves séparées. Après vinification, les lots de vin sont dégustés par trois œnologues qui attribuent un rang de qualité : de A (le meilleur) à C (le pire). Les marqueurs pour le classement de la qualité par les œnologues sont : (i) longueur en bouche, (ii) équilibre (acidité et alcool), (iii) intensité des tanins, (iv) couleur, (v) maturité et souplesse des tanins, (vi) complexité aromatique. Chaque marqueur est noté de 1 à 5, et la note finale de qualité du vin (A à C) est attribuée avec la note de qualité la plus élevée si le score minimal pour tous les marqueurs est atteint (Figure 4.5).

4.2.3 Statistiques et analyse des données

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2014). Les données géographiques ont été traitées et la carte des sols a été créée à l'aide du logiciel QGIS3 (QGIS Development Team, 2019).

4.3 Résultats

4.3.1 Données et indices climatiques

Les principales statistiques et indices météorologiques (HI, CNI et DI) sont résumés dans la table 4.1. Les données météorologiques régionales, enregistrées à la station de Mérignac pour la période 1987-2017, ont révélé des précipitations annuelles moyennes de 912 mm avec un écart type de 180 mm. La quantité de pluie en 2017 et 2018, telle qu'enregistrée par la station locale, était de 749 et 905 mm, respectivement. La température annuelle moyenne à la station de Mérignac était de 13,7°C avec une variabilité interannuelle de 0,6°C (écart type), alors que les valeurs annuelles étaient de 13,6°C (2017) et 14,0°C (2018). La station de Mérignac indique une valeur moyenne d'ET₀ de 944 mm (écart type de 32 mm), alors que les mesures locales pour 2017 et 2018 étaient de 811 à 826 mm. Les indices climatiques, calculés à partir des séries à long terme, étaient de 2101°C pour HI, 13,2°C pour CNI et 107,2 mm pour DI (Table 4.1). D'après la valeur du HI, le climat régional a été classé comme *tempéré* et *tempéré chaud* (Table 4.2). Les degrés-jours (*Growing degree days*, GDD) ont également été calculés avec une température de base de 10°C (Winkler et al., 1974; Bonfante et al., 2018). Ces résultats classent la zone dans la Région II : "les cépages précoces et de mi-saison produiront des vins de bonne qualité" selon l'échelle de l'indice de Winkler. Pour les indices CNI et DI, selon la classification

proposée par Tonietto and Carbonneau (2004) (Table 4.2), le climat bordelais a été défini comme *tempéré et sub-humide avec des nuits fraîches*. Les mêmes indices, calculés sur le site d'étude, ont montré que les conditions de notre site d'étude étaient légèrement plus élevées pour l'indice HI, plus fraîches pour le CNI et plus humides pour le DI.

TABLE 4.1 : Comparaison des données climatiques de la station de Mérignac entre 1987 et 2017 fournies par MétéoFrance avec les données mesurées en 2017 et 2018 au Château Capet-Guillier.

Station	Period	RR [mm]	ET0[mm]	TM[°C]	HI [°C]	CNI [°C]	DI [mm]
Mérignac (Météo-France)	[1987 ; 2017]	912 (± 180)	944 (± 32)	13.7 (± 0.6)	2101	13.2	107.2
Capet-Guillier	2017	749	811	13.6	2207	10.7	239.2
Capet-Guillier	2018	905	826	14.0	2369	11.6	258.3

Avec RR (précipitations annuelles en mm), ET0 (évapotranspiration annuelle de référence selon l'équation de Penman-Monteith en mm), TM (température annuelle moyenne en degrés Celsius), HI (heliothermic index en degrés Celsius), CNI (cool night index en degrés Celsius), DI (dryness index en mm).

TABLE 4.2 : Classes des indices bioclimatiques pour le dryness index, l'heliothermic index et le cool night index des différentes régions viticoles (Tonietto et Carbonneau, 2004).

Index	Class of viticultural climate	Acronym	Class interval
Heliothermal Index, HI	Very warm	HI+3	>3000
	Warm	HI+2	(2400, 3000]
	Temperate warm	HI+1	(2100, 2400]
	Temperate	HI−1	(1800, 2100]
	Cool	HI−2	(1500, 1800]
	Very cool	HI−3	1500
Cool Night Index, CNI (°C)	Very cool nights	CI+2	12
	Cool nights	CI+1	(12, 14]
	Temperate nights	CI−1	(14, 18]
	Warm nights	CI−2	>18
Dryness Index, DI (mm)	Very dry	DI+2	−100
	Moderately dry	DI+1	(−100, 50]
	Sub-humid	DI−1	(50, 150]
	Humid	DI−2	>150

4.3.2 Dynamique de la nappe phréatique

La partie supérieure de la figure 4.2 présente les précipitations quotidiennes et la courbe des précipitations cumulées (en ruban) de novembre 2017 à novembre 2018, mesurées à la station météorologique locale. La partie inférieure de la figure 4.2 présente les hauteurs de la nappe phréatique mesurées aux deux piézomètres à un pas de temps journalier ; le piézomètre P1 (+12,9 m NGF) situé dans la plaine et le piézomètre P3 (+16,8 m NGF) situé au pied du coteau (Figure 3.5). En raison d'un été sec en 2017, la fin de l'année a été caractérisée par de faibles niveaux de nappe sur les deux piézomètres, entre +10,9 et +11,8 m NGF. Des précipitations ultérieures vers le 10 décembre (100 mm en 9 jours) ont provoqué la première augmentation significative de la nappe phréatique (0,2 m), similaire en quantité pour les deux piézomètres, mais plus progressive pour P3. Ensuite, la transition de 2017 à 2018 a été caractérisée par de fortes précipitations : plus de 100 mm du 25 décembre au 7 janvier. Par rapport à cette quantité de pluie, la variation du niveau de la nappe dans les deux piézomètres a augmenté d'environ 1,3 m. Fin janvier, le niveau d'eau de P1 a atteint un plateau avec une profondeur minimale de 0,5 m, observée le 1er avril, de la topographie du sol au niveau de la nappe. La même tendance à la hausse des niveaux d'eau a été observée pour le piézomètre P3 ; cependant, pour cette dernière position, l'augmentation globale a été supérieure à celle observée pour P1 et aucun plateau n'a été observé avant la profondeur minimale (1,5 m), qui a eu lieu pendant la même période, c'est-à-dire début avril. D'avril à novembre, on a observé une tendance générale à la baisse en deux étapes, clairement séparées par les précipitations qui se sont produites en juin. Après la mi-juin, la baisse a été plus prononcée alors que le taux de précipitations était inférieur à 60 mm par mois. Le 1er novembre, les deux piézomètres ont atteint leur niveau de référence : 2,75 et 5,78 m sous terre pour P1 et P3, respectivement.

4.3.3 Descriptions des sols

La figure 4.3 montre une carte des sols du site d'étude, basée sur les prospections réalisées sur le terrain. La zone (13,2 ha) est composée de 13 unités de sol (SU) (IUSS Working Group WRB, 2015) réparties en deux principaux types de sol : (i) des Cambisols avec des textures de sol à dominance argileuse sur les pentes de collines, clairement liés aux formations géologiques calcaires sous-jacentes (SU-11 à 15) et (ii) des Fluvisols de texture sableuse à argileuse dans la plaine, développés dans les anciens dépôts alluviaux (SU-1 à 8). La densité d'échantillonnage élevée nous a permis d'identifier un domaine intermédiaire dans la partie est de la plaine (SU-6, 7 et 8) où les colluvions carbonatés proviennent de la pente recouvrant les Fluvisols préexistants. Un engorgement a été observé pour la plupart des unités de sol dans la plaine, mais à des profondeurs différentes. La partie ouest de la plaine (SU 1 à 5) a été marquée par un engorgement dans les horizons profonds à mesure que la texture s'affine. La partie est (SU 6 à 8) est topographiquement plus basse, d'où l'apparition d'hydromorphie à plus faible profondeur.

À partir de la carte, nous avons défini trois domaines pédologiques, appelés unités fonctionnelles du sol (SFU) (Figure 4.3) : (i) SFU-1 pour les Fluvisols dans la partie ouest de

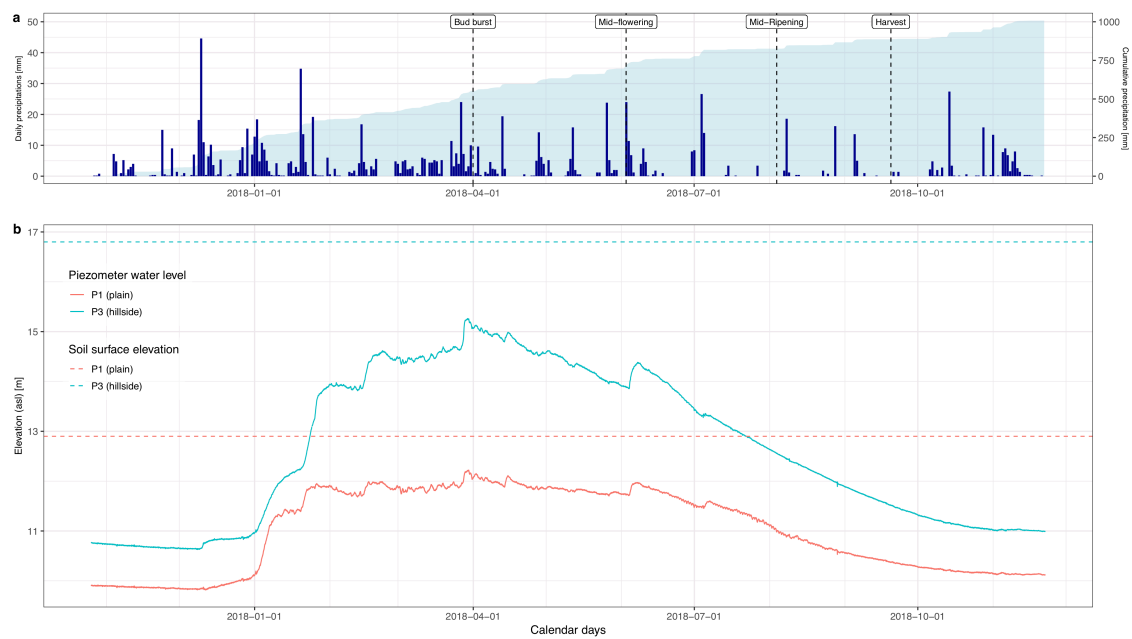


FIGURE 4.2 – (a) Suivi de la nappe phréatique de novembre 2017 à novembre 2018, et précipitations journalières et cumulées; (b) Niveaux piézométriques de P1 (+12,9 m NGF) et P3 (+16,8 m NGF).

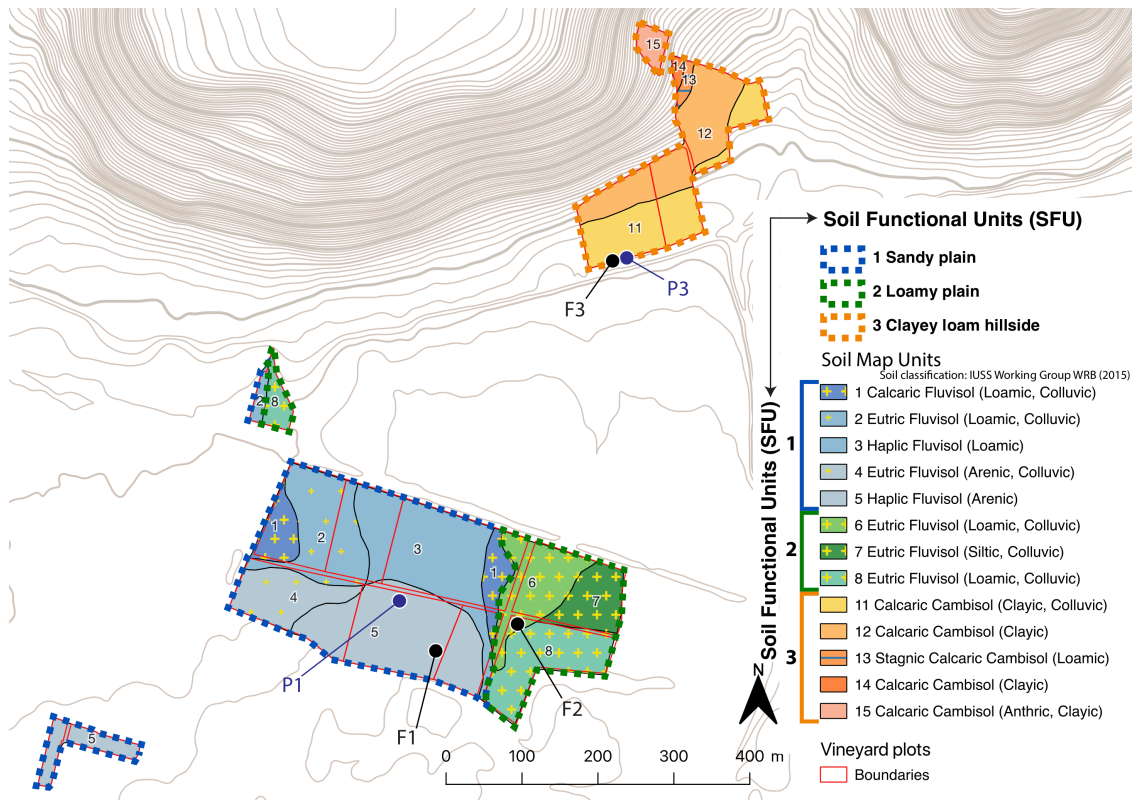


FIGURE 4.3 – Carte pédologique du Château Capet-Guillier. Localisation des fosses (noir) et des piézomètres (bleu).

la plaine, (ii) SFU-2 pour les Fluvisols dans la partie est de la plaine couverte des colluvions, et (iii) SFU-3 pour les Cambisols à flanc de colline. D'un point de vue pédologique, chaque SFU a été associée à une fosse pédologique (F1 pour SFU-1, F2 pour SFU-2 et F3 pour SFU-3), dont les descriptions et propriétés sont résumées dans la table 4.3.

TABLE 4.3 – Description et description des fosses pédologiques (F1, F2 et F3).

Hz name [FAO]	Depth [cm]	CLAY [%]	SILT [%]	SAND [%]	TOC [%]	N total [%o]	C/N [-]	CEC [cmol+/kg]	CaO [mg/kg]	MgO [mg/kg]	K ₂ O [mg/kg]	Na ₂ O [mg/kg]	pH [-]	Total CaCO ₃ [%]	Bulk density [g/cm ³]
F1 : Haplic Fluvisol (Arenic)															
Ap1	0 - 12	5.8	8.0	86.1	0.41	0.40	10.2	3.6	992	57	96	1.5	7.3	<0.5	1.44
Ap2	12 - 36	5.6	9.5	84.9	0.47	0.50	9.3	2.5	972	59	63	6.0	7.0	<0.5	1.53
B	36 - 54	5.4	7.9	86.7	0.17	0.20	8.7	1.4	796	45	74	7.0	7.8	<0.5	1.51
Bw(o)	54 - 74	13.3	7.5	79.2	0.17	0.20	8.7	2.4	804	79	70	5.0	7.2	<0.5	1.70
Bo	74 - 92	6.9	6.8	86.3	0.06	0.10	5.8	1.0	332	38	47	1.5	7.2	<0.5	1.60
Bwg	92 - 125	21.8	16.5	61.8	0.06	0.20	2.9	10.5	2658	248	139	15.0	7.2	<0.5	1.67
F2 : Eutric Fluvisol (Loamic, Colluvic)															
Apk1	0 - 15	25.7	23.5	50.8	1.16	2.00	5.8	13.6	9326	298	209	12.0	8.2	3.5	1.31
Apk2	15 - 32	26.9	25.2	47.9	0.58	0.58	10.0	11.5	10371	339	97	13.0	8.4	9	1.66
Bwk	32 - 60	24.0	15.3	60.7	0.29	0.31	9.4	10.3	9036	363	60	13.0	8.5	2.9	1.70
Bwko1	60 - 105	23.0	13.7	63.4	0.23	0.25	9.3	10.8	8969	493	69	19.0	8.5	2.4	1.62
Bwko2	105 - 150	15.5	13.1	71.3	0.12	0.16	7.3	5.1	9365	310	36	11.0	8.7	19.5	1.55
Cg	150 - 160	1.7	6.1	92.3	0.06	0.05	11.6	3.6	2235	119	34	6.0	8.6	<0.5	1.60
F3 : Calcaric Cambisol (Clayic, Colluvic)															
Apk	0 - 20	28.5	47.4	24.2	1.69	1.90	8.9	11.6	10658	340	297	12.0	7.9	29.7	1.17
Bwk1	20 - 70	31.1	51.3	17.6	0.41	0.64	6.3	10.8	10576	461	227	9.0	8.3	39.5	1.61
Bwk2	70 - 130	36.0	55.5	8.4	0.47	0.70	6.6	12.0	10662	548	205	142.0	8.2	32.2	1.57
Ck	130 - 160	36.0	48.9	15.1	0.47	0.69	6.7	12.7	10842	561	157	16.0	8.1	22.1	1.57

F1 a un profil de sol profond (plus de 1,2 m) avec des textures de sol dominées par le sable, sauf pour les horizons profonds ($>0,92$ m), où la fraction argileuse augmente considérablement. Le profil de sol est composé de plusieurs horizons avec des horizons organo-minéraux (A-horizon) dans les premiers 0,36 m. Une faible teneur en carbone organique caractérise ces horizons A (0,45%) avec un pH de 7,1 et une très faible capacité d'échange cationique (CEC ; 2,9 cmol+/kg). Avec la profondeur, l'horizonation du sol a évolué à travers des horizons minéraux (horizons B) qui sont caractérisés par des propriétés similaires, à l'exception de la valeur décroissante de la CEC liée à la diminution en carbone organique total (TOC). Nous avons noté que les horizons de sol plus profonds ($>0,92$ m) avec une fraction argileuse élevée (21,8 %) présentaient également la plus haute valeur CEC (10,5 cmol+/kg). En décrivant le sol, nous avons observé des horizons hydromorphes (Bw-horizon) avec des signes d'hydromorphie à partir de 0,54 m, dont la densité a augmenté dans les horizons de sol les plus profonds et a évolué d'un état d'oxydation à une réduction. Cette observation d'engorgement a été corroborée par l'architecture racinaire de la vigne, car la quantité de racines diminue après les premiers 0,74 m de sol, et le développement latéral des racines est important.

Le profil de sol F2 est également profond, avec des différences significatives par rapport à F1. Ici, la texture du sol a toujours été dominée par la fraction sableuse ; cependant, les horizons de surface présentent des fractions argileuses (25,7 %) et limoneuses (23,5 %) importantes. Avec la profondeur du sol, la fraction sableuse augmente de 92,0 % à 1,5 m. Dans l'horizon A, la fraction argileuse (25,7 %) et la teneur en carbone organique (1,16 %) sont nettement plus élevées qu'en F1 et sont responsables de la valeur CEC plus élevée (13,6 cmol+/kg) dans les conditions de pH basique (8,2). De la surface au sous-sol, nous avons observé une diminution classique de la teneur en TOC, qui atteint des niveaux similaires à ceux observés pour F1 à des profondeurs supérieures à 0,6 m, alors que le pH augmente jusqu'à 8,7 à une profondeur de 1,00 m. Comme observé dans toutes les fosses situées dans la plaine, les profils pédologiques sont affectés par des conditions sévères de saturation en eau : i) les structures secondaires des précipitations carbonatées situées à 0,32 m ; ii) des traces précoces d'hydromorphie ont été observées à une profondeur de 0,36 m (oxydation) et une augmentation de la densité et de l'intensité a été observée dans les horizons plus profonds ; iii) des concrétions de fer et de manganèse apparaissent à une profondeur de 0,60 m. Les racines étaient abondantes jusqu'à 0,60 m et restaient visibles à 1,60 m. Le développement racinaire semblait normal et non affecté par la présence du niveau d'eau. Il n'y avait pas de latéralisation visible, comme observé dans F1 Figure 4.4).

Malgré ses conditions de pente, la position F3 présentait un sol profond. La texture globale du sol était dominée par des fractions de limon et d'argile. De l'horizon de surface au sous-sol, la texture du sol est devenue plus argileuse : de 28,5 % à la surface du sol à 36 % à 1,30 m. Parmi les trois fosses, la position F3 avait la teneur en TOC la plus élevée (1,69 %) dans les premiers 0,20 m (couche de labour), qui diminue sensiblement pour l'horizon sous-jacent à une valeur stable autour de 0,47%, même pour les horizons des sols plus profonds. Le pH était moins basique que celui mesuré pour la position F2, alors que la valeur CEC se situait entre 10,8 et 12,7 cmol+/kg. À cet endroit, aucun horizon saturé d'eau n'a été décrit au cours des 1,3 premiers mètres.

Les structures racinaires et les traces d'inondation dans les fosses aident à comprendre l'ap-

provisionnement en eau de la vigne. Le profil de sol F1 présentait des structures racinaires latéralisantes claires avec l'apparition de marques d'engorgement. Ces caractéristiques pédologiques mettent en évidence l'impact de la nappe phréatique sur l'enracinement de la vigne. Par conséquent, l'élévation de la nappe phréatique pendant l'hiver (Figure 4.2) a réduit l'étude du sol par les racines. Cela a réduit la quantité d'eau disponible pour la vigne. F2 était situé 0,4 m plus bas dans la plaine (12,8 m au-dessus du niveau de la mer pour F1 et 12,4 m au-dessus du niveau de la mer pour F2) et présentait des marques d'engorgement (Table 4.3) et figure 4.4). Cependant, ces marques avaient une intensité plus faible et la présence de précipités carbonatés dans les horizons jusqu'à 1,60 m indiquait que la nappe phréatique ne s'élève pas avant longtemps dans ces couches. De plus, la structure des racines n'a pas été très affectée par la nappe phréatique. Aucune latéralisation n'a été observée, comme pour le premier profil. Ainsi, les descriptions pédologiques (Table 4.3 et figure 4.4) ont montré que l'alimentation en eau des vignes dans ces deux profils pédologiques diffère, malgré leur proximité et leur situation topographique similaire.

4.3.4 Estimation de l'eau disponible de la vigne

La profondeur d'enracinement maximale effective (*Erd*) et le paramètre β ont été déterminés en fonction des descriptions du profil du sol (Table 4.3 et figure 4.4). Pour F1 et F2, la limite plus profonde pour les recherches sur les racines était limitée par le niveau de la nappe phréatique pendant la saison hivernale (Figure 4.2). La présence de la nappe phréatique de la mi-janvier à la mi-juin est responsable des caractéristiques du sol gorgé d'eau associées à des conditions anoxiques qui provoquent la nécrose des racines de la vigne. La différence entre F1 et F2 comprend un niveau plus profond pour les conditions F1 et une profondeur maximale de densité de racines de 1,25 et 1,60 m, respectivement (Table 4.4). Pour F3, aucune limitation du sol n'a été observée dans les recherches sur les racines, alors que le profil du sol a été développé sur la formation géologique *Fronsadais Molasses*, constituée de roches sédimentaires non consolidées (Table 4.3 et figure 4.4). Il n'y avait pas d'horizon saturé d'eau à F3 sur l'ensemble du profil ; cependant, une étude de la dynamique de la nappe phréatique (Figure 4.2) a montré que le niveau de la nappe phréatique a augmenté jusqu'à 2,00 m sous la surface du sol vers le 1er avril. Ensuite, la profondeur de la densité maximale des racines a été définie à 2,00 m (Table 4.4).

TABLE 4.4 : Calcul de l'eau du sol disponible pour la vigne aux emplacements des trois fosses (F1, F2 et F3).

Pit	C-AWC [mm]	P-AWC [mm]	TTSW [mm]	Beta [m]	Erd [m]
F1	76	90	57	0.92	1.25
F2	120	154	86	1.05	1.60
F3	114	194	45	1.50	2.00

Parmi les trois endroits, F1 avait la plus faible valeur de C-AWC (76 mm, Table 4.4) par rapport à sa texture de sol dominée par le sable (Table 4.3), qui fournit une faible teneur

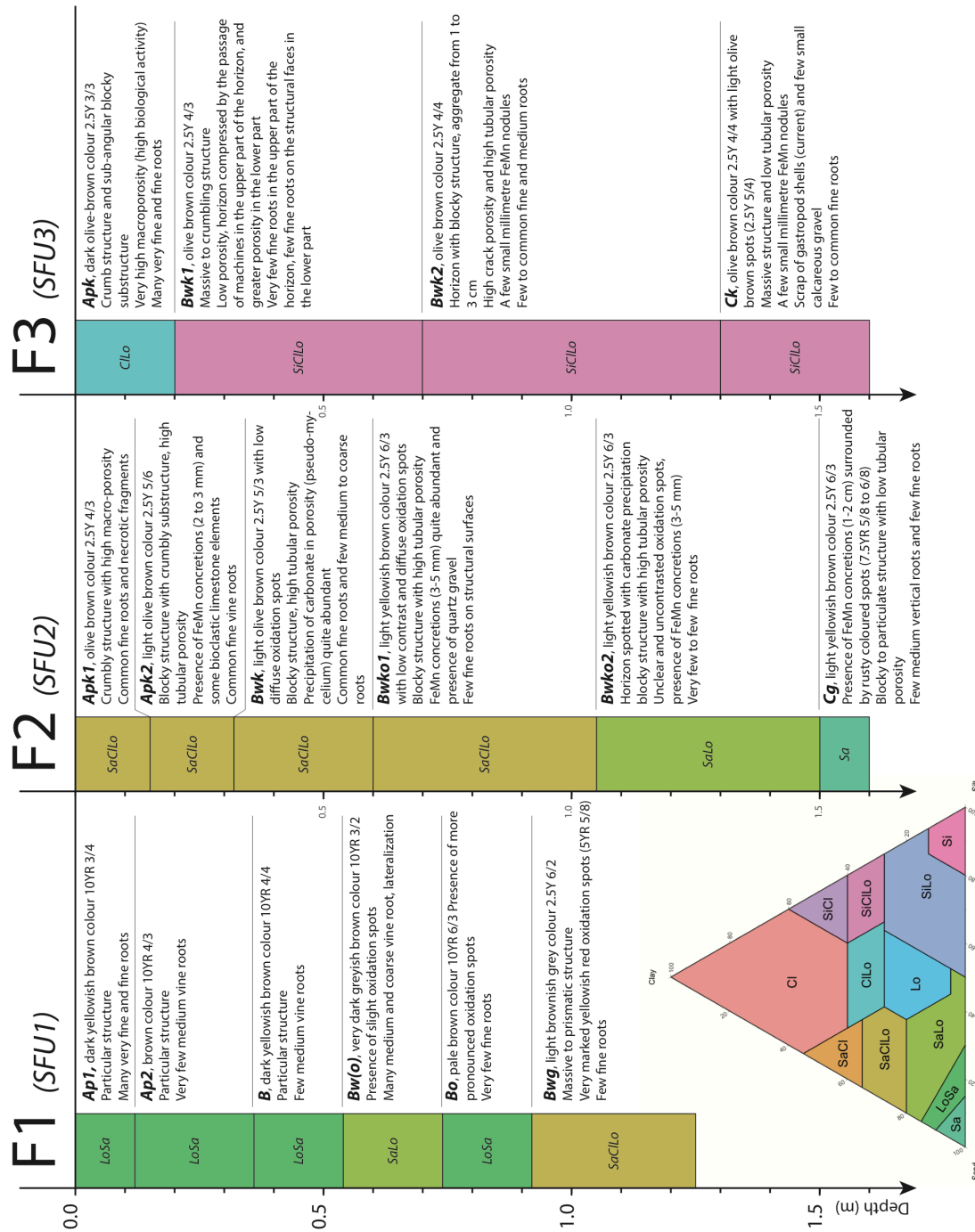


FIGURE 4.4 – Description des trois fosses creusées dans le vignoble du Château Capet-Guillier.

en eau à pleine capacité (Bruand et al., 2004). Ceci contraste avec la valeur de C-AWC de 120 mm pour F2, qui est également située dans le domaine des plaines, mais la texture présente une fraction limoneuse significative (Table 4.3). L'emplacement F3 présentait également une condition de C-AWC élevée, avec une valeur de 114 mm en raison de la texture argileuse (Table 4.3). En intégrant la profondeur d'enracinement potentielle dans le calcul du P-AWC, l'emplacement F3 a montré la valeur la plus élevée de 194 mm, suivie de celle calculée pour l'emplacement F2 (154 mm). L'emplacement F1 présentait la AWC la plus faible, avec une AWC-P de 90 mm (Table 4.4). Les valeurs estimées de TTSW (Table 4.4) étaient les plus faibles pour les emplacements F3 (45 mm) et F1 (57 mm) et les plus élevées pour F2 (86 mm).

4.3.5 Carte de classement de la qualité du vin

Le classement de la qualité des vins est présenté par les figures 4.5 et 4.6 d'après les notes de qualité établies par le vigneron. Nous rappelons que dans ce classement, la qualité A est la plus élevée. Le premier commentaire porte sur la couverture spatiale associée à chaque rang d'un même ordre, soit près du tiers de la superficie totale pour chaque qualité (qualité A = 2,77 ha ; qualité B = 5,73 ha ; qualité C = 4,51 ha). La deuxième observation est que la configuration spatiale est associée à la distribution de la qualité : La qualité A se trouvait sur le système de pente, tandis que la qualité B et la qualité C se trouvaient dans la plaine du sud, où aucune qualité A n'était présente. Si l'on compare avec la carte des sols stratifiée en trois SFU, on peut dire que i) la qualité A est survenue exclusivement dans l'SFU-3, ii) l'SFU-2 était principalement associée à la qualité B, et iii) l'SFU-1 a généré la qualité B et C. Pour cette dernière SFU, nous avons noté une distribution claire avec une qualité B située dans la partie nord de l'SFU, alors que la qualité C était clairement observée dans la partie sud.

4.3.6 De la carte de la qualité du vin aux propriétés du sol

Toutes les analyses de sol ont été divisées en trois classes en fonction de la carte de classement de la qualité des vins. Ensuite, à l'intérieur d'une classe de qualité, les échantillons ont été divisés en fonction de la profondeur d'échantillonnage, à savoir l'horizon de surface (de la surface du sol à 0,2 m) et le sous-sol (de 0,2 m à 0,8 m). Toutes les statistiques descriptives concernant la qualité et la profondeur du sol sont résumées dans le Table 4.5. Parmi les propriétés du sol, la texture et le pH du sol sont significatifs lorsque l'on considère la classification de la qualité du vin. La qualité A est associée à la teneur la plus élevée des fractions d'argile et de limon dans l'horizon de surface et le sous-sol, tandis que les fractions sableuses sont dominantes pour la qualité C, quelle que soit la profondeur du sol. La qualité A était également fortement corrélée à l'état du pH, puis à la teneur en CaCO_3 , les valeurs les plus élevées pour le pH et le CaCO_3 étant mesurées pour cette classe de qualité. La stratification était moins prononcée pour les valeurs du carbone organique et de l'azote. La qualité A couvrait à la fois la variabilité la plus élevée et la valeur moyenne la plus élevée pour la teneur en carbone organique total dans l'horizon de surface. Pour l'état de l'horizon de surface, la stratification de la valeur moyenne est

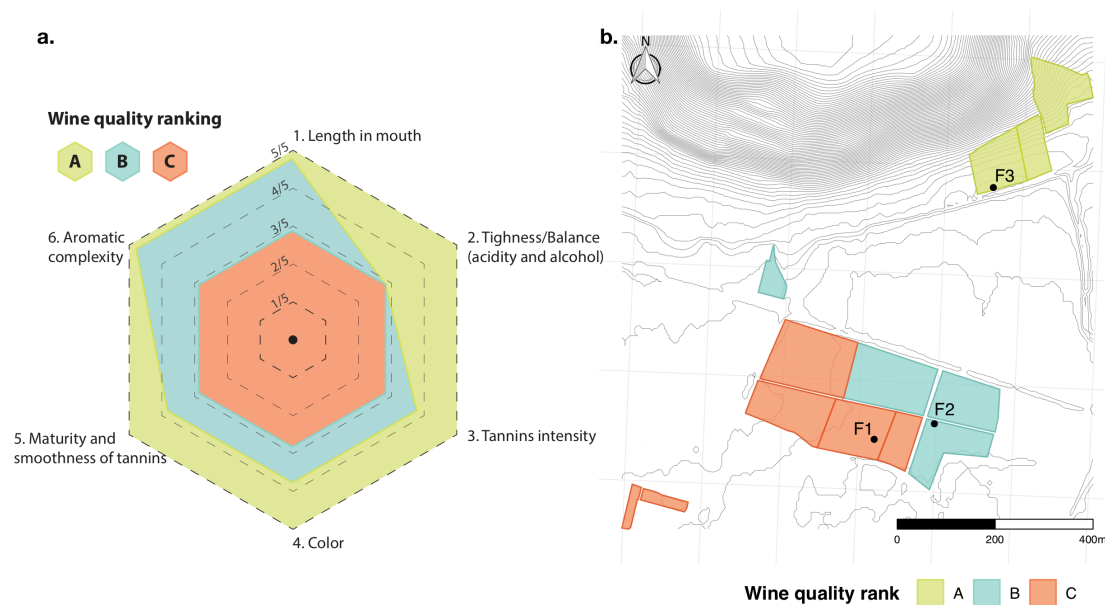


FIGURE 4.5 – (a) Classement de la qualité du vin de A (meilleur) à C (moins bonne) et notes de dégustation correspondantes de 1 à 5. (1) longueur en bouche, (2) équilibre (acidité et alcool), (3) intensité des tanins, (4) couleur, (5) maturité et souplesse des tanins, (6) complexité aromatique. (b) Classement qualitatif le plus fréquent pour chaque parcelle de vigne de 2012 à 2018.

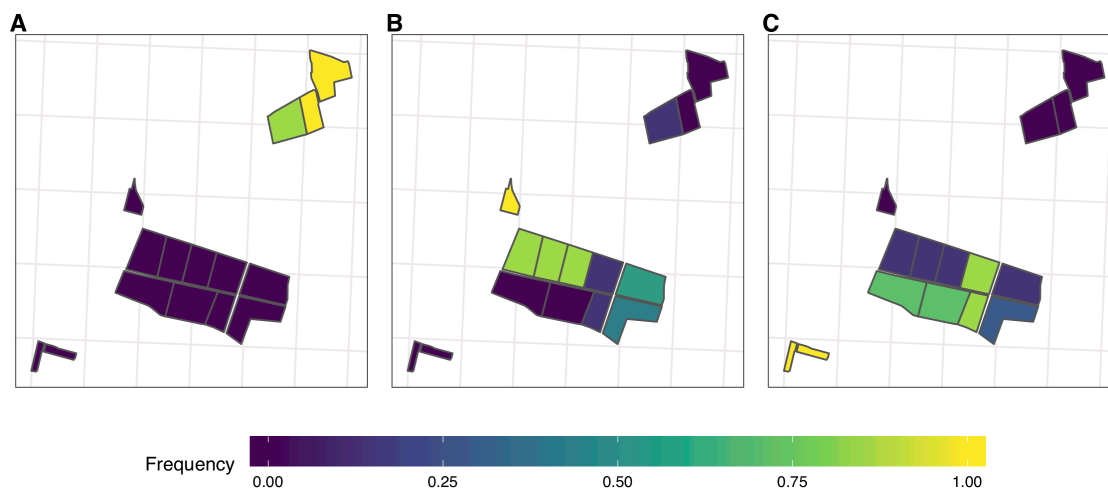


FIGURE 4.6 – Cartes de fréquence des qualités de production des parcelles (A à C) entre 2012 et 2018.

classée en fonction de la qualité du vin, la qualité la plus faible étant associée à la teneur moyenne en TOC la plus faible. Pour compléter les tendances de TOC, l'azote total a été bien stratifié, les valeurs d'azote total les plus élevées étant mesurées pour la meilleure qualité. Les rapports C/N sont significativement plus faibles pour les vins de la plus haute qualité. Les derniers commentaires portent sur la CEC et les principaux éléments (Ca, Mg et K), qui sont constamment liés à la stratification d'autres paramètres du sol : Les valeurs CEC et les concentrations des principaux éléments diminuent avec la diminution de la qualité du vin. Nous avons noté que pour la CEC et le CaO, la qualité B présentait les valeurs numériques les plus élevées. Pour affiner notre analyse, des statistiques descriptives spécifiques ont été calculées pour la SFU-1, où les qualités B et C étaient présentes (Table 4.6). D'après ces statistiques, aucune différence significative n'a été constatée entre les principaux paramètres du sol lorsque l'on compare les classes de qualité B et C.

TABLE 4.5 : Statistiques descriptives des propriétés du sol pour chaque zone de qualité du vin à deux profondeurs de sol différentes.

Quality	Depth	Parameter	Unit	Count	Mean	SD	Min	Q25	Median	Q75	Max
A	(0,20]	Clay	%	19	30.07	5.82	20.40	26.20	29.80	32.65	41.30
		Silt	%	19	35.90	7.07	25.60	30.30	35.20	40.70	49.30
		Sand	%	19	34.02	11.18	10.90	28.15	32.30	42.05	53.50
		TOC	%	19	0.93	0.45	0.35	0.49	0.81	1.34	1.69
		Total N	‰	19	1.08	0.41	0.50	0.70	1.00	1.40	1.90
		C/N		19	8.85	4.01	2.20	7.15	8.30	9.25	23.20
		CEC	cmol+/kg	19	10.38	1.70	7.80	9.00	10.20	11.60	13.90
		CaO	mg/kg	19	10679.58	870.53	8243.00	10480.50	10804.00	11100.50	11746.00
		MgO	mg/kg	19	345.32	124.64	153.00	255.50	326.00	407.50	626.00
		K2O	mg/kg	19	242.95	98.21	114.00	176.00	231.00	293.50	471.00
		pH H2O		19	8.41	0.21	7.90	8.30	8.40	8.55	8.80
		Total CaCO3	%	19	20.67	7.17	4.00	15.80	20.20	26.50	30.60
	(20,80]	Clay	%	3	24.60	16.91	5.40	18.25	31.10	34.20	37.30
		Silt	%	3	43.97	20.32	21.00	36.15	51.30	55.45	59.60
		Sand	%	3	31.40	37.27	3.00	10.30	17.60	45.60	73.60
		TOC	%	3	0.29	0.12	0.17	0.23	0.29	0.35	0.41
		Total N	‰	3	0.43	0.19	0.27	0.32	0.37	0.50	0.64
		C/N		3	7.23	3.11	4.70	5.50	6.30	8.50	10.70
		CEC	cmol+/kg	3	8.17	4.82	2.60	6.70	10.80	10.95	11.10
		CaO	mg/kg	3	9938.33	1126.19	8638.00	9607.00	10576.00	10588.50	10601.00
		MgO	mg/kg	3	476.00	211.90	272.00	366.50	461.00	578.00	695.00
		K2O	mg/kg	3	127.67	88.10	59.00	78.00	97.00	162.00	227.00
		pH H2O		3	8.50	0.26	8.30	8.35	8.40	8.60	8.80
		Total CaCO3	%	3	41.20	7.79	34.40	36.95	39.50	44.60	49.70
B	(0,20]	Clay	%	23	20.73	7.17	8.50	13.60	23.00	26.60	30.90
		Silt	%	23	19.88	8.01	9.20	14.40	15.90	27.35	33.60
		Sand	%	23	59.38	14.39	36.80	44.20	62.20	71.25	82.30
		TOC	%	23	0.90	0.26	0.47	0.73	0.93	1.08	1.63
		Total N	‰	23	0.99	0.32	0.40	0.85	1.00	1.10	2.00
		C/N		23	9.40	1.79	5.80	8.40	9.50	10.55	12.40
		CEC	cmol+/kg	23	9.77	3.19	4.30	7.30	11.30	12.10	13.80
		CaO	mg/kg	23	5421.26	3677.77	936.00	2204.50	4310.00	9249.00	11049.00
		MgO	mg/kg	23	237.83	83.55	90.00	195.50	244.00	319.50	339.00
		K2O	mg/kg	23	204.70	85.73	96.00	147.50	169.00	239.00	418.00
		pH H2O		23	7.76	0.56	6.40	7.50	7.90	8.20	8.40
		Total CaCO3	%	23	2.01	2.41	0.25	0.25	0.25	3.75	7.80
	(20,80]	Clay	%	2	25.45	2.05	24.00	24.73	25.45	26.17	26.90
		Silt	%	2	20.25	7.00	15.30	17.78	20.25	22.72	25.20
		Sand	%	2	54.30	9.05	47.90	51.10	54.30	57.50	60.70
		TOC	%	2	0.44	0.21	0.29	0.36	0.44	0.51	0.58
		Total N	‰	2	0.44	0.19	0.31	0.38	0.44	0.51	0.58
		C/N		2	9.70	0.42	9.40	9.55	9.70	9.85	10.00
		CEC	cmol+/kg	2	10.90	0.85	10.30	10.60	10.90	11.20	11.50
		CaO	mg/kg	2	9703.50	943.99	9036.00	9369.75	9703.50	10037.25	10371.00
		MgO	mg/kg	2	351.00	16.97	339.00	345.00	351.00	357.00	363.00
		K2O	mg/kg	2	78.50	26.16	60.00	69.25	78.50	87.75	97.00
		pH H2O		2	8.45	0.07	8.40	8.43	8.45	8.47	8.50
		Total CaCO3	%	2	5.95	4.31	2.90	4.42	5.95	7.47	9.00

TABLE 4.5 : Statistiques descriptives des propriétés du sol pour chaque zone de qualité du vin à deux profondeurs de sol différentes. (*continued*)

Quality	Depth	Parameter	Unit	Count	Mean	SD	Min	Q25	Median	Q75	Max
C	(0,20]	Clay	%	29	8.87	2.41	5.80	7.00	8.10	10.90	14.20
		Silt	%	29	10.11	2.43	5.20	8.00	9.40	12.30	14.50
		Sand	%	29	81.01	4.38	72.80	78.20	82.50	84.90	86.40
		TOC	%	29	0.70	0.34	0.17	0.47	0.64	0.93	1.51
		Total N	‰	29	0.67	0.28	0.20	0.50	0.67	0.90	1.33
		C/N		29	10.12	1.68	7.70	8.70	9.70	11.60	13.10
		CEC	cmol+/kg	29	4.21	1.39	2.00	3.30	3.90	4.70	7.30
		CaO	mg/kg	29	1674.45	1304.03	379.00	830.00	1196.00	1937.00	4945.00
		MgO	mg/kg	29	87.52	33.33	32.00	59.00	88.00	107.00	153.00
		K2O	mg/kg	29	140.07	54.85	36.00	100.00	137.00	158.00	276.00
		pH H2O		29	7.03	0.79	5.70	6.40	7.10	7.50	8.40
		Total CaCO3	%	29	0.25	0.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
(20,80]	(20,80]	Clay	%	15	8.51	2.85	3.20	6.80	8.70	9.60	13.30
		Silt	%	15	8.12	1.45	5.90	7.40	7.90	8.85	11.80
		Sand	%	15	83.37	3.42	78.00	81.05	83.60	84.95	89.00
		TOC	%	15	0.23	0.13	0.06	0.17	0.17	0.26	0.47
		Total N	‰	15	0.24	0.09	0.10	0.20	0.20	0.27	0.50
		C/N		15	9.28	3.01	5.80	7.65	8.70	9.50	15.50
		CEC	cmol+/kg	15	2.74	0.67	1.40	2.40	2.70	3.05	4.10
		CaO	mg/kg	15	1294.73	998.08	494.00	800.00	840.00	1242.00	4171.00
		MgO	mg/kg	15	67.27	20.27	30.00	56.00	72.00	80.00	106.00
		K2O	mg/kg	15	89.60	27.86	52.00	66.50	81.00	113.50	134.00
		pH H2O		15	7.67	0.36	7.00	7.50	7.60	7.85	8.30
		Total CaCO3	%	15	0.27	0.09	0.25	0.25	0.25	0.25	0.60

Note :

Argile(%), limon(%), sable(%), TOC(carbone organique total en %), N(azote total en ‰), C/N(rapport carbone/azote, sans unité), CEC(capacité d'échange cationique en cmol+/kg), CaO(mg/kg), MgO(mg/kg), K2O(mg/kg), pH H2O(sans unité), CaCO3 total(%))

TABLE 4.6 : Statistiques descriptives des propriétés du sol pour chaque SFU à deux profondeurs de sol différentes.

SFU	Depth	Parameter	Unit	Count	Mean	SD	Min	Q25	Median	Q75	Max
1	(0,20]	Clay	%	39	10.12	3.55	5.80	7.55	8.50	12.60	21.20
		Silt	%	39	11.06	2.89	5.20	8.50	10.90	13.10	16.30
		Sand	%	39	78.82	6.09	62.50	75.00	79.10	84.55	86.40
		TOC	%	39	0.76	0.35	0.17	0.52	0.76	0.96	1.63
		Total N	‰	39	0.73	0.31	0.20	0.50	0.70	0.90	1.50
		C/N		39	10.26	1.61	7.70	8.85	9.90	11.60	13.10
		CEC	cmol+/kg	39	4.95	2.16	2.00	3.45	4.30	6.20	11.40
		CaO	mg/kg	39	1801.44	1282.17	379.00	911.00	1264.00	2229.00	4945.00
		MgO	mg/kg	39	107.87	54.91	32.00	69.00	94.00	128.50	272.00
		K2O	mg/kg	39	156.26	71.45	36.00	106.50	141.00	177.00	413.00
		pH H2O		39	7.09	0.72	5.70	6.45	7.20	7.50	8.40
		Total CaCO3	%	39	0.25	0.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	(20,80]	Clay	%	15	8.51	2.85	3.20	6.80	8.70	9.60	13.30
		Silt	%	15	8.12	1.45	5.90	7.40	7.90	8.85	11.80
		Sand	%	15	83.37	3.42	78.00	81.05	83.60	84.95	89.00
		TOC	%	15	0.23	0.13	0.06	0.17	0.17	0.26	0.47
		Total N	‰	15	0.24	0.09	0.10	0.20	0.20	0.27	0.50
		C/N		15	9.28	3.01	5.80	7.65	8.70	9.50	15.50
		CEC	cmol+/kg	15	2.74	0.67	1.40	2.40	2.70	3.05	4.10
		CaO	mg/kg	15	1294.73	998.08	494.00	800.00	840.00	1242.00	4171.00
		MgO	mg/kg	15	67.27	20.27	30.00	56.00	72.00	80.00	106.00
		K2O	mg/kg	15	89.60	27.86	52.00	66.50	81.00	113.50	134.00
		pH H2O		15	7.67	0.36	7.00	7.50	7.60	7.85	8.30
		Total CaCO3	%	15	0.27	0.09	0.25	0.25	0.25	0.25	0.60
2	(0,20]	Clay	%	13	26.12	3.16	21.80	23.50	25.70	28.70	30.90
		Silt	%	13	24.55	7.70	13.50	14.80	26.90	31.30	33.60
		Sand	%	13	49.31	9.96	36.80	42.70	44.60	61.70	64.60
		TOC	%	13	0.87	0.18	0.58	0.76	0.87	0.93	1.16
		Total N	‰	13	1.05	0.31	0.80	0.90	1.00	1.10	2.00
		C/N		13	8.42	1.45	5.80	7.40	8.70	9.70	10.30
		CEC	cmol+/kg	13	11.83	1.73	7.70	11.50	11.90	12.90	13.80
		CaO	mg/kg	13	7922.46	2850.21	4114.00	4597.00	9172.00	10886.00	11049.00
		MgO	mg/kg	13	292.38	48.26	197.00	251.00	319.00	323.00	339.00
		K2O	mg/kg	13	205.85	82.42	96.00	162.00	180.00	242.00	418.00
		pH H2O		13	8.15	0.17	7.80	8.10	8.20	8.20	8.40
		Total CaCO3	%	13	3.36	2.46	0.25	0.25	3.70	4.80	7.80
	(20,80]	Clay	%	2	25.45	2.05	24.00	24.73	25.45	26.17	26.90
		Silt	%	2	20.25	7.00	15.30	17.78	20.25	22.72	25.20
		Sand	%	2	54.30	9.05	47.90	51.10	54.30	57.50	60.70
		TOC	%	2	0.44	0.21	0.29	0.36	0.44	0.51	0.58
		Total N	‰	2	0.44	0.19	0.31	0.38	0.44	0.51	0.58
		C/N		2	9.70	0.42	9.40	9.55	9.70	9.85	10.00
		CEC	cmol+/kg	2	10.90	0.85	10.30	10.60	10.90	11.20	11.50
		CaO	mg/kg	2	9703.50	943.99	9036.00	9369.75	9703.50	10037.25	10371.00
		MgO	mg/kg	2	351.00	16.97	339.00	345.00	351.00	357.00	363.00
		K2O	mg/kg	2	78.50	26.16	60.00	69.25	78.50	87.75	97.00
		pH H2O		2	8.45	0.07	8.40	8.43	8.45	8.47	8.50
		Total CaCO3	%	2	5.95	4.31	2.90	4.42	5.95	7.47	9.00

TABLE 4.6 : Statistiques descriptives des propriétés du sol pour chaque SFU à deux profondeurs de sol différentes. *(continued)*

SFU	Depth	Parameter	Unit	Count	Mean	SD	Min	Q25	Median	Q75	Max
3	(0,20]	Clay	%	24	31.20	5.78	20.40	27.95	30.65	35.65	41.30
		Silt	%	24	38.02	7.69	25.60	31.20	37.40	44.33	49.80
		Sand	%	24	30.77	11.90	10.90	22.03	31.30	40.40	53.50
		TOC	%	24	0.88	0.42	0.35	0.51	0.76	1.21	1.69
		Total N	‰	24	1.03	0.38	0.50	0.70	0.95	1.40	1.90
		C/N		24	8.64	3.62	2.20	6.80	8.00	9.12	23.20
		CEC	cmol+/kg	24	10.31	1.52	7.80	9.38	10.05	11.60	13.90
		CaO	mg/kg	24	10518.38	1255.62	5907.00	10537.00	10765.00	11095.25	11746.00
		MgO	mg/kg	24	324.67	118.48	153.00	246.25	295.00	385.25	626.00
		K2O	mg/kg	24	235.21	91.49	114.00	171.50	225.00	290.00	471.00
		pH H2O		24	8.45	0.22	7.90	8.30	8.40	8.60	8.80
		Total CaCO3	%	24	22.06	8.03	4.00	16.05	23.50	28.20	42.40
	(20,80]	Clay	%	5	26.60	12.49	5.40	26.30	31.10	32.90	37.30
		Silt	%	5	44.74	15.21	21.00	39.00	51.30	52.80	59.60
		Sand	%	5	28.62	26.74	3.00	17.60	20.90	28.00	73.60
		TOC	%	5	0.30	0.10	0.17	0.23	0.29	0.41	0.41
		Total N	‰	5	0.44	0.16	0.27	0.35	0.37	0.59	0.64
		C/N		5	7.04	2.22	4.70	6.30	6.60	6.90	10.70
		CEC	cmol+/kg	5	9.24	3.85	2.60	9.40	10.80	11.10	12.30
		CaO	mg/kg	5	10304.20	954.29	8638.00	10576.00	10601.00	10627.00	11079.00
		MgO	mg/kg	5	424.20	168.11	272.00	307.00	386.00	461.00	695.00
		K2O	mg/kg	5	118.60	64.93	59.00	86.00	97.00	124.00	227.00
		pH H2O		5	8.46	0.21	8.30	8.30	8.40	8.50	8.80
		Total CaCO3	%	5	40.20	11.60	24.40	34.40	39.50	49.70	53.00

Note :

Argile(%), limon(%), sable(%), TOC(carbone organique total en %), N(azote total en ‰), C/N(rapport carbone/azote, sans unité), CEC(capacité d'échange cationique en cmol+/kg), CaO(mg/kg), MgO(mg/kg), K2O(mg/kg), pH H2O(sans unité), CaCO3 total(%))

4.4 Discussion

4.4.1 Disponibilité de l'eau

L'approvisionnement en eau de la vigne est un paramètre majeur dans la prise en compte des facteurs de contrôle de la qualité du vin rouge. Plusieurs études (Choné et al., 2000, ; Choné, 2001, ; Dry and Loveys, 1998, ; Ojeda et al., 2002, ; Seguin, 1986, ; Smart and Robinson, 1991, ; Tregoat, 2003, ; Tregoat et al., 2002, ; Van Leeuwen, 2010, ; Van Leeuwen et al., 2009) ont souligné l'importance d'un déficit hydrique marqué après la floraison pour favoriser la synthèse des polyphénols, indispensables pour assurer la qualité des raisins de cuve rouges (Carbonneau, 1986, ; Matthews and Anderson, 1988, ; Ojeda et al., 2002, ; Van Leeuwen and Seguin, 1994). Inversement, un stress hydrique excessif réduit la qualité, tandis que le blocage de la photosynthèse réduit la synthèse des polyphénols (Deloire et al., 2004). Pour cette raison, les idéotypes de bons sols pour le vin rouge qualitatif sont souvent présentés comme ceux qui ont un volume de sol mince ou avec une pierrosité élevée et des conditions avec un volume limité d'eau disponible pour la vigne.

Quel que soit le calcul utilisé, l'emplacement F1 présentait la AWC la plus faible (Table 4.4). Cela s'explique par sa texture sableuse (Table 4.3), qui présente un faible potentiel de rétention d'eau et de capillarité, et par la nappe phréatique peu profonde à la fin de l'hiver, qui limite la profondeur de l'enracinement. Les valeurs calculées pour l'emplacement F2 étaient constamment élevées par rapport à la texture du sol argileux et au potentiel d'enracinement (Tables 4.3 et 4.4). La capacité de stockage d'eau estimée pour l'emplacement F3 semblait plus sensible à la méthode de calcul : (i) l'AWC était très sensible aux conditions de profondeur d'enracinement, nous avons fixé une profondeur d'investigation potentielle de 2,00 m vu les observations de l'architecture du système racinaire (Table 4.4) et (ii) le calcul de la TTSW a intégré la capacité des racines à extraire l'eau à des potentiels hydriques différents du point théorique de flétrissement, la quantité d'eau non disponible étant associée au potentiel hydrique élevé dans les sols argileux (Bruand et al., 2004).

4.4.2 Disponibilité des nutriments

Contrairement à la disponibilité de l'eau, la disponibilité globale des stocks et des nutriments est essentielle pour la production de vin (White, 2003). Parmi les nutriments critiques, les formes azotées devraient être présentes en quantité suffisante ; cependant, certaines études (Tregoat et al., 2002, ; Van Leeuwen et al., 2000) ont montré qu'un apport limité en azote dans la vigne peut contribuer à améliorer la qualité du vin rouge. Dans notre étude, les statistiques descriptives (Table 4.5) ont montré que l'horizon A de la qualité A avait une teneur moyenne de 1,08‰ ($\pm 0,41\%$ écart-type), tandis que les valeurs diminuaient avec la qualité du vin : 0,83‰ ($\pm 0,33\%$ écart-type) pour la qualité B et 0,78‰ ($\pm 0,35\%$ écart-type) pour la qualité C. La teneur en azote la plus élevée pour les horizons A a été observée pour les sols situés dans les parcelles les plus qualitatives (Table 4.5). Bien qu'ils ne concordent pas avec les résultats de Van Leeuwen et al.

(2000), ces résultats convergent avec les commentaires de Fierer (2017) et Costantini et al. (2015) qui suggèrent que d'autres paramètres géochimiques et microbiologiques devraient être examinés et non seulement pour les horizons de surface. En se concentrant sur les paramètres du sol à l'échelle de la fosse, la table 4.3 montre que les valeurs de TOC et la distribution avec la profondeur du sol diffèrent sensiblement en comparant les fosses F1, F2 et F3 : (i) les teneurs en TOC dans l'horizon A augmentent avec la qualité du vin, de 0,41% pour F1 à 1,69% pour F3 et (ii) un horizon B profond pour F3 (qualité A) présente une teneur en carbone total similaire à celles observées pour l'horizon A de F1 (qualité C). Cette observation de la distribution du TOC doit être couplée à une stratification du rapport C/N le long de la profondeur du sol. Le faible rapport C/N (<12) observé pour tous les échantillons est à noter. De même, on remarque que F3 (qualité A) présentait le stock de carbone organique le plus élevé et que ce stock restait important même pour les horizons B profonds où le rapport C/N indiquait une disponibilité satisfaisante des nutriments par rapport à une activité potentielle satisfaisante des micro-organismes du sol. On peut parvenir à une compréhension similaire en se basant sur l'origine de la matière organique du sol pour les horizons profonds. Ici, les observations du système racinaire au cours des investigations sur le terrain peuvent être utiles : pour F3, l'observation sur le terrain a révélé la présence de racines jusqu'à 1,60 m (le fond de la fosse) et aucune limitation à l'investigation racinaire (Figure 4.4). Notamment, en ce qui concerne l'approvisionnement en eau, le système racinaire peut être utilisé pour étudier les horizons profonds du sol, et la production annuelle de biomasse associée de racines fonctionnelles constituait un apport non négligeable de matière organique fraîche, dont la minéralisation ultérieure, facilitée par le faible rapport C/N, pourrait répondre aux besoins nutritionnels. Cette stratification de la matière organique du sol dans les horizons profonds par rapport à la biomasse racinaire est bien établie dans les systèmes de production. En outre, des études ont montré la contribution globale de la biomasse racinaire aux stocks de carbone organique du sol (Balesdent and Balabane, 1996, ; Clemmensen et al., 2015, ; Kuzyakov and Domanski, 2000, ; Mendez-Millan et al., 2010), et cette contribution pourrait être significative pour les horizons plus profonds du sol (Mendez-Millan et al., 2012, ; Rasse et al., 2005, ; Rumpel and Kögel-Knabner, 2011). Enfin, la CEC peut être discutée principalement en relation avec la texture et la teneur en carbone organique du sol. La position F1 en qualité C est dominée par une fraction sableuse sur l'ensemble du profil de sol (Table 4.3) et une faible teneur en TOC, puis associée à une valeur CEC inférieure à 3,6 cmol+/kg dans les premiers 0,9 m (Table 4.3) alors que la profondeur d'enracinement est limitée à 1,25 m. A cette position, la faible teneur en TOC ne permettrait pas d'alimenter les vignes en nutriments associés aux processus de minéralisation du carbone et, indépendamment des apports en engrais minéraux, presque aucun cation ne pourrait être absorbé. Ensuite, pour la F1, la capacité globale du sol à fournir des nutriments à la vigne est extrêmement faible. Le fonctionnement est clairement différent pour le site F3 où i) la texture du sol est dominée par des fractions de limon et d'argile, ii) le stock de carbone organique du sol est suffisant pour fournir des nutriments à la vigne, et iii) une valeur CEC supérieure à 10,8 cmol+/kg indique une réserve de cation adsorbé. Dans notre étude, la meilleure qualité de vin a été observée pour les sols ayant un potentiel d'apport en nutriments plus élevé pour la vigne.

4.4.3 Dynamique du sol et de la vigne

L'une des principales fonctions du sol est d'assurer l'approvisionnement en eau et en éléments nutritifs de la vigne (White, 2003). La capacité globale du sol à répondre à ces besoins fait partie de la complexité rencontrée par les viticulteurs et les vigneron pour produire des vins de qualité. Ainsi, notre objectif principal était d'identifier les paramètres pédologiques susceptibles de limiter ou de favoriser les paramètres associés à la production de vins de qualité. Tout d'abord, nous avons effectué une étude de sol, indépendante des connaissances des vigneron. Par conséquent, nous avons produit une carte des sols à haute résolution et avons distingué trois SFU (Figure 4.3). Ensuite, pour chaque SFU, nous avons finement caractérisé les profils de sol (4.3 et figure 4.4) et surveillé le niveau de la nappe phréatique afin d'affiner les connaissances sur les interactions sol-eau et racines-vigne. Ensuite, nous avons obtenu des données des viticulteurs sur la qualité du vin afin d'en produire une représentation spatiale (Figure 4.5). Même s'il existe des différences importantes entre les cartes d'unités fonctionnelles de sol (SFU) et les cartes de classement de la qualité des vins (Figures 4.3 et 4.5), nous avons observé que la qualité A est exclusivement produite dans la SFU-3 et la qualité C est exclusivement produite dans la SFU-1. La qualité intermédiaire B est produite à la fois dans la SFU-2 et dans une partie de la SFU-1. Cette diversité de la qualité du vin observée dans la SFU-1 suggère que (i) la variabilité des paramètres environnementaux de la SFU-1 est certainement plus grande que ce que nous avons caractérisé, ou (ii) des facteurs environnementaux supplémentaires devraient être inclus pour une meilleure caractérisation de cette SFU.

La figure 4.7 est une représentation conceptuelle du système "sol-nappe", qui limite l'architecture et le fonctionnement des racines de la vigne pendant la période de croissance et intègre les principaux résultats de la présente étude. Dans cette représentation, les trois sous-systèmes (SFU-1, SFU-2 et SFU-3) et les conditions associées du système, par exemple le sol, la nappe phréatique et les racines, sont représentés à trois dates différentes (t_1 , t_2 et t_3). Pour les niveaux saturés en eau, nous avons distingué la zone saturée (*saturated zone*, SZ), mesurée avec les piézomètres, de la zone partiellement saturée (*partially saturated zone*, PSZ) sous le contrôle des remontées capillaires. Dans les sols, la hauteur de la remontée capillaire dépend de la porosité matricielle de chaque sol (Hillel, 1998). Dans la figure 4.7, nous avons suggéré que les élévations capillaires étaient limitées par les textures grossières de F1, intermédiaires dans les textures argileuses de F2, et importantes pour les textures limono-argileuses de F3.

À t_1 (janvier), le niveau de la nappe phréatique passe du niveau minimum (début de l'hiver) au niveau maximum (avril). Compte tenu des températures du sol et de l'atmosphère (moins de 10°C), la vigne est dormante, la croissance des racines de la vigne n'est pas active et l'activité microbiologique du sol est globalement réduite. Pendant cette période, si nécessaire, l'alimentation hydrique sera faite à partir de l'eau présente dans les horizons superficiels alimentés par des pluies fréquentes, et les nutriments seront fournis par la solution du sol en fonction de la saturation de la CEC. Ainsi, SFU-2 et SFU-3 auront le meilleur accès à la fois à l'eau et aux nutriments.

À t_2 (avril), la nappe phréatique est au niveau le plus élevé (distance la plus faible entre la surface topographique et le niveau de la nappe phréatique). Les bourgeons de la vigne

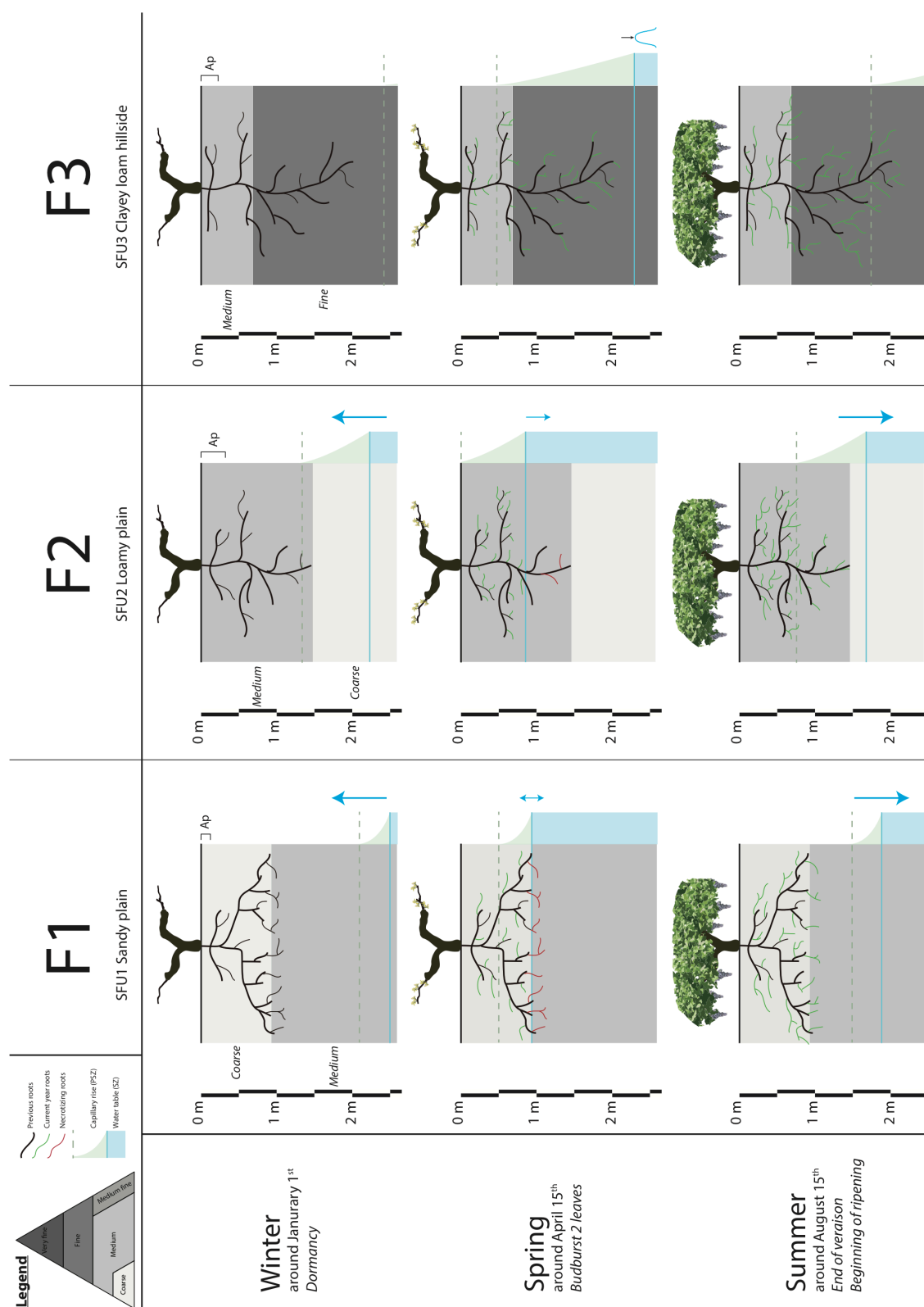


FIGURE 4.7 – Représentation conceptuelle de l'enracinement de la vigne en position F1-F3 selon la saison et les variations de la nappe phréatique : impact de la zone saturée (SZ) et de la zone partiellement saturée (PSZ).

débourent et la production de biomasse démarre (racines et sarments). Les conditions d'humidité et de température du sol sont favorables à l'activité microbiologique du sol. Pendant cette période, la capacité globale de la vigne à capter l'eau est liée à l'architecture de ses racines, qui est limitée par la nappe phréatique. Dans SFU-1 et SFU-2, les racines sont soumises à des conditions de saturation en eau et leur développement est limité par le niveau haut de la zone saturée. De plus, une nécrose peut se produire dans les racines précédemment situées dans la zone nouvellement saturée. Pour le SFU-3, l'eau sera disponible dans la zone d'enracinement dans la zone partiellement saturée, sans nécrose endommageant les racines. Pour les besoins en nutriments, toutes les positions présentent des conditions satisfaisantes tant pour la minéralisation de la matière organique du sol que pour la nitrification par les microorganismes du sol. Cependant, en considérant le stock initial de TOC et le volume de la zone d'enracinement, SFU-3 fournit les conditions permettant le meilleur accès aux nutriments du sol sans les limitations associées à l'excès d'eau.

À t_3 (août), le niveau de la nappe phréatique passe du niveau maximal (t_2) au niveau minimal (début de l'hiver). La production de biomasse (étape végétative) est presque terminée, la croissance des racines et des pousses diminue, les baies de raisin mûrissent complètement et la maturation commence. La température de l'air est responsable de l' ET_0 élevée, et la température du sol est optimale, mais l'humidité du sol est un facteur limitant l'activité microbiologique du sol. Pendant cette période sans précipitations importantes et subissant de fortes baisses du niveau de la nappe phréatique, le système racinaire sera utilisé pour l'approvisionnement en eau. Les vignes de SFU-1, qui à t_2 était en conditions d'excès d'eau, avec un système racinaire limité, devront faire face à des conditions de déficit hydrique liées à une conductivité hydraulique élevée des sols sableux. Les vignes des SFU-2 et SFU-3 seront soumises à des contraintes hydriques modérées par rapport à leurs conditions intermédiaires limono-argileuses, favorables à la remontée capillaire et présentant un fort potentiel hydrique. Durant les années pluvieuses, SFU-2 peut ne souffrir d'aucun stress hydrique. Parmi ces deux positions, SFU-3 présentera des conditions de containte hydrique élevée en raison de la texture argileuse et de sa faible variabilité annuelle.

4.5 Conclusion

Il existe une relation entre la vigne et le sol pour répondre aux besoins en eau et en nutriments de la vigne. Notre objectif principal était d'identifier les paramètres pédologiques susceptibles de limiter ou de favoriser les paramètres de la production de vins de qualité. En conséquence, nous avons produit une carte des sols à haute résolution et avons distingué trois SFU, qui étaient proches de la carte de classement de la qualité des vins. Les facteurs explicatifs de cette concordance résident dans les interactions du sol, de l'eau et des racines au cours du temps. L'ensemble de ces dynamiques (du sol, de l'eau et des systèmes racinaires) est responsable de la différenciation de la qualité de vin. Les meilleures qualités de vin ont été observées dans des conditions sans limitation de prospection des racines en raison d'une couche de roche dure ou d'une zone saturée. En outre, le meilleur sol pour un vin de qualité est observé dans (i) des conditions de faible

contrainte hydrique liées à la capacité globale de rétention d'eau des sols limono-argileux et (ii) aucune limitation des conditions nutritives liées aux stocks importants de matière organique du sol et à une CEC plus élevée même dans les horizons profonds du sol.

Cependant, ce résultat implique que les interactions sol-racine profondes doivent être étudiées afin de confirmer que le meilleur sol pour un vin de qualité provient à la fois de carences en eau non sévères et de conditions nutritives non limitées.

Chapitre 5

Apport des mesures de résistivité électrique du sol

5.1 Introduction

La réalisation d'études pédologiques est très souvent coûteuse en temps et en argent, pour un rendu très dépendant des compétences de l'observateur. Pour ces raisons, l'usage de nouvelles méthodes de caractérisation des sols s'est développé ces dernières décennies, avec l'ambition d'une diminution des coûts d'acquisition, de la possibilité associée d'une augmentation des surfaces cartographiées et une réduction espérée de la subjectivité souvent évoquée dans les approches de cartographie traditionnelle.

Souvent, ces nouvelles méthodes sont fondées sur la quantification de variables environnementales *via* l'utilisation de capteurs. Lors de prospections pédologiques, les méthodes de géophysique de sub-surface sont aujourd'hui couramment employées et dans la majorité des études « terroir-centrées », c'est la mesure de la résistivité électrique apparente des sols qui devient la variable d'intérêt. Au-delà du potentiel de forte densité d'échantillonnage spatial et d'automatisation de la chaîne d'acquisition et de traitement, l'emploi de ces méthodes nécessite des moyens technologiques avancés que seules quelques sociétés spécialisées sont capables de mettre en œuvre pour des coûts raisonnables.

Au regard du potentiel avancé et de coût de mise en œuvre raisonnable, les mesures de résistivité électrique apparente des sols par traînée électrique sont souvent utilisées en agriculture, et en viticulture, en particulier pour caractériser la variabilité des sols à des fins de zonage terroir ou micro-terroir (Michot, 2003 ; André et al., 2012 ; Morari et al., 2009 ; Taylor et al., 2009). Cependant, cette méthode présente plusieurs inconvénients qui restent difficiles à contourner.

- 1) En soi, les mesures de résistivités électriques apparentes des sols ne renseignent pas sur une propriété de sol, mais sur un ensemble de variables pédoclimatiques dont les effets individuels devront être déconvolués. (cf. chapitre 3). En effet, la propagation du signal dépend de nombreuses variables dont la teneur en eau des sols (sous dépendance des paramètres de structure, de texture et de teneur en matière

organique), de la présence des ions dans la solution du sol et de la température des matériaux prospectés. Dès lors, ces méthodes ne peuvent s'affranchir de prospections pédologiques classiques complémentaires. A posteriori, il sera difficile de quantifier finement toutes ces variables sur la base de simples sondages à la tarière, c'est pourquoi l'ouverture de fosses pédologique semble indispensable. Quand de telles prospections pédologiques sont possibles, l'intérêt des méthodes de géophysique résidera donc dans la capacité de spatialisation des variables documentées sur fosses et à la tarière.

- 2) Les mesures géophysiques sont intégratrices, car la valeur retournée en une position géographique est caractéristique d'un volume pédologique donné, volume variable en relation aux conditions pédoclimatiques sous-jacentes et à la géométrie des électrodes. De fait, ces méthodes entraînent un lissage des variabilités à courte distance et une perte probable de précision. Aussi, la mise en relation des variations de la résistivité avec des variables pédologiques décrites ponctuellement (c'est-à-dire sur fosses pédologiques) n'a de sens que si l'acquisition géophysique est menée à haute fréquence (forte densité spatiale et faible écartement des électrodes).
- 3) Dans la grande majorité des cas, il est impossible d'inverser les valeurs de résistivité électrique apparentes mesurées au champ afin d'obtenir des valeurs de résistivité électrique vraies, qui seules sont représentatives des différents horizons pédologiques prospectés. Obtenir ces valeurs de résistivité vraies nécessite alors la réalisation de sondages électriques complémentaires, spatialement distribués sur les différents types de sols présents sur le domaine prospecté. Cette opération requiert un temps d'acquisition souvent très long et un savoir-faire spécifique, ce qui explique que ce type d'inversion est rarement fait en conditions professionnelles.
- 4) L'efficacité des prospections est fortement dépendante du contexte pédologique local. En effet, un bon contraste électro-stratigraphique des horizons est nécessaire pour obtenir une réponse du signal exploitable.
- 5) Enfin, nous précisons qu'en dépit de la promesse annoncée, les coûts de telles interventions ne sont pas négligeables et qu'ils ne compensent que peu les gains réalisés par la diminution du nombre de sondages à la tarière. De telles investigations semblent donc réservées à des productions agricoles qualitatives, telles certaines productions viti-vinicoles, désireuses de connaître finement la nature et distribution de leurs sols, de manière à gérer précisément l'alimentation en eau et en nutriment de leur production.

Dans ce chapitre, notre objectif est de tester l'intérêt de la résistivité électrique apparente et vraie des sols, à des fins de zonage micro-terroir. Au-delà de l'entrée purement cartographique, l'ambition est aussi de tester l'intérêt de la mise en œuvre de ces méthodes pour caractériser le fonctionnement du pédosystème, soit une entrée fonctionnelle. Dans cette démarche, dans un premier temps, nous analysons les données de géophysique, par la suite nous confrontons ces mesures aux approches classiques de cartographie haute fréquence et à l'approche plus synthétique dite d'unité fonctionnelle de sol (SFU).

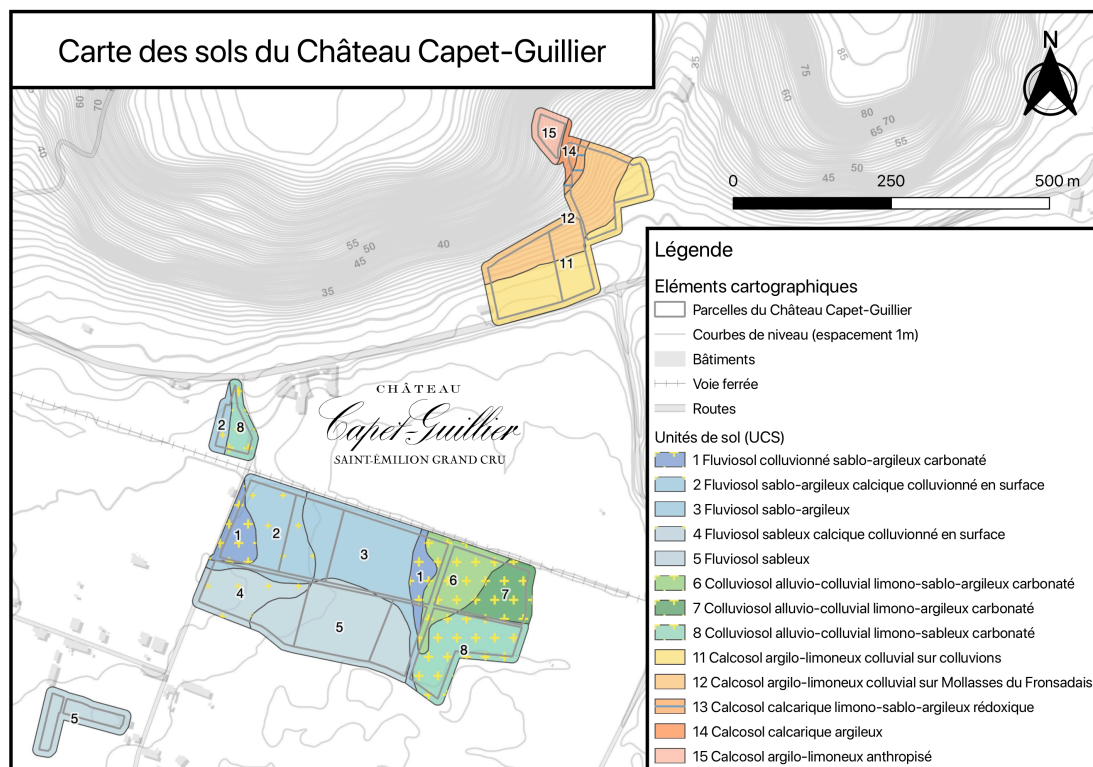


FIGURE 5.1 – Carte des unités cartographiques de sol (UCS) au Château Capet-Guillier. Version française de la carte présentée dans le Ch.4.

5.2 Matériel et méthodes

5.2.1 Cartographie pédologique et SFU

Dans ce chapitre, nous reprenons les résultats cartographiques présentés dans le chapitre précédent (Chapitre 4), soit la carte des sols (Figure 5.1) ainsi que la carte des unités fonctionnelles de sol (Figure 5.2) présentées ici en français. La carte des sols permettra de tester la cohérence entre le signal résistif et les unités cartographiques de sol (UCS). La carte des unités fonctionnelle de sol permettra de tester la cohérence entre le signal résistif et les trois unités fonctionnelles proposées.

5.2.2 Acquisition des données de résistivité électrique apparentes : MU-CEP

Le dispositif d'acquisition utilisé dans ce travail est de type MUCEP (cf. Chapitre 3). L'acquisition des données a été faite en utilisant l'appareillage mis à disposition par la société GéoCarta. Après les prospections de terrain, nous avons récupéré deux types de données de résistivité électrique apparente des sols :

- les données brutes non interpolées, où chaque point de mesure est spatialement

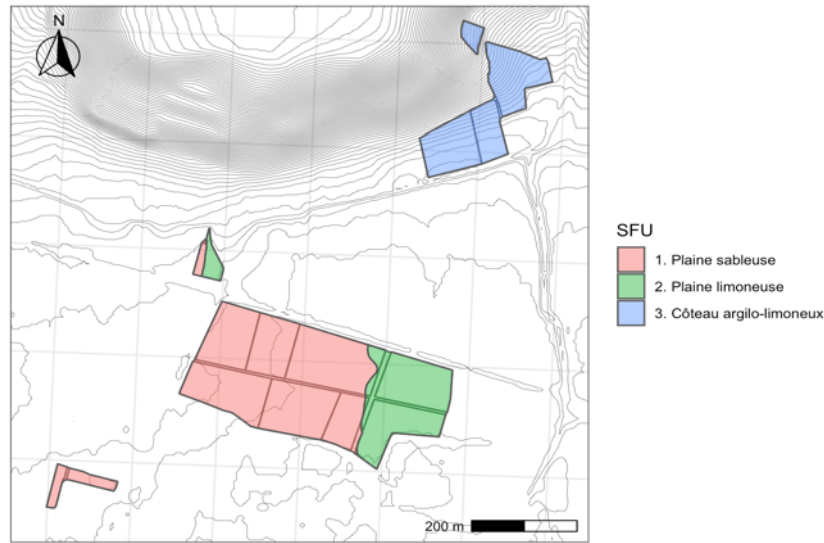


FIGURE 5.2 – Carte des unités fonctionnelles de sol (SFU) sur le vignoble de Capet-Guillier. Version française de la carte présentée dans le Ch.4.

référencé (X, Y, Z) et associé à 3 valeurs de résistivité : une mesure pour chacune des voies ;

- les données retravaillées par GéoCarta sous forme d’un raster composé de cellules de 2*2 m. Dans ce cas, les données ont été filtrées selon la méthode “*1D median moving window filtering*” puis spatialement interpolées selon la méthode “*2D bicubic spline interpolation*”.

Bien que le jeu de données classiquement distribué aux clients soit le format raster, dans ce travail, nous avons travaillé sur les données brutes. Les valeurs de percentiles 98 ont été utilisées comme valeur seuil pour filtrer les valeurs de résistivité excessivement élevées généralement générées par des mauvais contacts des électrodes avec le sol (Michot, 2003). Dans cette procédure, nous avons écarté chacune des positions possédant une valeur supérieure à la valeur seuil du percentile 98, sur au moins l’une des trois voies.

5.2.3 Acquisition des données de tomographie

Les détails de l’acquisition des données de résistivité électrique par tomographie au Château Capet-Guillier sont détaillés dans la section 3.4.2. La figure 5.3 présente la localisation du profil tomographique au sein des parcelles de Capet-Guillier. Cinq sondages électriques 1D (X1 à X5) ont également été réalisés à partir des données de tomographie, leurs localisations est notée sur la figure 5.3.

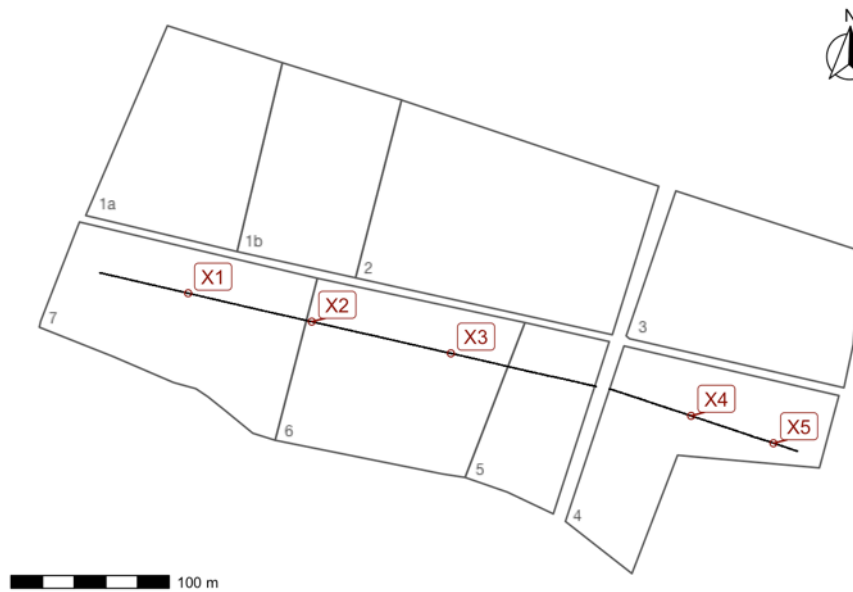


FIGURE 5.3 – Localisation des sondages électriques le long du profil de tomographie.

5.3 Résultats

5.3.1 Données MUCEP

5.3.1.1 Les valeurs brutes

Les statistiques descriptives des données brutes sont détaillées dans la table 5.1. Avant application du filtre, l'étendue numérique de l'ensemble des valeurs (V_1 , V_2 et V_3) était de 1 à 8204,8 Ohm.m. Par ordre décroissant, ces étendues numériques sont $V_1 > V_3 > V_2$, traduisant ainsi une plus grande étendue des valeurs de marge sur les voies V_1 et V_3 . Après application du filtre, nous travaillons donc sur une étendue numérique globale allant de 1 à 697,2 Ohm.m. Dans ce cas, les étendues numériques décroissantes par voies sont $V_1 > V_2 > V_3$. Cet ordre est plus cohérent avec l'idée générique d'une diminution des résistivités avec la profondeur (Figure 5.4).

Afin de tester l'effet du filtre sur la distribution des valeurs, nous avons représenté en figure 5.4, la distribution de ces valeurs pour chacune des voies sans (a) et avec filtre (b). Ces représentations, sous la forme de boîtes à moustache nous apprend que dans les deux cas, les ordres observés sur les données brutes (ordre de l'étendue numérique des voies, ordre des valeurs de médiane et ordre des valeurs de l'espace interquartile) sont conservées pour chacune des voies après application du filtre. Dans la suite de ce mémoire, nous travaillons donc sur ces valeurs dites filtrées.

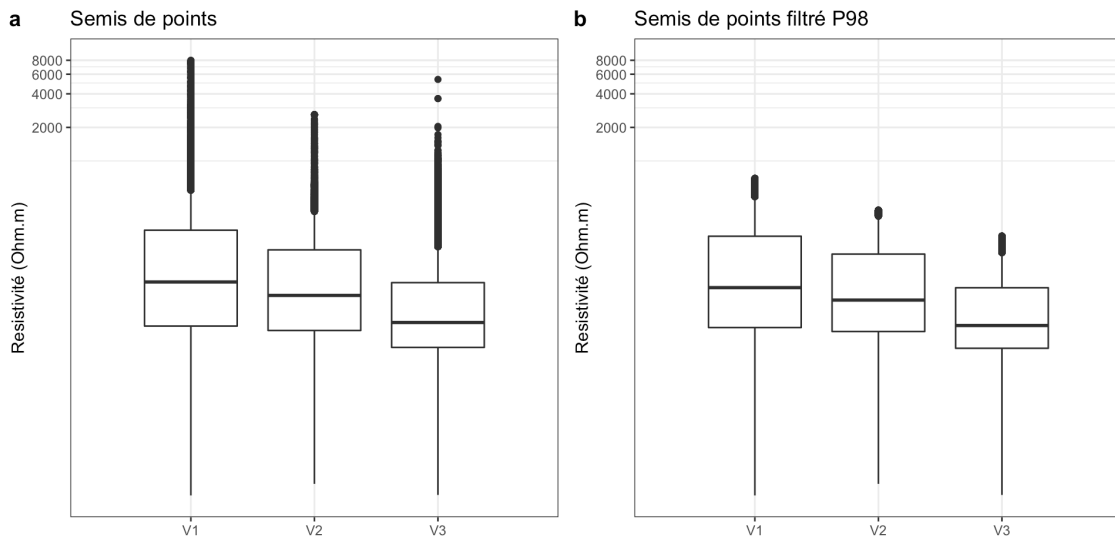


FIGURE 5.4 – Distribution des valeurs de résistivité électrique apparente des sols de Capet-Guillet : (a) données brutes (b) données brutes filtrées (seuil percentile 98).

TABLE 5.1 : Statistiques descriptives des données brutes de résistivité électrique apparente des sols de Capet-Guillier.

	Moyenne	Ecart Type	Min	P 02	P 25	Mediane	P 75	P 98	Max
Voie 1	174.3	302.7	1.0	10.0	33.1	82.1	239.4	697.2	8204.8
Voie 2	107.4	114.6	1.3	18.4	30.2	62.2	159.4	361.8	2601.6
Voie 3	60.5	77.8	1.0	8.0	21.3	35.6	81.0	212.0	5387.2

Pour ce qui est de la relation entre les valeurs de résistivité avec la profondeur de prospection, on constate une ordination décroissante des valeurs de la médiane est de V1 (82,1 Ohm.m) pour horizons de surface, à V2 (62,2 Ohm.m) pour les volumes intermédiaires puis V3 (35,6 Ohm.m) pour les volumes prospectés les plus importants. La variabilité sur chacune des voies, telle que traduite par la distance interquartile (Q3-Q1 en Ohm.m), suggère le même ordre que précédemment évoqué, avec une variabilité plus importante sur la V1 (206,3 Ohm.m), puis une variabilité intermédiaire sur la V2 (129,2 Ohm.m) et enfin la variabilité la plus faible sur la V3 (59,7 Ohm.m). On constatera que ces variabilités interquartiles sont essentiellement liées aux valeurs bornes supérieures (Q3), car les valeurs des premiers quartiles (Q1) sont assez proches sur les trois voies.

Cet ordonnancement des valeurs de V1 à V3 permet d'établir une carte de cohérence (Figure 5.5). Cette carte est un cartogramme repérant les positions pour lesquelles l'ordre $V1 > V2 > V3$ est strictement respecté. Les positions non cartées sont celles pour lesquelles l'ordre n'est pas respecté, donc les positions pour lesquelles (i) soit une variation pédostratigraphique locale est présente, (ii) soit les conditions de la mesure n'étaient pas optimales, comme un mauvais contact terre-électrodes par exemple. Dans cette représen-

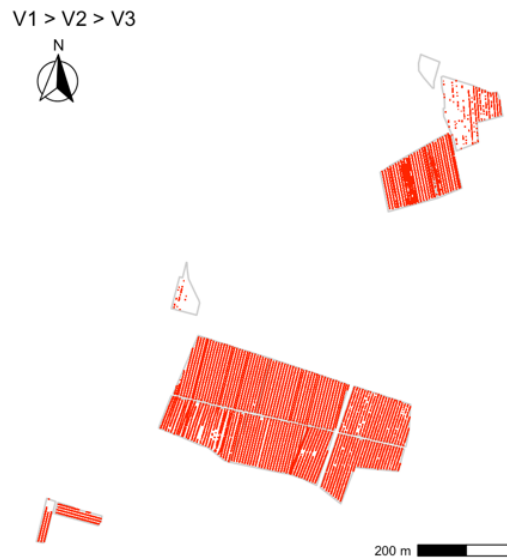


FIGURE 5.5 – Carte de cohérence des mesures de résistivité électrique apparente des sols. Les points rouges renseignent les positions pour lesquelles $V1 > V2 > V3$.

tation, nous observons que pour la plus grande partie du domaine, les données ponctuelles respectent massivement l'ordre décroissant des valeurs de $V1$ à $V3$, soit pour des volumes prospectés croissants. Les lacunes de représentation sont essentiellement présentes au Nord du domaine, sur un terrain accidenté (fortes pentes) et sur la parcelle centrale P (cf. carte du parcellaire : Figure 2.10).

Considérant le faible niveau de confiance pour la voie 3, et les besoins de la vigne, normalement centré sur le premier mètre de sol, nous avons affiné la carte de cohérence (Figure 5.5), pour proposer une carte de cohérence sur les voies $V1$ et $V2$ (Figure 5.6). Sur cette représentation, les positions pour lesquelles la valeur en $V1$ est supérieure à la valeur en $V2$ sont cartographiées en rouge, alors que les positions pour lesquelles la valeur en $V1$ est inférieure à la valeur en $V2$ sont en bleu. Sans entrer ici, dans la discussion des résultats, on notera simplement les analogies en termes de structure spatiale, entre cette carte et la cartographie des textures de sol (Figure 5.1) présentée au chapitre 4.

5.3.1.2 Distribution et structure spatiale des valeurs

La représentation de la distribution des valeurs sous la forme d'histogramme des valeurs (Figure 5.7) met en évidence des distributions non normale (de type log normale) pour chacune des voies avec une tendance bimodale pour la voie 1. La valeur du mode associée à ces distributions est de 27 Ohm.m pour $V1$ et $V2$ et de 21 Ohm.m pour la $V3$.

La figure 5.8, propose une représentation cartographique des valeurs locales de résistivité apparente des sols, de la voie 1 à la voie 3. Toutes voies confondues, les valeurs les plus élevées sont observées sur la voie 1, alors que les valeurs les plus faibles sont observées sur la voie 3. La voie 1 présente l'étendue numérique la plus large, avec les valeurs faibles observées au Nord du domaine d'étude, sur les positions dites de coteaux. Les valeurs



FIGURE 5.6 – Carte de cohérence des mesures de résistivité électrique apparente des sols. Les points rouges renseignent les positions pour lesquelles $V1 > V2$, les points bleus renseignent les positions pour lesquelles $V1 < V2$.

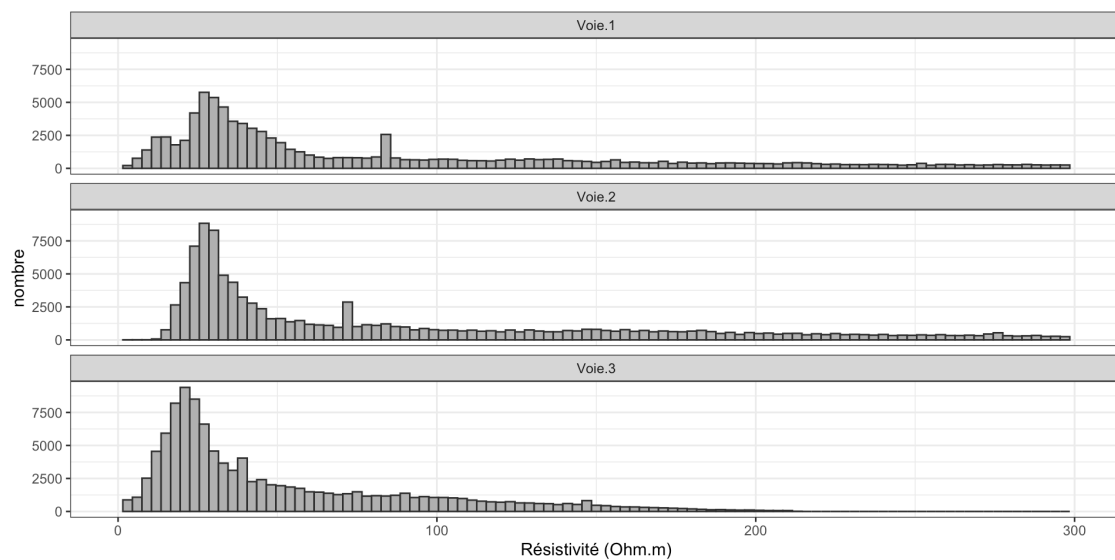


FIGURE 5.7 – Histogramme par voie des valeurs brutes de résistivité apparente mesurées avec le MUCEP à Capet-Guillier.

les plus fortes sont quant à elles observées dans le secteur dit de la plaine (domaine Sud). Ce vaste domaine Sud est divisé en trois sous-domaines (sous-domaines Sud, Nord et Est), avec des valeurs faibles et généralisées dans le sous-domaine Sud, un mélange de valeurs faibles et moyennes dans le sous-domaine Nord et exclusivement des valeurs moyennes dans le sous-domaine Est. Ces schémas spatiaux se retrouvent pour les voies 2 et 3. Simplement, pour ces deux voies, les valeurs de la tendance centrale sont plus faibles et les valeurs marginales plus resserrées autour du mode. On remarquera toutefois que pour la voie 3, une structure spatiale supplémentaire semble se dégager et se surimposer au schéma spatial précédemment évoqué. Cette structure supplémentaire se caractérise par la présence de zones de valeurs faibles (les plus faibles observées), zones dont les limites sont parfois linéaires. Ces zones sont observées dans le domaine Nord, et dans le sous-domaine Nord du domaine Sud.

La mise en œuvre de méthode de géostatistique nous permet de mieux caractériser les structures spatiales pour chacune des voies. Dans ce travail d'analyse géostatistique, nous avons séparé chacune des trois populations (population V1, population V2 et population V3) en sous-populations. Ces sous-populations sont le rassemblement des mesures effectuées sur les grands amas parcellaires, qui correspondent aux grands secteurs géomorphologiques dits de coteau et de plaine. Pour chacune des voies, ces sous-populations ont été traitées séparément afin de produire des variogrammes globaux par secteur, soit des variogrammes globaux de plaines et des variogrammes globaux de coteau. Les variogrammes associés aux parcelles isolées ne sont pas présentés.

La Figure 5.9 présente l'ensemble des variogrammes expérimentaux globaux, par secteur et pour chacune des voies. Au global, les deux secteurs présentent des variogrammes avec des morphologies des ajustements distincts. Si, nous considérons l'ajustement des distances maximales de corrélation à 25 m pour le secteur de coteau et à 120 m pour le secteur de plaine, les variogrammes de coteaux présentent une augmentation de la variance avec une amorce de plateau ajustable avec un modèle de type stable. Les variogrammes de plaines présentent quant à eux une augmentation plus proche d'un modèle linéaire. Pour les variogrammes de coteau, la portée semble être aux environs de 25 m pour un palier variable (i) de valeur la plus faible pour la voie 2 et (ii) de variance la plus élevée en voie 1. Les variogrammes de plaines sont caractérisés par une distance de portée plus élevée avec une première distance caractéristique pour une distance de 70-75 m et une seconde distance caractéristique d'environ 120 m. Pour ces derniers, les valeurs de palier sont décroissantes de la voie 1 à la voie 3.

5.3.1.3 Résistivités et UCS

Dans cette section, nous confrontons les mesures de résistivité électrique apparente de chacune des voies au zonage par unité cartographique de sol (UCS). La figure 5.10, propose les histogrammes de valeurs par voie (V1, V2 et V3) pour chacune des UCS (UCS-1 à UCS-14). Dans cette représentation, la qualité de la représentation des distributions est étroitement liée à la superficie associée, donc au nombre de mesures. Ainsi, les UCS 13 et 14 de faible étendue spatiale sont bien moins caractérisées que les UCS n°3 et 5. De manière globale, quelle que soit l'UCS considérée, la valeur du mode ainsi que l'étendue

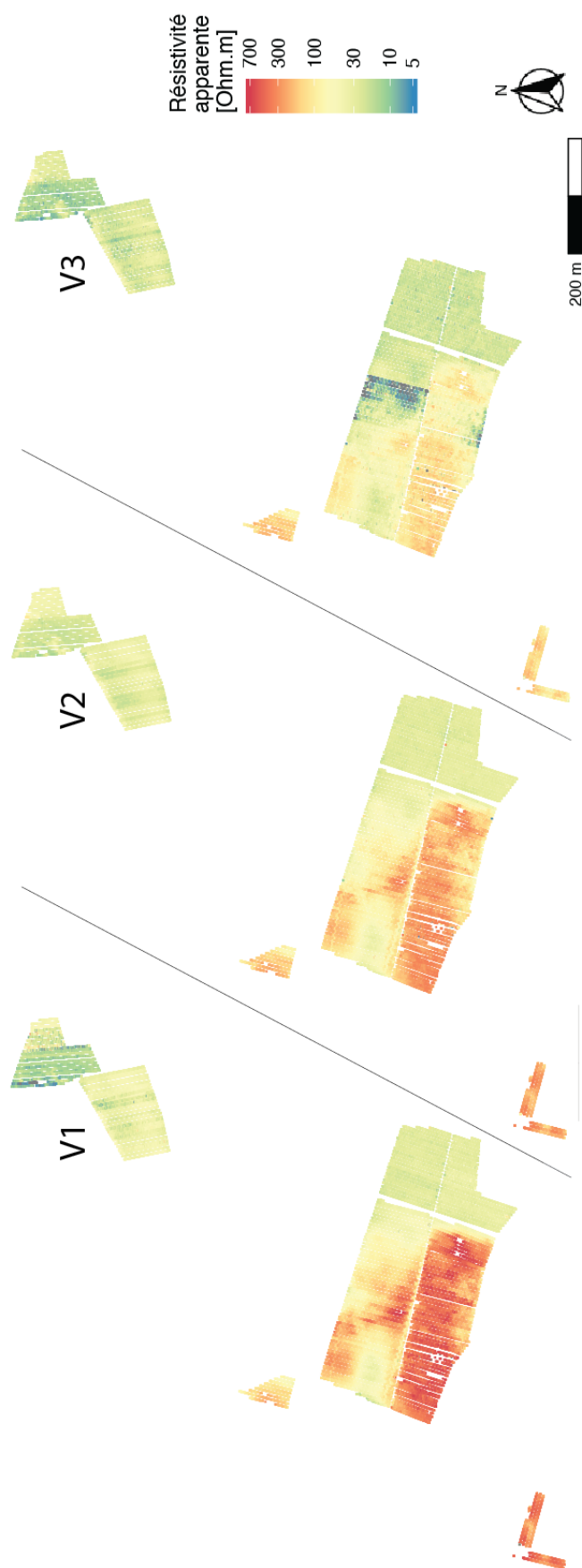


FIGURE 5.8 – Cartogramme des mesures de résistivité électrique apparente des sols pour les voies 1, 2 et 3.

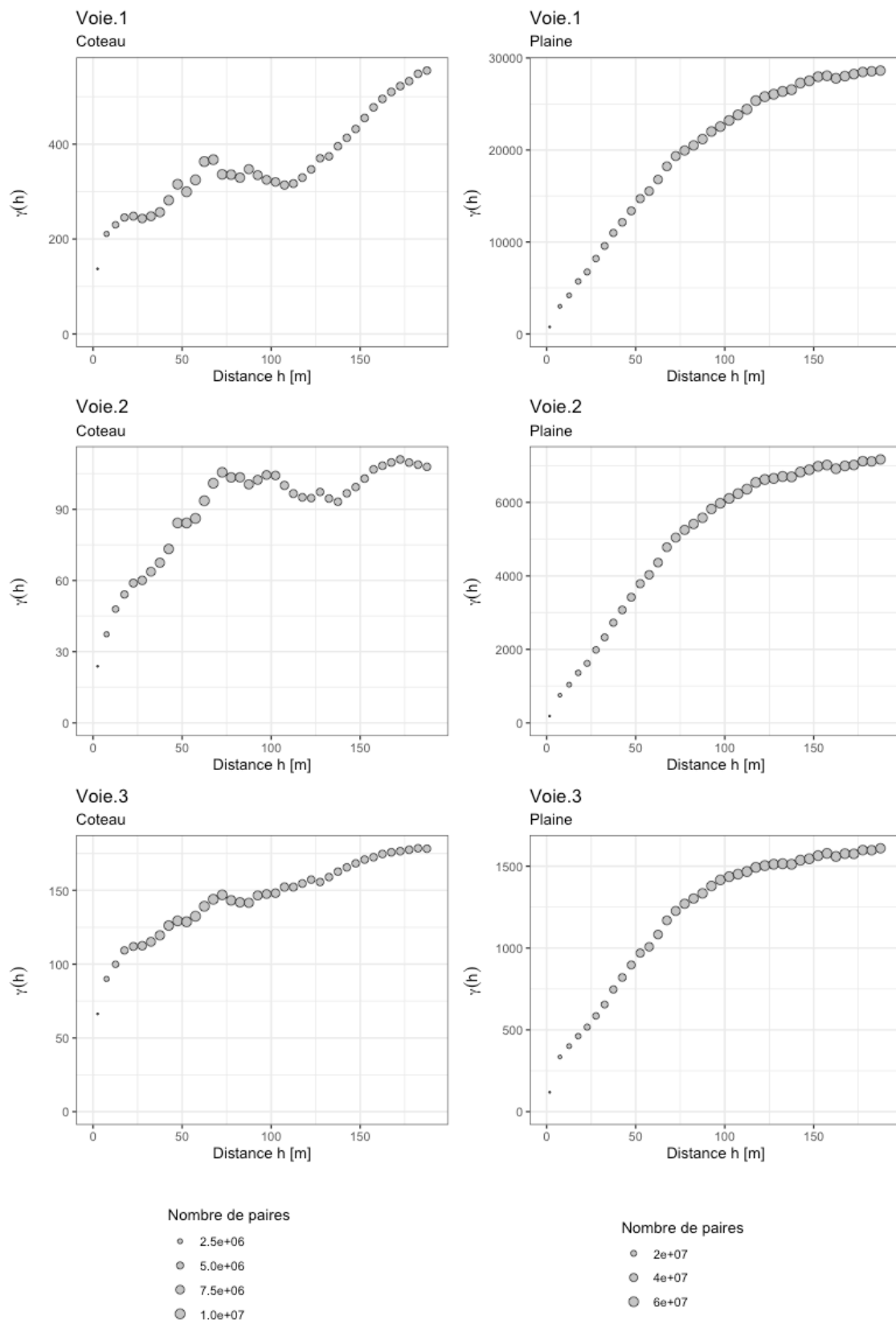


FIGURE 5.9 – Semivariogrammes des valeurs de résistivité électrique apparente des sols pour le secteur de coteau (gauche) et le secteur de plaine (droite) pour chacune des trois voies V1 (haut), V2(milieu) et V3 (bas).

numérique des valeurs mesurées diminuent de la voie 1 à la voie 3. Pour certaines UCS, une distribution bimodale est visible, comme pour l'UCS-2 voie 3 (UCS-2-V3) et l'UCS-12 voie 1 (UCS-12-V1). Ces variations dans la nature des distributions nous amènent à analyser plus en avant chacune des UCS. Pour cela la table 5.2 présente les statistiques descriptives des valeurs de résistivité par voie pour chaque UCS.

Les histogrammes pour les voies de l'UCS-1 montrent des distributions de type log normal, avec un mode diminuant avec la profondeur, de 50 Ohm.m pour UCS-1-V1 à 30 Ohm.m pour UCS-1-V3. Pour cette UCS, l'amplitude des valeurs suit la même diminution tendancielle pour des volumes prospectés plus importants. L'UCS-2, présente quant à elle un histogramme plus écrasé traduisant un nombre de mesures plus faible par classe, mais avec des valeurs numériquement plus dispersées (plus grand nombre de classes non nulles). Pour cette UCS-2-V1 la valeur du mode est de 90 Ohm.m. L'UCS-2-V2 présente une distribution bimodale avec un mode principal à 80 Ohm.m et le secondaire à 150 Ohm.m. L'UCS-2-V3 présente également une distribution bimodale, pour une étendue des valeurs plus faibles ainsi que des modes de 50 et 95 Ohm.m. Les trois voies de l'UCS-3 ont une distribution asymétrique dont l'étendue se resserre en profondeur, avec des modes de 80 Ohm.m (UCS-3-V1), 70 Ohm.m (UCS3-V2) et 45 Ohm.m (UCS3-V3). Les histogrammes des UCS-4 et 5 sont similaires avec des valeurs de résistivité légèrement plus faibles pour l'UCS-5 que l'UCS-4. Les UCS-6 et 7 montrent une distribution très resserrée qui évolue peu avec la profondeur (modes proches de 20 Ohm.m pour l'UCS-6-V3 et 25 Ohm.m pour l'UCS-7-V3). L'UCS-8 présente des résistivités apparentes légèrement plus élevées (modes de 30 Ohm.m) pour les voies 1 et 2, avec quelques valeurs résiduelles de 50 à 200 Ohm.m. L'UCS-11 a des distributions presque normales pour ses trois voies. Le mode passe de 45 Ohm.m pour UCS-11-V1, à 35 Ohm.m pour UCS-11-V2 et 25 Ohm.m pour UCS-11-V3. Les histogrammes de l'UCS-12 sont asymétriques et UCS-12-V1 présente une distribution bimodale (15 Ohm.m et 35 Ohm.m). Pour UCS-12-V2, le mode est 20 Ohm.m et pour UCS-12-V3, le mode est 15 Ohm.m. Les UCS-13 et 14 présentent peu de valeurs du fait de la faible surface des plages cartographiques couvertes par la prospection avec le MUCÉP. Les distributions des résistivités sont légèrement asymétriques avec des valeurs très faibles (modes compris entre 15 et 20 Ohm.m).

TABLE 5.2 : Statistiques descriptives des résistivités électriques apparentes pour les voies V1, V2 et V3, catégorisées par Unité Cartographique de Sol (UCS).

no.ucs	V1 min	V1 med	V1 max	V2 min	V2 med	V2 max	V3 min	V3 med	V3 max
1	1	52.1	359.6	7.9	46.0	321.4	4.4	32.2	203.7
2	1	149.2	687.2	4.5	122.0	361.4	1.3	72.6	211.7
3	2	105.2	697.2	11.1	71.8	360.5	1.0	34.3	211.7
4	3	430.7	697.2	1.3	275.7	361.8	1.0	135.9	211.8
5	1	339.6	697.2	2.2	189.3	361.8	1.0	82.4	212.0
6	7	27.1	95.2	10.5	27.0	264.3	1.5	20.9	159.4
7	10	27.1	123.2	10.8	26.4	176.9	1.1	20.6	164.9
8	10	32.0	225.4	8.9	29.5	306.8	5.3	22.3	211.8

no.ucs	V1 min	V1 med	V1 max	V2 min	V2 med	V2 max	V3 min	V3 med	V3 max
11	1	41.1	416.7	9.5	35.6	102.0	1.8	26.3	178.3
12	1	20.0	691.2	9.5	23.8	180.9	1.9	17.4	210.7
13	1	12.0	30.1	7.6	20.6	56.9	2.7	13.0	68.8
14	1	9.0	29.1	11.8	19.1	55.3	4.3	11.1	53.9

5.3.1.4 Résistivités et SFU

La Figure 5.11 montre la distribution des résistivités en fonction des unités fonctionnelles de sol (Figure 5.2) définies dans le chapitre 4. Pour la SFU1, les histogrammes présentent une distribution assez étalée (de 0 à plus de 600 Ohm.m pour SFU1-V1) associée à une diminution de la dispersion des valeurs avec la profondeur (de 0 à plus de 400 Ohm.m pour SFU1-V2, et de 0 à 200 Ohm.m pour SFU1-V3). Le mode diminue également avec la profondeur : 80 Ohm.m pour SFU1-V1 à 40 Ohm.m pour SFU1-V3.

Les distributions des valeurs pour SFU2 et SFU3 sont plus ramassées que celle observées pour SFU1. Les valeurs de résistivité sont très groupées sous une valeur seuil de 50 Ohm.m pour SFU-2 alors que la valeur équivalente pour SFU3 est de 100 Ohm.m. Quoi qu'il en soit les distributions pour SFU2 et SFU3 montrent elles aussi une tendance à la diminution de la voie 1 à la voie 3.

5.3.1.5 Résistivité et propriétés physico-chimiques

La Figure 5.12 présente les diagrammes de mise en relation des valeurs de résistivité électrique apparente des sols, mesurées sur la voie 1 et certaines variables pédologiques déterminées ponctuellement dans un voisinage de moins de 5 m. De cette représentation ressort la relation classique entre valeurs de résistivité et granulométrie des sols : soit une diminution des valeurs de résistivité pour des teneurs en fraction argile croissantes, soit une augmentation des valeurs de résistivité pour des teneurs en fraction sables grossiers croissantes. Dans le même temps, ces relations tendanciellles sont associées à de fortes variabilités, dans le domaine des faibles teneurs en argiles et dans le domaine des fortes teneurs en sables. Dans notre cas d'étude, nous remarquons aussi une signature nette pour les très faibles valeurs de résistivité dans le cas d'une combinaison « très forte teneur en argiles, très faible teneur en sable et très forte teneur en CaO échangeable » : soit pour les positions de coteau.

Afin de poursuivre l'analyse des relations entre résistivité, variables pédologiques et valeurs de résistivité, nous avons mené une analyse en composante principale (ACP - Figure 5.13). Dans cette représentation, seules les valeurs mesurées sur les voies 1 et 2 sont utilisées ainsi que les variables pédologiques mesurées dans un voisinage de moins de 5 m et dans une limite à 0,5 m de profondeur. Là, les individus projetés sont les positions pédologiques prospectées, qui sont différenciées en relation à leur SFU d'appartenance. De cette représentation, nous observons une dissociation claire des SFU1 et SFU3 dont

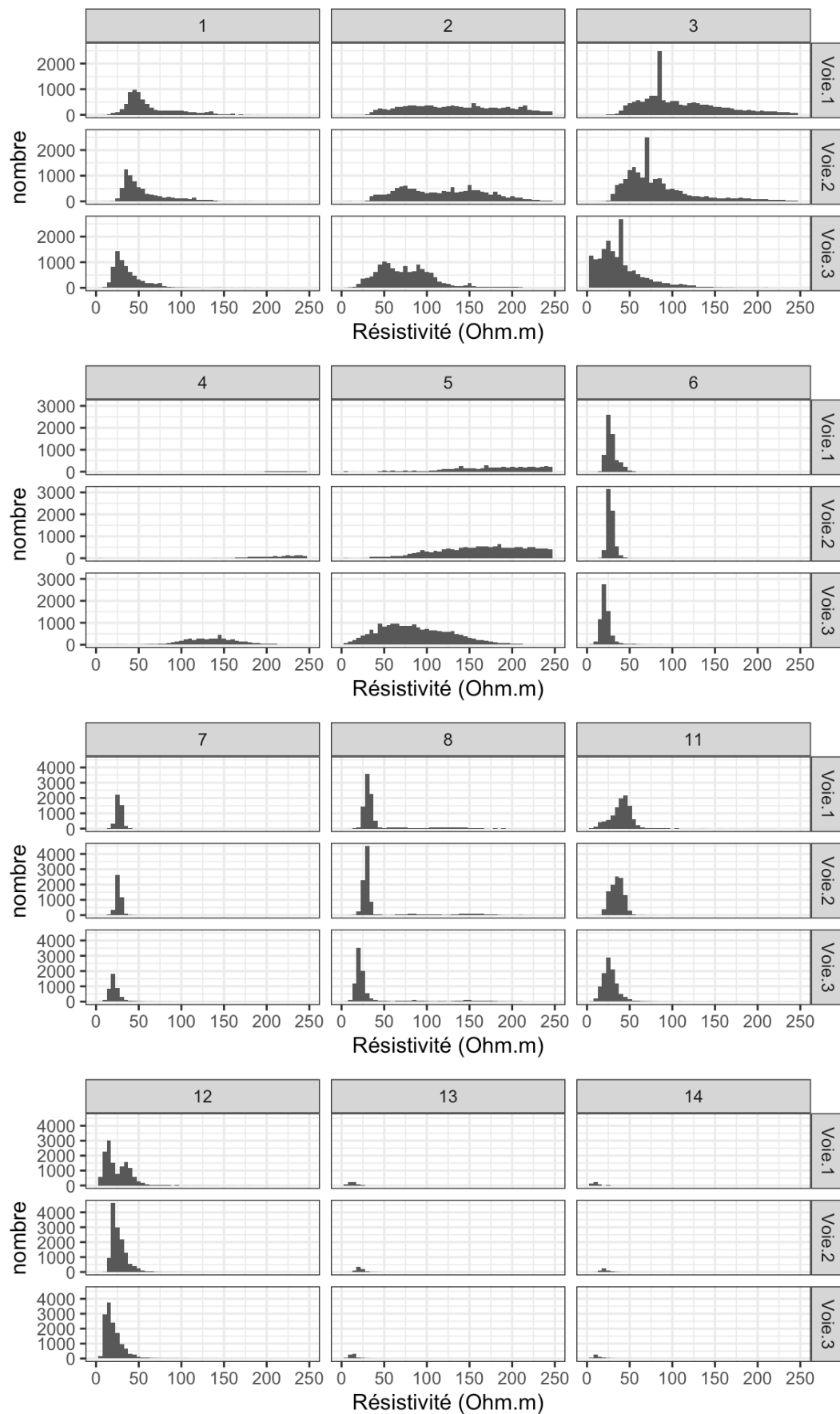


FIGURE 5.10 – Histogramme des valeurs de résistivité électrique apparente des sols pour les voies V1, V2 et V3, catégorisées par Unité Cartographique de Sol (UCS).

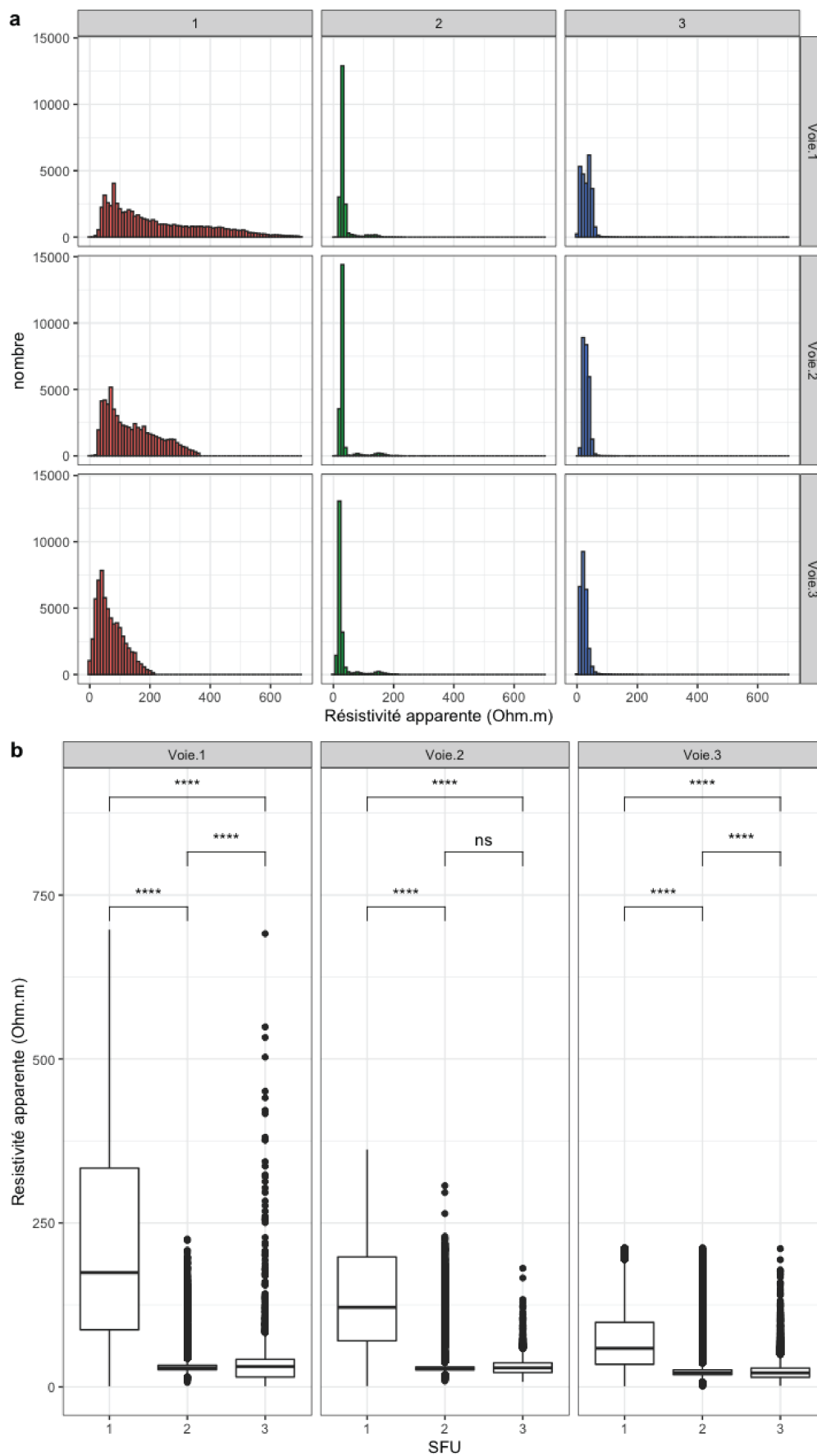


FIGURE 5.11 – Histogramme et boîte à moustache des valeurs de résistivité électrique des sols, catégorisées par voies et par Unité Fonctionnelle de Sol (SFU).

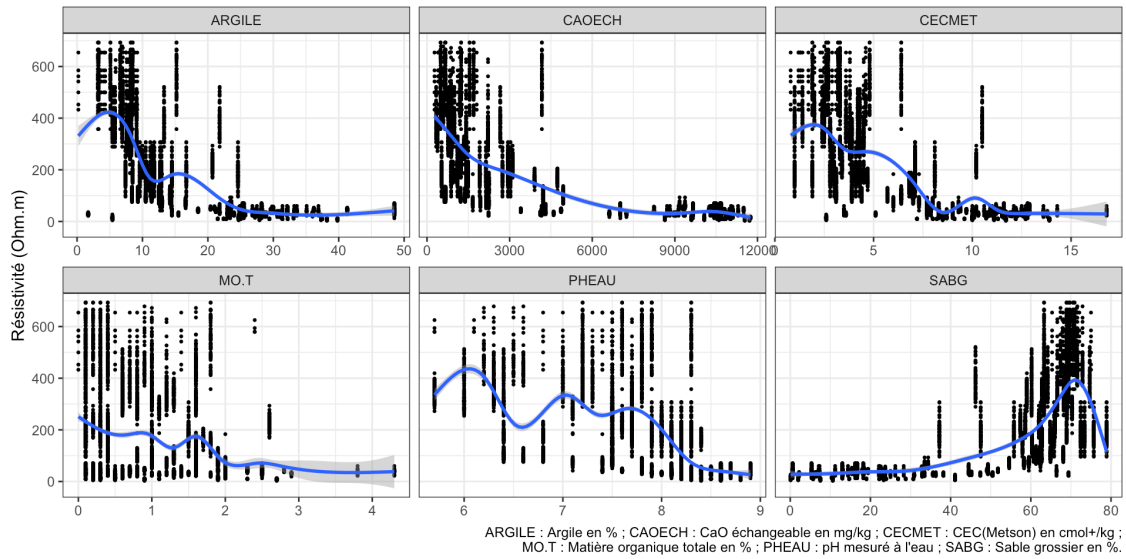


FIGURE 5.12 – Résistivité apparente mesurée par la voie 1 en fonction de paramètres physico-chimiques mesurés en laboratoire dans les 50 premiers centimètres de sol.

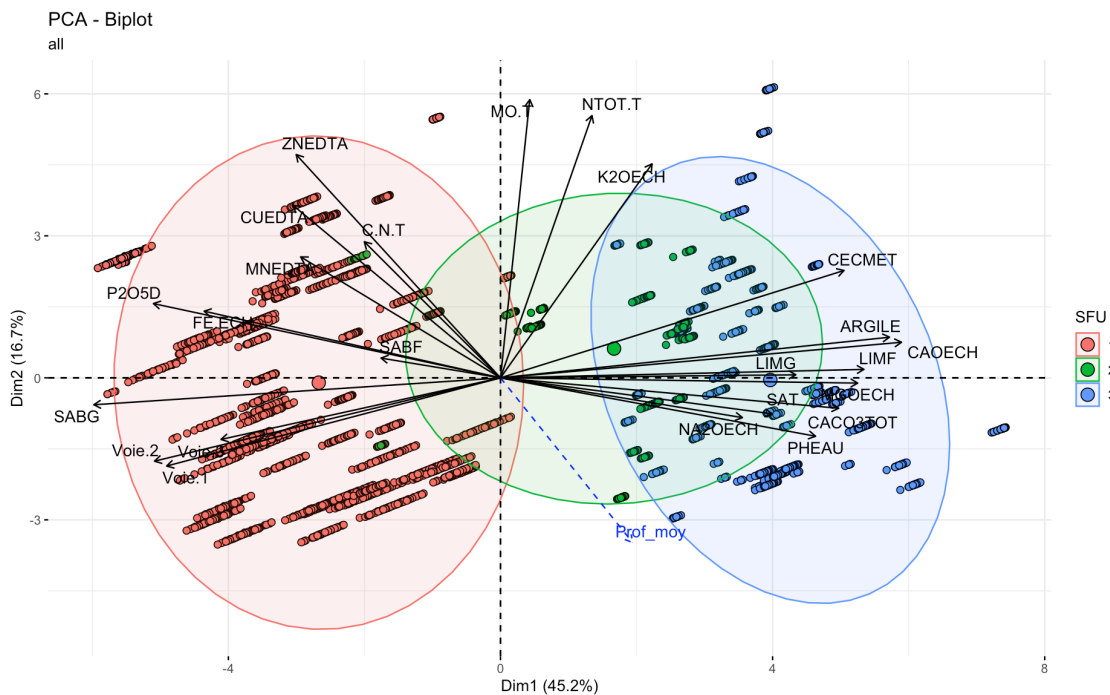


FIGURE 5.13 – Analyse en composante principale avec projection des individus (sites d'échantillonnage pédologiques) dans le plan des variables pédologiques et géophysiques. Les individus sont différenciés en fonction de l'Unité Fonctionnelle de Sol (SFU) de rattachement.

les domaines ne s'intersectent pas, alors que la SFU3 présente un domaine intermédiaire, même si plus proche de celui de SFU3.

5.3.2 Tomographie et sondages électriques

5.3.2.1 Tomographie

Les mesures de résistivité pour la tomographie électrique ont été faites le long d'un profil divisé en deux parties séparées par un fossé entre les parcelles 4 et 5 (Figure 3.10). La Table 5.3 présente les résultats des mesures d'humidité faites en 8 points distribués le long de ce profil tomographique. Dans la première partie du transect de H1 jusqu'à H5 ($X = 240$ m), les sondages présentent des textures sableuses à limono-sableuse en surface avec plus de 85% de sable. Pour ces mêmes positions, en profondeur, on observe un changement significatif de texture à 160 cm de profondeur avec un enrichissement en argile (entre 15% et 20%). Alors qu'entre les positions H6 à H8, on observe une contribution de la fraction limoneuse, contribution qui diminue rapidement avec la profondeur pour laisse place à des textures analogues à celles décrites sur les autres positions.

TABLE 5.3 : Paramètres physiques aux points de prélèvement H1 à H8 le long du profil de tomographie.

			Classe de texture	Argile	Limons	Sables	Matière Orga- nique	Densité appa- rente	Porosité	Saturation
	X Point[m]	Prof [cm]	[FR.AISNE]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g.cm-3]	[-]	[-]
H1	20	10	S	7,6	6,3	86,2	1,8	1,50	0,43	0,33
		60	S	5,1	5,9	89,0	0,2	1,61	0,39	0,42
		110	S	3,3	9,1	87,5	0,1	1,61	0,39	0,78
		160	SA	15,2	5,1	79,7	0,1	1,61	0,39	0,81
H2	50	10	S	7,6	6,3	86,2	1,8	1,50	0,43	0,29
		60	S	5,1	5,9	89,0	0,2	1,61	0,39	0,48
		110	S	3,3	9,1	87,5	0,1	1,61	0,39	0,82
		160	SA	15,2	5,1	79,7	0,1	1,61	0,39	0,75
H3	90	10	S	7,6	6,3	86,2	1,8	1,50	0,43	0,37
		60	S	5,1	5,9	89,0	0,2	1,61	0,39	0,46
		110	S	3,3	9,1	87,5	0,1	1,61	0,39	0,91
		160	SA	15,2	5,1	79,7	0,1	1,61	0,39	0,80
H4	160	10	S	7,5	7,5	85,0	1,2	1,50	0,43	0,51
		60	S	8,4	7,2	84,4	0,4	1,51	0,43	0,70
		110	S	3,9	5,7	90,5	0,1	1,54	0,42	0,80
		125	S	3,4	7,7	88,9	0,1	1,54	0,42	0,72
H5	240	10	S	5,7	8,8	85,5	0,7	1,44	0,46	0,44
		60	SA	13,3	7,5	79,2	0,3	1,70	0,36	0,79
		110	SA	21,8	16,5	61,8	0,1	1,67	0,37	0,80
H6	310	10	SL	11,5	14,5	73,9	2,6	1,29	0,51	0,45

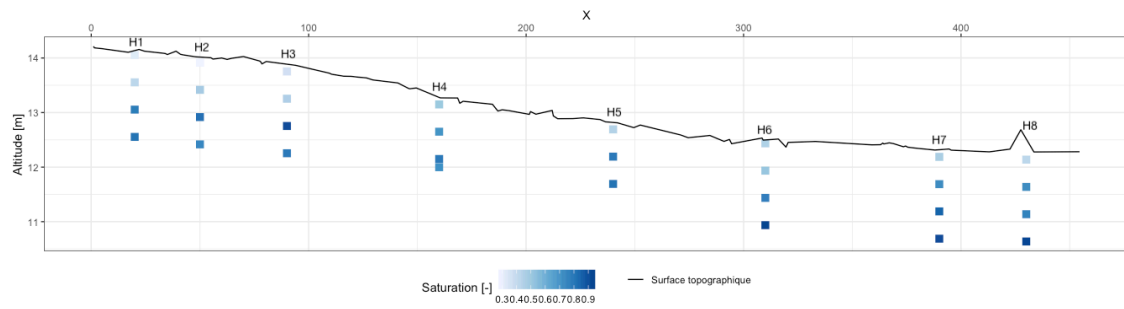


FIGURE 5.14 – Estimation de l'état de saturation en eau des sols pour différentes profondeurs, selon le profil tomographique et topographique de direction Ouest-Est, effectué dans le secteur de plaine.

X Point[m]	Prof [cm]	Classe de texture [FR.AISNE]	Argile [%]	Limons [%]	Sables [%]	Matière Orga- nique [%]	Densité appa- rente [g.cm-3]	Porosité [-]	Saturation [-]
H7	60	SA	11,7	9,0	79,3	0,3	1,57	0,41	0,52
	110	SA	20,7	8,5	70,9	0,2	1,70	0,36	0,77
	160	SA	20,7	8,5	70,9	0,1	1,70	0,36	0,93
	10	LSA	25,7	23,5	50,8	2,0	1,31	0,50	0,47
	60	SA	23,5	14,5	62,1	0,5	1,62	0,39	0,73
	110	SA	15,5	13,1	71,3	0,2	1,55	0,42	0,85
H8	160	S	1,7	6,1	92,3	0,1	1,60	0,40	0,91
	10	LSA	25,7	23,5	50,8	2,0	1,31	0,50	0,42
	60	SA	23,5	14,5	62,1	0,5	1,62	0,39	0,73
	110	SA	15,5	13,1	71,3	0,2	1,55	0,42	0,77
	160	S	1,7	6,1	92,3	0,1	1,60	0,40	0,92

Afin de décrire la distribution de la saturation en eau sur ce même profil tomographique, nous avons représenté (Figure 5.14) les valeurs déterminées au champ, pour chacune des positions (H1 à H8) à différentes profondeurs. Sur cette représentation, nous avons effectué la correction de l'altitude. Les positions H1 et H2, plus hautes dans la topographie locale sont significativement moins saturées en eau. Les profils pédologiques les plus saturés en eau sont localisés sur la partie distante, à l'Est du profil tomographique, soit plus les altitudes les plus basses dans la topographie locale.

Après inversion des données de résistivité apparentes, le profil tomographique (Figure 5.15) met en évidence des résistivités vraies allant de 13 Ohm.m à 588 Ohm.m associées à une valeur médiane de 58 Ohm.m. Les valeurs les plus fortes sont localisées dans la partie Ouest, sur le premier mètre de sol. Ensuite vers l'Est, cette zone de forte résistivité diminue en épaisseur jusqu'à X = 300 m. Au-delà des 300 m, les valeurs de résistivité vraies sont globalement inférieures à 30 Ohm.m.

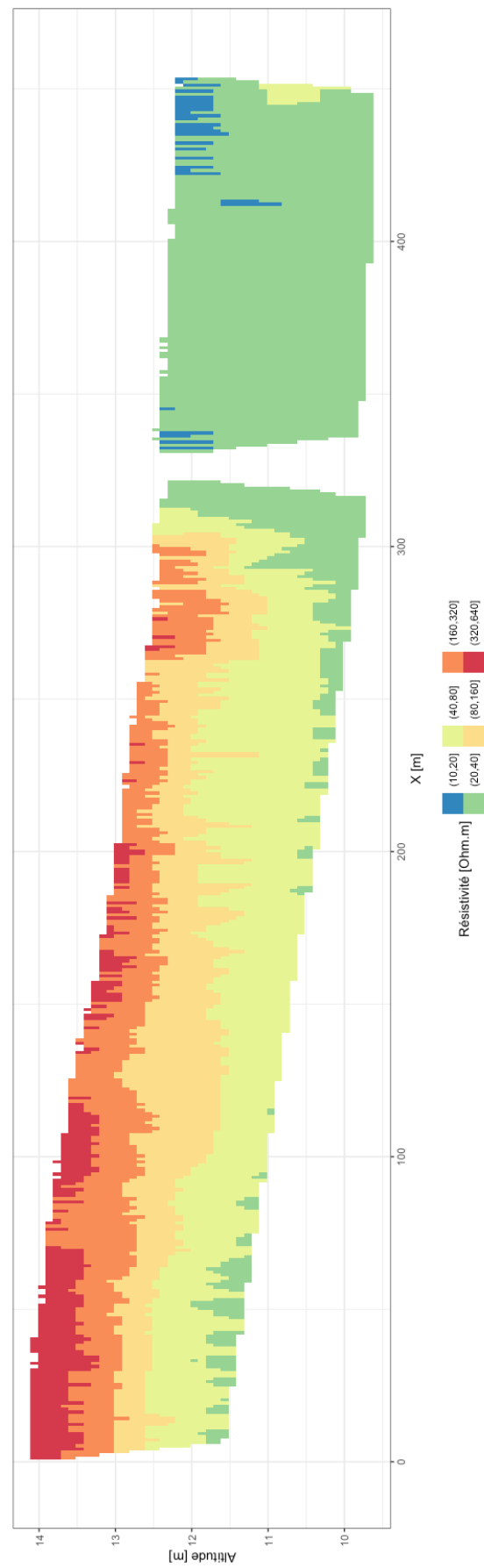


FIGURE 5.15 – Profil tomographique.

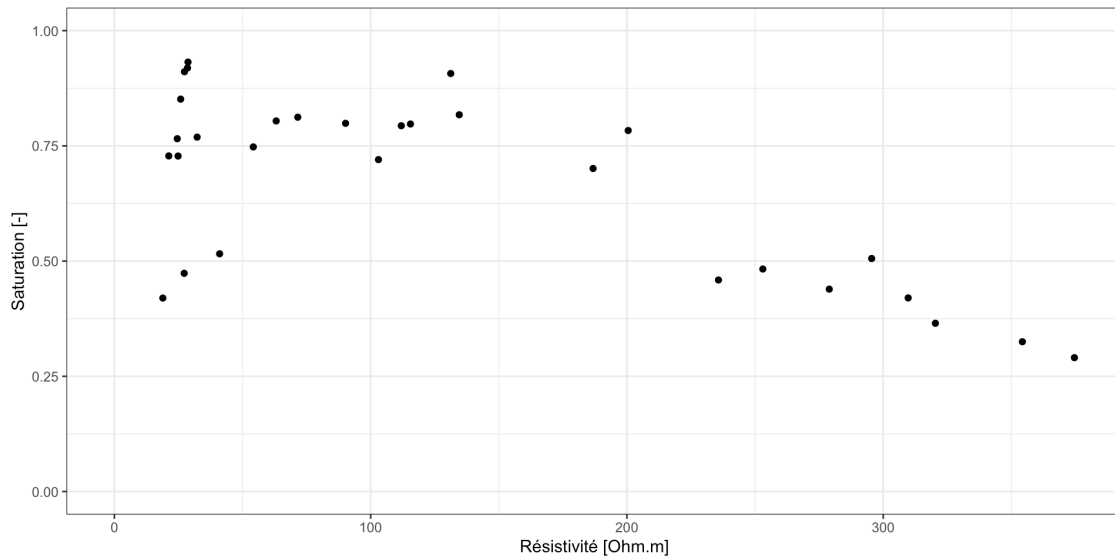


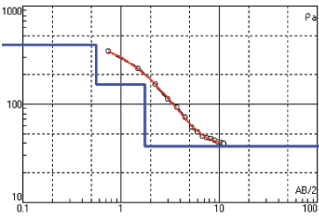
FIGURE 5.16 – Saturation en eau estimée en fonction de la résistivité.

Ce seuil à 30 Ohm.m est important, car il est associé à de fortes teneurs en eau. En effet la Figure 5.16 présente une mise en relation des valeurs de résistivités vraies inversées du profil tomographique aux valeurs de saturation mesurées au champ et présentées en Figure 5.14. Sur cette représentation, on constate qu'il existe une corrélation significativement négative ($r = -0,94$) entre la saturation en eau et la résistivité pour des résistivités supérieures à 100 Ohm.m. Pour des résistivités inférieures à 100 Ohm.m, la corrélation n'est pas significative, mais si l'on exclut les trois points dont la saturation est comprise entre 35 et 55% l'on peut généraliser l'idée que les faibles valeurs de résistivité sont généralement mesurées pour des saturations au voisinage, ou supérieures à 70%. On notera que ces trois points correspondent aux positions H6, H7 et H8, respectivement à des profondeurs de 60 cm, 10 cm et 10 cm, soit proche de l'altitude 12 m (à $\pm 0,2$ m, Figure 5.14).

5.3.2.2 Sondages 1D

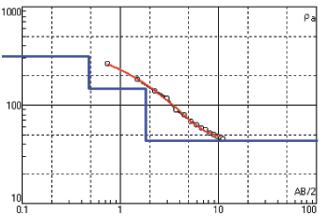
Travailler en deux dimensions permet de visualiser les variations latérales de résistivité le long du profil de tomographie, cependant il est difficile de positionner verticalement les interfaces avec cette méthode. Pour cela, nous avons utilisé les résistivités apparentes mesurées au cours de la campagne de tomographie pour réaliser des sondages électriques 1D. Cinq points de sondage (X1 à X5) ont été choisis le long du profil tomographique (Figure 5.17). Pour chaque sondage, l'inversion 1D a été réalisée sur les 15 niveaux de résistivité apparente mesurée. Ci-après, nous détaillons les inversions pour chacun des sondages électriques :

- **X1** (57,7 m) met en évidence deux interfaces donc un système à trois couches (Figure 5.17). La première couche jusqu'à 55 cm présente une résistivité vraie proche de 405 Ohm.m. Au-delà, la résistivité diminue à 160 Ohm.m jusqu'à 175



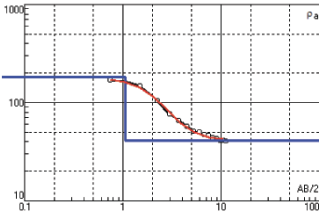
X1 (57,7 m)

N	p	K	Min	Max
Ro1	404,8	1,018	397,5	412,2
Ro2	159,5	1,052	151,7	167,8
Ro3	37,37	1,009	37,03	37,71
Z1	0,5551	1,05	0,5285	0,5832
Z2	1,756	1,015	1,73	1,782



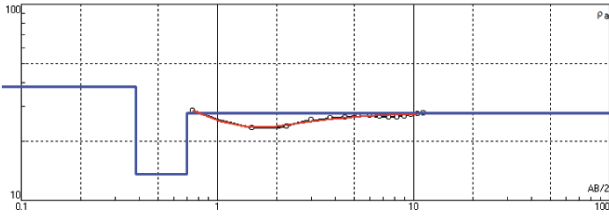
X2 (137,5 m)

N	p	K	Min	Max
Ro1	312	1,03	303	321
Ro2	148	1,04	142	154
Ro3	43,9	1,01	43,4	44,4
Z1	0,475	1,07	0,443	0,51
Z2	1,83	1,02	1,79	1,86



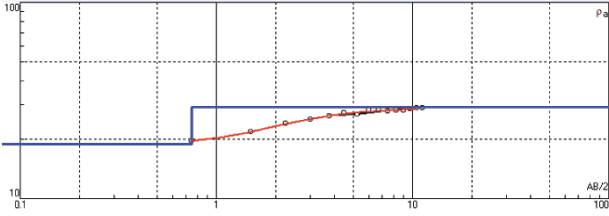
X3 (228 m)

N	p	K	Min	Max
Ro1	181	1,01	179	182
Ro2	41,4	1,01	41,1	41,8
Z1	1,07	1,01	1,05	1,08



X4 (385 m)

N	p	K	Min	Max
Ro1	38,06	1,097	34,7	41,75
Ro2	13,6	2,504	inf.	inf.
Ro3	27,96	1,005	27,81	28,11
Z1	0,3828	1,416	0,2703	0,542
Z2	0,6995	2,486	inf.	inf.



X5 (440 m)

N	p	K	Min	Max
Ro1	18,89	1,003	18,82	18,95
Ro2	29,22	1,002	29,16	29,28
Z1	0,7509	1,015	0,7395	0,7624

FIGURE 5.17 – Paramètres d'inversion des cinq sondages électriques X1 à X5 réalisés à Capet-Guillier.

cm, puis elle diminue encore pour atteindre 37 Ohm.m.

Hypothèse : ces valeurs de résistivité peuvent correspondre à un milieu sableux en surface, puis à un milieu saturé à partir de 55 cm, et enfin un milieu plus argileux à partir de 175 cm.

- **X2** (137,5 m) met également en évidence deux interfaces (Figure 5.17). La première interface apparaît à 48 cm entre un milieu résistif (312 Ohm.m) et un milieu moins résistif (148 Ohm.m). La seconde interface est située à 183 cm et marque le passage à un milieu assez conducteur (44 Ohm.m).
- **X3** (228 m) met en évidence un système à deux couches (Figure 5.17). De la surface, jusqu'aux environs de 1 m de profondeur, la résistivité est de l'ordre de 180 Ohm.m, puis elle diminue jusqu'à 40 Ohm.m.

Hypothèse : il est possible qu'il existe deux interfaces, mais dans ce cas la couche intermédiaire est trop peu épaisse ou le contraste de résistivité est trop faible pour qu'elle soit détectable.

- **X4** (385 m) met en évidence deux interfaces, donc trois couches (Figure 5.17). Là, la position présente des résistivités faibles dès la surface. La première couche, d'une quarantaine de centimètres, a une résistivité de 38 Ohm.m. Au-delà de 40 cm, la résistivité diminue jusqu'à environs 13 Ohm.m sur une trentaine de centimètres, puis à 70 cm la résistivité augmente à 28 Ohm.m.

Hypothèse : ces faibles résistivités mettent en évidence un milieu argileux avec un niveau intermédiaire plus conducteur. On note cependant que l'incertitude sur cette couche est très importante probablement en lien avec la faible épaisseur de la couche et son faible contraste de résistivité.

- **X5** (à 440 m) met en évidence une seule interface à 75 cm de profondeur (Figure 5.17). Elle marque le passage d'un niveau très conducteur (19 Ohm.m), à un niveau légèrement moins conducteur (29 Ohm.m).

Hypothèse : l'interface marque probablement le passage d'une couche probablement argileuse à une couche probablement moins argileuse.

Afin de produire une synthèse de ces inversions locales, la figure 5.18 montre le résultat des sondages X1 à X5 sur une pseudo-section. Les milieux résistifs sont représentés en rouge et les milieux conductifs en bleu. Cette représentation permet de confronter les résultats obtenus selon les deux approches (tomographie Vs sondages électriques). On voit que les deux premiers sondages, X1 et X2, sont cohérents au niveau des résistivités mesurées ainsi que pour les profondeurs des interfaces. La position X3 correspond quant à elle à une zone de transition vers un milieu beaucoup moins résistif observé au niveau des positions X4 et X5. On notera que cette pseudo section n'est pas corrigée de la variation topographique.

5.4 Discussion

Dans ce chapitre, notre objectif était de tester l'intérêt de la résistivité électrique apparente et vraie des sols, à des fins de zonage micro-terroir. Dans une première étape, nous avons

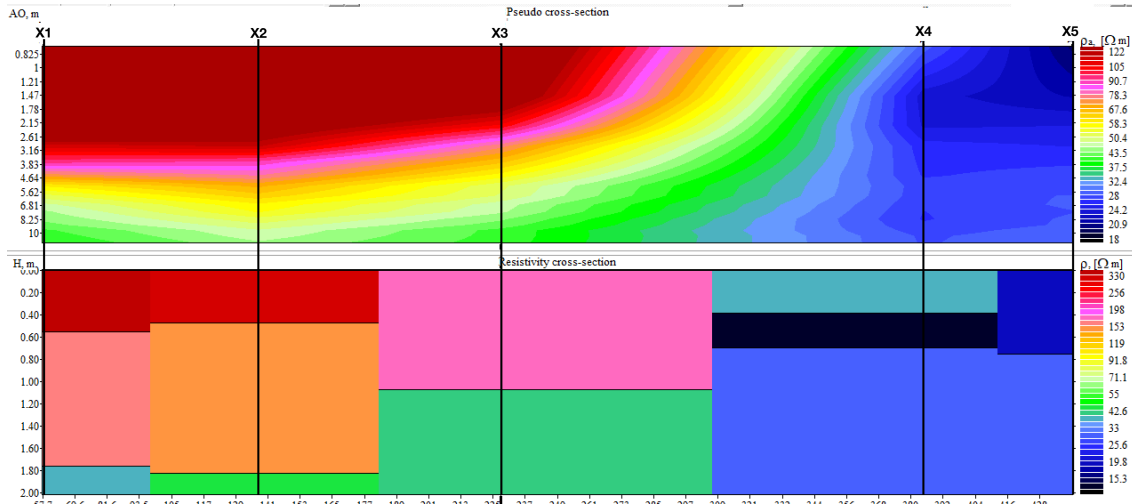


FIGURE 5.18 – Pseudo-section de résistivité apparente réalisée à partir des cinq sondages électriques X1 à X5.

procédé à la collecte et au traitement des données brutes, livrées par la société Géocarta. Par la suite, nous n'avons pas cherché comme c'est le cas dans de nombreuses études techniques à expliquer les variations du signal résistif vis-à-vis des variations des conditions pédologiques. En effet, ces variations d'ordre pédologiques étaient connues. Nous avons donc cherché à tester la cohérence entre les variations indiquées par le signal résistif et les variabilités pédologiques, documentées lors de la phase cartographique à haute fréquence d'échantillonnage (cf. Chapitre 3). Dans un second temps, nous avons testé l'approche proposée au Chapitre 4, celle d'un regroupement des UCS en SFU, soit le passage d'un zonage d'état à un zonage fonctionnel.

Nous rappelons le propos énoncé en introduction de chapitre : les mesures de résistivités électriques apparentes des sols ne renseignent pas sur une propriété de sol, mais sur un ensemble de variables pédoclimatiques dont les effets individuels devront être déconvolués. C'est certainement là, où réside la complexité, mais aussi l'intérêt des méthodes géophysiques.

Dans notre cas, nous disposons d'une cartographie pédologique détaillée. Par contre, comme c'est le cas pour beaucoup de cartographies pédologiques, cette carte est basée sur des données collectées sur un temps long. Aussi, ce type de carte d'état, propre à traduire les variabilités des propriétés intrinsèques de sol, n'est pas propre à traduire les variabilités à haute fréquence temporelles, tel le niveau de saturation des sols. Pour ce faire, les méthodes géophysiques sont précieuses, car leur mise en application est réalisée sur un temps court (quelques jours) et offre ainsi l'opportunité d'un instantané spatialisé de ces variables à haute fréquence temporelle.

Une première analyse avait pour ambition de confirmer la prépondérance de la texture des sols dans la modulation du signal résistif. Pour exemple, la carte de cohérence $V1 < V2$ présente des schémas spatiaux proches de ceux présents sur la carte des grands domaines texturaux (Chapitre 4) avec un domaine Nord globalement de texture plus fines

(limono-argileux) et un domaine Sud plus variable et structuré en deux sous-domaines : un sous-domaine à dominance sableuse (à l'Ouest) et un sous-domaine plus fin (à l'Est). D'ailleurs, l'analyse des variogrammes expérimentaux sur les valeurs de résistivité électrique apparente tend à confirmer cette différence entre domaine Nord et Sud ainsi qu'une sous-structuration de ce domaine Sud. Les éléments prégnants pour les variogrammes du domaine Nord, dit de côteau, sont une structure spatiale à très faible portée avec un ajustement de type stable, alors que dans le domaine Sud, dit de plaine, les variogrammes présentent une structure spatiale à plus grande distance et un ajustement plus complexe de type bilinéaire. Ce modèle est cohérent avec ce domaine Sud, qui présente deux sous-domaines, soit deux pôles texturaux spatialement distants.

Mais, la texture n'est pas la seule variable contrôlant la résistivité électrique des sols. La Figure 5.12 suggère une dépendance à d'autres facteurs, telle la valeur de pH_{eau} ou la teneur en CaO échangeable, lorsque les valeurs sont supérieures à 6000 mg kg^{-1} . Mais là, les corrélations observées doivent être discutées. En effet, il n'existe pas de réelle indépendance entre les facteurs cités précédemment et la texture des sols. Les sols les plus argileux sont par la même ceux qui sont les plus carbonatés, car développés à la faveur de l'altération de matériaux calcaires : donc ceux qui possèdent les valeurs de pH_{eau} les plus élevées ainsi que les teneurs en CaO les plus élevées. A l'inverse, les sols qui présentent une texture sableuse sur la majorité du profil pédologique sont observés en plaine (essentiellement dans le sous-domaine Ouest) et sont ceux qui présentent des valeurs de pH_{eau} plus faibles et des teneurs en carbonates elles-aussi plus faibles. Ces caractéristiques sont communes aux sols développés à la faveur d'alluvions sableux.

Naturellement, la saturation en eau du pédosystème arrive comme un facteur critique pour discuter les variabilités en termes de résistivité électrique apparente. En effet, la capacité de propagation du signal est sous forte dépendance de la saturation, ainsi que de la force ionique totale de la solution du sol. Ainsi, un sol qu'il soit sableux ou argileux verra sa résistivité clairement modulée en relation à son niveau d'humectation et mise en solution des électrolytes. Dans notre cas, cet effet saturation est vérifié sur les pseudo-sections où l'on constate que les faibles valeurs de résistivité sont généralement mesurées pour des saturations au voisinage, ou supérieures à 70%, c'est-à-dire le secteur Est des sols à texture fine. Par ailleurs, les analyses géochimiques nous renseignent sur la forte garniture électrolytique des sols de côteau et de plaine (domaine Sud - sous-domaine Est). En ce sens, la mise en œuvre d'un profil tomographique et de sondages électriques fut crucial pour comprendre ces co-variations et proposer un modèle géométrique des couches (Figure 5.18), modèle qui complète bien le modèle conceptuel, pluri-compartment, proposé en chapitre 4.

Il s'agissait enfin de mettre à profit la puissance des méthodes de géophysique, soit l'acquisition puis représentation d'une donnée pseudo-continue, là où les cartographies pédologiques classiques proposent une segmentation en polygones, fondée sur la connaissance des sols aux lieux de prospection. Dans cette analyse, trois niveaux sont dégagés : (i) analyse globale, (ii) analyse par UCS et (iii) analyse par SFU. Dans le cas de l'analyse globale, aux étendues numériques près, les cartogrammes permettent de dégager des structures spatiales similaire sur les trois voies. Bien évidemment, les variabilités observées sur les résistivités électriques apparentes pour les horizons organo-minéraux de surface (V1)

sont supérieures à celles observées pour les volumes prospectés plus conséquents (cf. variogrammes, Figure 5.9). Ces variabilités de surface sont conditionnées pour partie par la nature des constituants (dont argiles et matières organiques), par les variations d’humectation souvent fortes dans les horizons de surface (Figure 5.14) et l’ensemble des travaux ou perturbations anthropiques résultant de l’activité viti-vinicole (travail de sol, tassement, amendements). Dans le cas de la confrontation entre UCS, au regard de leur signature résistive, l’on comprend la difficulté de l’exercice quand il s’agit de comparer des UCS dont certaines couvrent des surfaces très différentes. Pourtant, ce qui ressort, c’est la discrétisation du domaine global en trois type d’UCS :

- des UCS « pures » ayant toujours des valeurs élevées de résistivités électriques apparentes et pour lesquelles la cohérence $V1 > V2 > V3$ est majoritairement respectée (dont UCS 3, 4 et 5) ;
- des UCS « pures » ayant toujours des résistivités électriques apparentes faibles et pour lesquelles la cohérence évoque précédemment n’est pas majoritairement respectée (dont UCS 6, 7, 8, 11, 12, 13 et 14) ;
- des UCS « intermédiaires ou d’interface » pour lesquelles les logiques (valeurs * cohérence) peuvent se combiner en relation aux signatures des UCS « pures » connexes.

Globalement, la signature résistive des UCS semble valider notre cartographie pédologique, mais elle tend à remettre en cause les plages cartographiques du domaine Sud (plaine) sous-domaine Nord. Ce constat n’est pas lié à un mauvais diagnostic de matériaux en place (horizonation), mais est essentiellement lié au défaut de prise en compte du niveau de saturation des horizons organo-minéraux dans l’approche classique. En ce sens, la géophysique représente un intérêt certain, car la quantité d’eau disponible pour la plante est essentielle pour la maîtrise de la qualité des baies (Chapitre 4). Néanmoins, la quantité d’eau n’est pas le seul driver de cette qualité. L’alimentation minérale est aussi un facteur essentiel (White, 2003) et là, la nature des matériaux ainsi que la signature géochimique des horizons pédologiques sont essentielles.

Afin de coupler besoin en eau et alimentation minérales, le passage des Unités Cartographiques de Sol (UCS) vers les Unités Fonctionnelles de Sol (SFU) semble donc approprié. Ici, ces unités fonctionnelles doivent donc être considérées comme un compromis entre fourniture en eau (renseigné par les niveaux de nappe et la prospection géophysique) et fourniture en éléments minéraux (renseigné par la prospection pédologique et la prospection géophysique). Au regard de leur signature géophysique (Figures 5.8 et 5.11), les trois unités proposées semblent suffisamment discriminantes pour remplir les conditions d’une gestion optimisée du vignoble.

5.5 Conclusion

Au-delà de l’entrée purement cartographique, notre ambition était de tester de l’intérêt de la mise en œuvre des méthodes de résistivité électrique des sols, pour caractériser le fonctionnement du pédosystème, soit une entrée fonctionnelle.

Le résultat principal de notre analyse est de mettre en avant le caractère complémentaire des prospections géophysiques. En effet, la cartographie classique, même effectuée à haute densité d'échantillonnage spatial, ne peut pas mettre en évidence la variabilité spatiale des facteurs à haute variabilité temporelle. Là, les méthodes de géophysiques offrent l'opportunité, non pas de préciser la typologie des sols, mais la possibilité d'intégrer de manière efficace la connaissance de la saturation en eau et de la charge en électrolyte. Il en ressort néanmoins qu'une seule campagne est certainement insuffisante pour appréhender finement la fonction réservoir des sols. En ce sens, nous rejoignons l'idée avancée par de nombreux géophysiciens, sur l'intérêt de caractérisations diachroniques (Michot et al., 2003). De nouvelles méthodes géophysiques telles que la polarisation provoquée spectrale (*Spectral Induced Polarization*, SIP) pourraient répondre de manière plus précise à la disponibilité des nutriments (Peruzzo et al., 2018). Nous porterons également une attention particulière aux travaux de Brillante et al. (2014), Brillante et al. (2016) et Mary et al. (2018) qui ouvrent la perspective d'améliorer les connaissances sur la prospection racinaire des ceps de vigne à l'aide de mesures de résistivité électrique.

Chapitre 6

Modélisation du statut hydrique de la vigne

6.1 Introduction

L'évolution actuelle du climat en Europe tend vers une augmentation de la demande climatique associée à une augmentation des températures et une redistribution à l'échelle annuelle des séquences de pluies (Lebon and Cortazar-Atauri, 2014). A l'avenir, l'adaptabilité des pratiques vitivinicoles sera une question clé pour les appellations viticoles soumises aux changements climatiques tel que prévu par les projections du changement climatique futur (IPCC, 2014). Les impacts du changement climatique sur l'identité des vins sont déjà reconnus à travers les principaux facteurs contrôlant la maturation, l'arôme et la coloration du raisin (Baciocco et al., 2014, ; Camps and Ramos, 2012, ; Jones and Davis, 2000, ; Tonietto and Carbonneau, 2004, ; Van Leeuwen et al., 2004).

L'alimentation hydrique de la vigne au cours du cycle végétatif et de la maturation des raisins est un point majeur de la qualité de la production ainsi que des rendements associés (White, 2003). Dans le cas de la production de vin rouge, un grand nombre d'études montre un lien entre la qualité du vin et une contrainte hydrique modérée de la vigne au cours de la saison [Bonfante et al. (2011) ; Brillante et al. (2016) ; Costantini et al. (2013) ; Deloire et al. (2005) ; Dry (2016) ; Marciniak et al. (2013) ; vanleeuwen2009], alors qu'une contrainte hydrique trop importante peut être négative (Jones et al., 2005 ; Van Leeuwen and Seguin, 1994).

Plusieurs méthodes de détermination le statut hydrique de la vigne au cours de la saison (Saurin et al., 2014) existent et sont pour la plupart basées sur des indicateurs dérivés de mesurés sur la plante : mesures de croissance suivant la méthode des apex (Lovelley et al., 2009), mesures de potentiel hydrique foliaire et/ou de tige avec une chambre à pression (Choné, 2001 ; Pellegrino et al., 2004), mesures de flux de sève. Malgré quelques limitations, la mesure du potentiel hydrique foliaire de base est considérée par beaucoup d'auteurs comme la méthode de référence pour mesurer l'état hydrique de la vigne (Saurin et al., 2014). Ces mesures du statut hydrique sont spatialement ponctuelles et capter la variabilité spatiale de ce statut hydrique, qui peut être forte au sein du vignoble, nécessite

de multiplier les placettes de mesures. Or la logistique imposée à l'échelle d'un vignoble pour un suivi régulier au cours de la saison est lourde, ce qui limite donc en pratique son utilisation. L'autre stratégie de suivi du statut hydrique de la vigne consiste à réaliser des mesures directes sur le sol d'humidité et/ou de potentiel hydrique. Toutefois ces méthodes sont elles aussi lourdes et difficiles à mettre en place pour obtenir des mesures en continu sur la saison. En outre, contrairement aux précédentes mesures, elles ne sont pas intégrées à l'échelle de la plante et nécessitent d'être acquises à plusieurs profondeurs du profil de sol.

La modélisation offre une alternative aux mesures directes sur la vigne ou le sol pour estimer, dans l'espace et le temps, le statut hydrique du sol et de la vigne. Elle permet en outre de tester l'impact de scénarios climatiques sur ce statut hydrique. Initialement basés sur des équations simples (*ie.* Turc, 1961), plusieurs modèles de bilan hydrique ont été développés pour des systèmes de cultures monospécifiques (principalement des grandes cultures) comme le modèle de Lebon et al. (2003). Ce modèle de bilan hydrique du système sol-plante-atmosphère représente le sol comme un seul réservoir uniforme pouvant contenir une quantité totale d'eau disponible (*available soil water*, AWD), une quantité totale d'eau transpirable par la plante (*total amount of transpirable soil water*, TTSW) et une fraction d'eau transpirable (*fraction of transpirable soil water*, FTSW). Ces quantités d'eau du sol sont calculées à un pas de temps journalier. La FTSW, ratio entre AWD et TTSW, est utilisée pour appréhender le stress hydrique de la plante (Lacape et al., 1998) et son utilisation est indiquée comme pertinente dans le cas de la vigne (Pellegrino et al., 2004). Cette approche de modélisation a ensuite été complétée par Celette et al. (2010) pour l'adapter à des systèmes de cultures intercalaires tels que la vigne pour proposer le modèle WaLIS (*Water baLance for Intercropped Systems*). Dans le cas d'un vignoble, le modèle WaLIS représente le sol à l'aide de deux compartiments correspondant aux zones racinaires de la culture d'inter-rang et de la vigne. Le modèle BISWAT (*Bispecific Intercrop System WATer stress dynamics model*) s'inscrit dans la continuité de WaLIS. Développé par Bertrand et al. (2018), c'est un modèle dynamique permettant la simulation du stress hydrique et des flux d'eau dans des agrosystèmes bi-spécifiques conduits en rangs en fonction de différents itinéraires techniques.

Nous avons choisi d'utiliser le modèle BISWAT au cours de ces travaux de thèse, car (1) il représente l'ensemble des processus du bilan hydrique en intégrant les pratiques d'entretien du sol et de la végétation de manière adaptée aux couverts bi-spécifiques et donc à la culture de la vigne, (2) il permet de discrétiser le profil en plusieurs horizons et donc de considérer explicitement la morphologie des sols, et (3) il repose sur des équations mobilisant des variables mesurables et des paramètres mesurables ou déterminables à partir de l'expertise et offre donc un bon potentiel pour la transposition à d'autres sites et pour l'application de scénarios climatiques

Les principes du modèle BISWAT sont tout d'abord présentés avant de l'appliquer à notre contexte d'étude à partir des données mesurées. Cette étape a pour objectifs de montrer l'étendue des résultats simulés et de raisonner sur la cohérence de ces résultats. Enfin, le modèle est utilisé pour tester plusieurs scénarios. Cette dernière étape a pour ambition de produire des éléments à titre illustratif afin de discuter de l'utilité d'une telle approche de modélisation, renseignée par des données de sol précises pour l'adaptabilité du vignoble

étudié face aux changements climatiques.

6.2 Présentation du modèle

Le fonctionnement du modèle BISWAT est largement détaillé par Bertrand et al. (2018) et présenté dans Figure 6.1. Le modèle simule la dynamique du stress hydrique de deux composantes végétales désignées A (généralement la plante principale) et B (la culture d'inter-rang). A et B peuvent être des plantes annuelles ou pérennes comme un arbre ou une vigne. Pour chaque composante végétale, le stress hydrique est modélisé par le déficit en eau du sol subi par une plante (*Soil Water deficit Experienced by a Plant*, SWEP) à un pas de temps journalier. La variable SWEP est elle-même basée sur le concept de FTSW (Sinclair and Ludlow, 1986) qui peut être reliée au potentiel hydrique foliaire de base et aux processus de transpiration et de croissance, tant chez les plantes annuelles (*ie.* coton, Lacape et al., 1998) que les plantes pérennes (*ie.* vigne, Pellegrino et al., 2004).

Pour la plante X (A ou B), à un jour t , FTSW et SWEP sont liées par la relation (6.1) :

$$SWEP_X(t) = 1 - FTSW_X(t) \quad (6.1)$$

Le modèle permet de simuler plusieurs combinaisons de cultures et de scénarios de gestion de l'enherbement en faisant varier ses dates de semis et de destruction. Il impose cependant que la plante B ne soit pas un arbre, car il ne permet pas de gérer la compétition entre deux arbres pour l'interception de la lumière.

La simulation est faite en 2D dans un plan perpendiculaire au rang selon un schéma présenté dans la Figure 6.1. Dans le cas d'une simulation pour une parcelle de vigne, la largeur dAB représente la moitié de l'espace entre les rangs. Le sol est découpé en cellules à partir de colonnes de largeur fixe, et de lignes de hauteur variable en concordance avec les différents horizons. Chaque jour (t), l'humidité de chaque cellule ($\theta_{ij}(t)$) est calculée par le modèle (avec i le numéro de la couche de sol, et j le numéro de la colonne).

La Figure 6.1 présente les flux hydriques pris en compte par BISWAT. L'évaporation n'est appliquée que dans la première couche de sol (de 10 cm d'épaisseur par défaut). Les prélèvements par transpiration sont calculés pour chaque cellule en fonction de la croissance des racines de chaque espèce. La prise en compte de l'irrigation localisée (*ie.* goutte à goutte) ou sur l'ensemble de la parcelle est possible.

La méthode de calcul de la TTSW utilisée par le modèle a été reportée dans le chapitre 4 (Eq. (4.6)). TTSW correspond à la différence entre l'humidité à la capacité au champ (θ_{fc}) et l'humidité minimale (θ_{minus}) intégrée sur la profondeur d'enracinement maximale $ErdMax_X$ et en tenant compte de la diminution de la densité racinaire à partir d'une profondeur . Ce calcul est couplé à la prise en compte de la croissance racinaire calculée à partir du cumul des degrés jours permettant de faire évoluer la profondeur Erd_X et la largeur Erw_X jusqu'à respectivement $ErdMax_X$ et $ErwMax_X$ au cours de la saison (Bertrand et al., 2018).

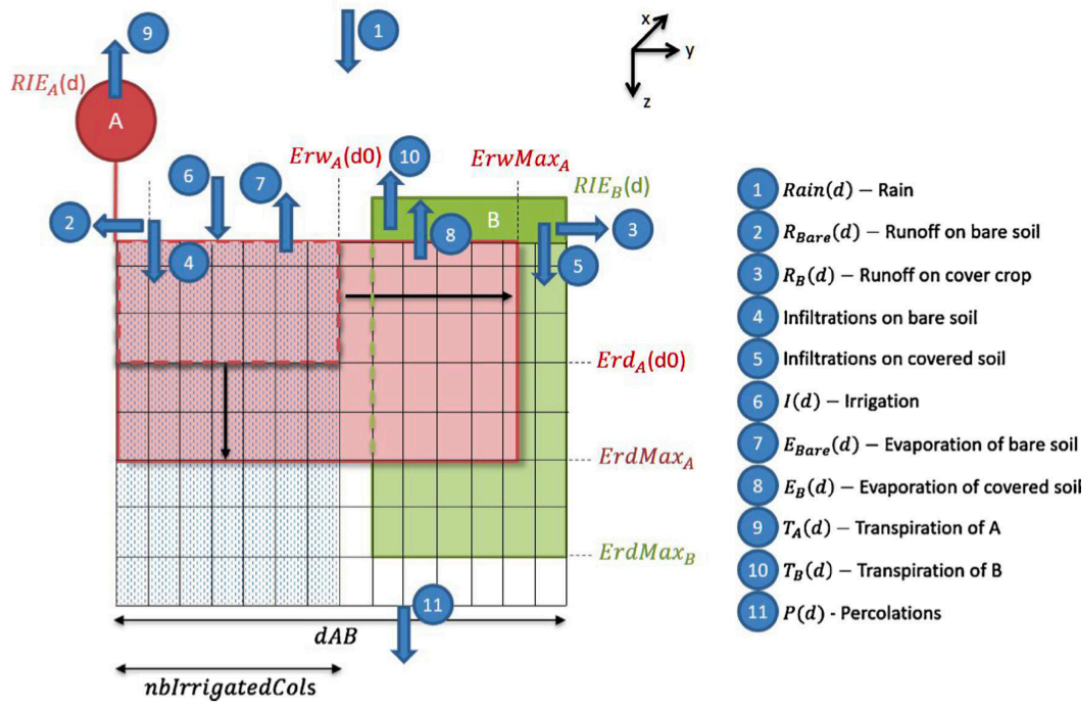


FIGURE 6.1 – Représentation de l’agrosystème 2D utilisé par BISWAT (Bertrand et al., 2018).

Au sein du sol, les flux verticaux d’eau sont les seuls qui sont pris en compte. L’eau circule entre les cellules suivant un principe du débordement : lorsque l’humidité de la cellule atteint l’humidité à la capacité au champ, le trop-plein alimente la cellule sous-jacente. Lorsque le trop-plein atteint la limite basse du profil de sol, l’eau sort du système sous le terme de drainage (Figure 6.1). BISWAT considère également le processus de ruissellement à la surface du sol. Le calcul du ratio infiltration/ruissellement est réalisé suivant la méthode du *Curve Number* de l’USDA implémentée notamment dans le modèle SWAT (Soil & Water Assessment Tool, Arnold et al., 2012).

Pour le calcul des flux de transpiration et d’évaporation, Bertrand et al. (2018) généralise l’approche de Celette et al. (2010) pour les cultures bi-spécifiques par le calcul d’un bilan radiatif utilisant l’efficacité d’interception du rayonnement (*Radiation Interception Efficiency*, RIE). L’espèce A est considérée dominante sur B pour l’interception de la lumière, ainsi seul le rayonnement non intercepté par A peut servir à la transpiration de l’espèce B. Le reste du rayonnement, qui n’est capté ni par A ni par B, entraîne l’évaporation du sol. Les flux de transpiration sont donc calculés à partir du RIE et de la demande climatique donnée par l’ET0. Le ralentissement de la transpiration à cause du stress hydrique est marqué à partir d’un seuil sur FTSW de 0,4 par défaut (Pellegrino et al., 2006, ; Bertrand et al., 2018). L’ensemble des entrées du modèle est regroupé dans la table 6.1.

TABLE 6.1 – Typologie des entrées de modèle nécessaires pour exécuter une simulation avec le modèle BISWAT.

Type d'entrée	Nom de l'entrée	Description	Unité
Simulation	StartDate	Date de début	-
	Duration	Durée de la simulation	j
Géométrie 2D	DistanceAB_mm	Largeur du motif 2D	mm
	SoilZ_mm(z)	Profondeur de chaque couche de sol	mm
	SoilNbColumns	Nombre de colonnes	-
	ThetaFC(z)	Capacité au champ pour chaque couche de sol	m3/m3
	Width *	Largeur du motif 2D couvert par une culture.	mm
Météorologie	Temperature(t)	Température moyenne journalière	°C
	Rain(t)	Pluie journalière	mm
	ET0(t)	Évapotranspiration de référence journalière	mm
Interception du rayonnement	RIE(t)	Efficacité d'interception du rayonnement d'une culture (journalier)	-
TTSW	BaseTemperature +	Température de base d'une culture	°C
	ErdMax_mm	Profondeur effective maximale des racines d'une culture	mm
	TsToReachErdMax +	Somme des températures pour atteindre la profondeur maximale d'une plante	°C
	ThetaMinus(z)	Humidité critique pour chaque couche de sol d'une culture	m3/m3
	ErwMax_mm °	Largeur effective maximale des racines d'une culture	mm
	TsToReachErwMax +°	Somme des températures pour atteindre la largeur maximale de la plante	°C
Evaporation	ThreshEvap1_mm	Seuil en dessous duquel il n'y a pas d'évaporation	mm
	ThreshEvap2_mm	Seuil au-dessus duquel l'évaporation n'est pas limitée par la sécheresse	mm
Ruissellement	Runoff_Bare_CN2	Curve number nécessaires pour calculer le ruissellement sur le sol nu	-
	Runoff_CN2 *	Curve number nécessaires pour calculer le ruissellement sur la culture de couverture	-
Etat initial	T0Theta	Teneur volumétrique en eau du sol au début de la simulation	m3/m3
	T0Id	ID d'une installation déjà installée au début de la simulation	-
	T0Erd	Profondeur effective des racines au début de la simulation	mm
	T0Erw	Largeur effective des racines au début de la simulation	mm
Calendrier de culture	Sowing	Date(s) de semis	-
	Destruction	Date(s) de destruction	-
	Irrigation	Date(s), quantité et localisation de l'irrigation	mm

Note :

* indique une entrée requise pour une culture de couverture,

° indique une entrée requise pour un arbre

et + indique une entrée requise seulement si les racines poussent (d'après Bertrand et al., 2018).

6.3 Application aux données actuelles

Nous avons appliqué BISWAT sur le site d'étude de Capet-Guillier pour les unités fonctionnelles de sol (SFU) définies au cours de la cartographie pédologique. Les fosses de référence choisies pour chaque SFU (Table 6.2) sont les mêmes fosses que celles décrites dans le chapitre 4.

Les paramètres du modèle ont été renseignés à partir des données disponibles sur le site d'étude pour différentes modalités d'entretien du sol. Les données climatiques utilisées ont été celles mesurées par la station météorologique installée sur le site d'étude (cf. 3.2).

En termes de résultats simulés par le modèle BISWAT, pour chacune des SFU et chacune des modalités, nous avons considéré (i) le drainage au bas du profil de sol comparé avec les variations des niveaux piézométriques mesurés au niveau de deux piézomètres installés à Capet-Guillier, (ii) l'évolution de l'humidité du sol en fonction de la profondeur et du temps, et (iii) l'évolution de l'eau disponible pour la vigne, interprétée en termes de stress subi par la plante et comparée à un itinéraire cible, fonction d'un objectif de production.

TABLE 6.2 : Fosses de référence utilisées pour la modélisation avec BISWAT.

Fosse de référence	SFU	Type de sol	Profondeur d'enracinement
F1	1	Fluviosol sableux	1,25 m
F2	2	Colluviosol alluvio-colluvial limono-sablo-argileux carbonaté	1,60 m
F3	3	Calcosol argilo-limoneux colluvial sur colluvions	2,00 m

6.3.1 Paramètres physiques du sol

Les paramètres spécifiques au sol ont été obtenus à partir des descriptions et analyses réalisées sur les trois fosses F1 à F3. Les profondeurs des différents horizons servent de base pour la discrétisation utilisée dans le modèle (Figure 6.2). Les différents horizons sont caractérisés par les humidités caractéristiques θ_{fc} et θ_{minus} estimées à l'aide de la fonction de pédotransfert développé par Bruand et al. (2004), qui estime les humidités caractéristiques des horizons en fonction de la texture, de la densité apparente et du type d'horizon (organo-minéral ou minéral; Table 6.3).

TABLE 6.3 : Caractéristiques de sol des trois fosses utilisées pour la modélisation avec BISWAT.

Fosse	N° Hz	Nom Hz	Base Hz [cm]	Texture [Jamagne]	Densité app.	Teneur en eau pF2.0	Teneur en eau pF4.2
F1	1	LA	12	S	1,44	0,102	0,053
	2	A/S	36	S	1,53	0,102	0,053

Fosse	N° Hz	Nom Hz	Base Hz [cm]	Texture [Jamagne]	Densité app.	Teneur en eau pF2.0	Teneur en eau pF4.2
F2	3	S1	54	S	1,51	0,129	0,038
	4	S2g	74	SA	1,7	0,238	0,131
	5	S3g	92	S	1,6	0,129	0,038
	6	S4g/G	125	SA	1,67	0,238	0,131
	1	LA1ca	15	LSA	1,31	0,281	0,133
	2	LA2ca	32	LSA	1,66	0,281	0,133
	3	Sk	60	SA	1,7	0,238	0,131
	4	Sg	105	SA	1,62	0,238	0,131
F3	5	Sgk	150	SA	1,55	0,238	0,131
	6	Mcig/G	160	S	1,6	0,129	0,038
	1	LAc	20	LAS	1,17	0,327	0,155
	2	S1ca	70	AL	1,61	0,335	0,231
	3	S2ca	130	AL	1,57	0,339	0,228
	4	Cca	160	AL	1,57	0,339	0,228

Pour certains auteurs le paramètre θ_{minus} pour chaque horizon du sol ($\theta_{minus}(z)$, cf. Table 6.1) est modulé par rapport à l'humidité au point de flétrissement $\theta_{wilting\ point}$ approchée par l'humidité au potentiel pF = 4,2. Pellegrino et al. (2004) et Pellegrino et al. (2006) utilisent un grand nombre de mesures d'humidité du sol réalisées avec une sonde à neutrons afin d'estimer θ_{minus} à partir de l'humidité minimale observée dans chaque horizon au cours de la période d'expérimentation. Alors que la réalisation de telles mesures d'humidité est très contraignante et très difficilement réalisable la plupart du temps, les concepteurs de BISWAT proposent une solution pour moduler θ_{minus} à l'aide d'un paramètre α et de la relation (6.2) :

$$\theta_{minus} = \alpha \cdot \theta_{wilting\ point} \quad (6.2)$$

A partir des résultats de Pellegrino et al. (2004), la valeur 1,4 pour α dans le cas de la vigne est suggérée. Nous avons choisi le modèle BISWAT notamment parce qu'il permettait une paramétrisation à partir de données facilement mesurable (*i.e.* horization, textures,...) ou déduites d'expertise largement partagée (*i.e.* humidités caractéristiques déduites de fonction de pédotransfert). Or d'une part, la réalisation de profils d'humidité dans le temps apparaît très coûteux et contraignant et d'autre part, la valeur de $\alpha = 1,4$ proposée à partir d'un nombre limité d'études ne semble pas appartenir à une expertise communément admise. Nous avons donc décidé de tester la sensibilité du modèle à ce paramètre α . Pour cela, nous avons réalisé cinq simulations avec des valeurs de α allant de 1 à 1,4 avec un pas de 0,1. La SFU F3 a été choisie pour ces simulations. La table 6.4 présente les valeurs d'humidité minimum de chaque couche de F3 en fonction des valeurs de α .

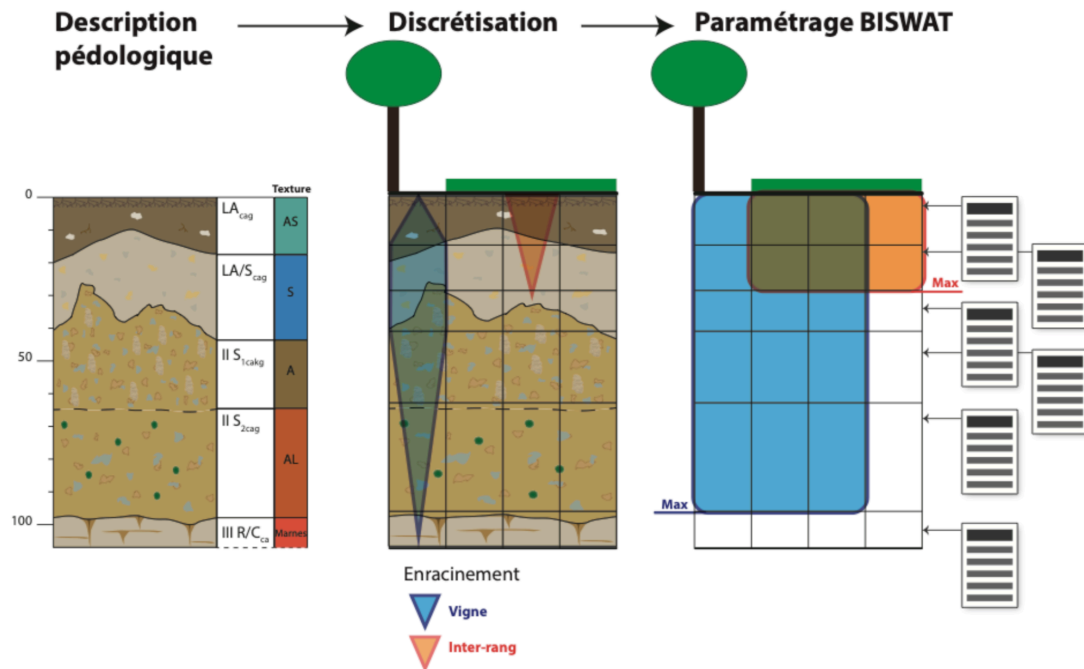


FIGURE 6.2 – Discretisation des données pédologiques pour la paramétrisation du modèle BISWAT.

TABLE 6.4 – Humidités à la capacité au champ (FC) et humidités minimales (minus) en fonction de alpha pour les différentes couches paramétrées dans BISWAT pour F3.

Prof_haut	Prof_bas	ThetaFC	Theta_minus				
			ALPHA_1	ALPHA_1.1	ALPHA_1.2	ALPHA_1.3	ALPHA_1.4
0	10	0.327	0.155	0.1705	0.1860	0.2015	0.2170
10	20	0.327	0.155	0.1705	0.1860	0.2015	0.2170
20	70	0.335	0.231	0.2541	0.2772	0.3003	0.3234
70	130	0.339	0.228	0.2508	0.2736	0.2964	0.3192
130	200	0.339	0.228	0.2508	0.2736	0.2964	0.3192

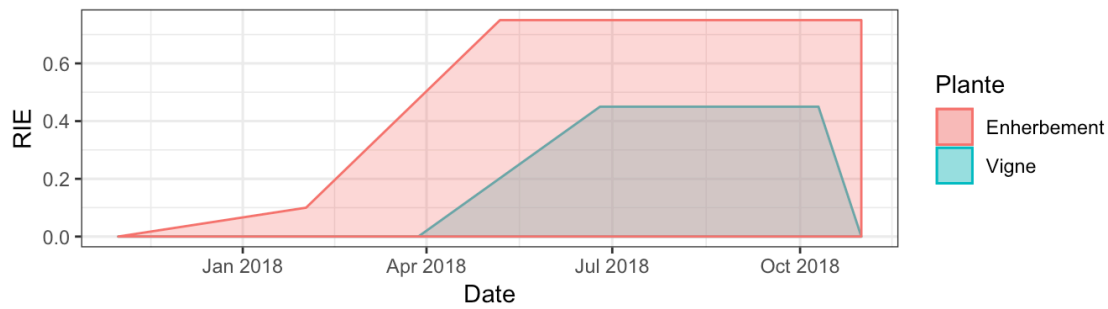


FIGURE 6.3 – Modélisation de l'efficacité d'interception du rayonnement (RIE) au cours de la saison 2018.

6.3.2 Paramètres de végétation et de pratiques

Pour estimer les valeurs de l'efficacité d'interception du rayonnement (RIE), nous avons utilisé un modèle linéaire par morceau comme proposé dans le manuel de paramétrisation de BISWAT fourni par les auteurs du modèle (Figure 6.3). Pour la vigne, le RIE est de 0 jusqu'au débourrement au 29 Mars. Elle augmente linéairement jusqu'au 25 Juin, date à laquelle le feuillage remplit tout l'espace permis par le palissage. La valeur maximale de 0,45 a été retenue pour le RIE de la vigne (Figure 6.3). Pour l'enherbement, la croissance débute à partir du semis le 1er Novembre. Elle est considérée lente pendant l'hiver jusqu'au 1er Février, puis elle atteint sa valeur maximale de 0,75 le 7 mai (Figure 6.3).

Les simulations ont été synchronisées avec la saison viticole : pour la saison 2018, le modèle a été appliqué sur 365 jours, du 1^{er} Novembre 2017 au 31 Octobre 2018. Ces dates permettent de prendre en compte la recharge hivernale des sols, puis de modéliser la saison viticole complète jusqu'à la fin des vendanges. Afin de fournir au modèle des valeurs initiales d'humidité cohérentes, nous avons considéré une période de *warm up* en réalisant une simulation en considérant les données climatiques du 1er Janvier au 1er Novembre 2017 (Figure 6.4).

Pour chacune des 3 SFU, deux modalités d'enherbement ont été simulées : (i) l'inter-rang entretenu par travail du sol à partir du 8 Mai, (ii) l'inter-rang entretenu par tonte tout au long de la saison. Dans les deux cas, le semis de l'enherbement a été programmé au 1er Novembre.

6.3.3 Prise en compte des écoulements de surface

Pour les parcelles situées dans SFU-3 (parcelles C1 et C2), nous avons décidé de tester l'influence de la redistribution intra-parcellaire du ruissellement. En effet, ces parcelles sont hydrologiquement isolées de l'amont par un fossé situé en haut de parcelle. La topographie indique une ligne de plus grande pente parallèle aux rangs de vigne sur l'ensemble de la parcelle et l'absence de zone de divergence. La pente est comprise entre 1 et 17%, de médiane 6%, et décroissante vers l'aval avec une rupture à environ 2/3 de la parcelle (Figure 6.5). Afin d'estimer la hauteur d'eau redistribuée par le ruissellement, nous posons

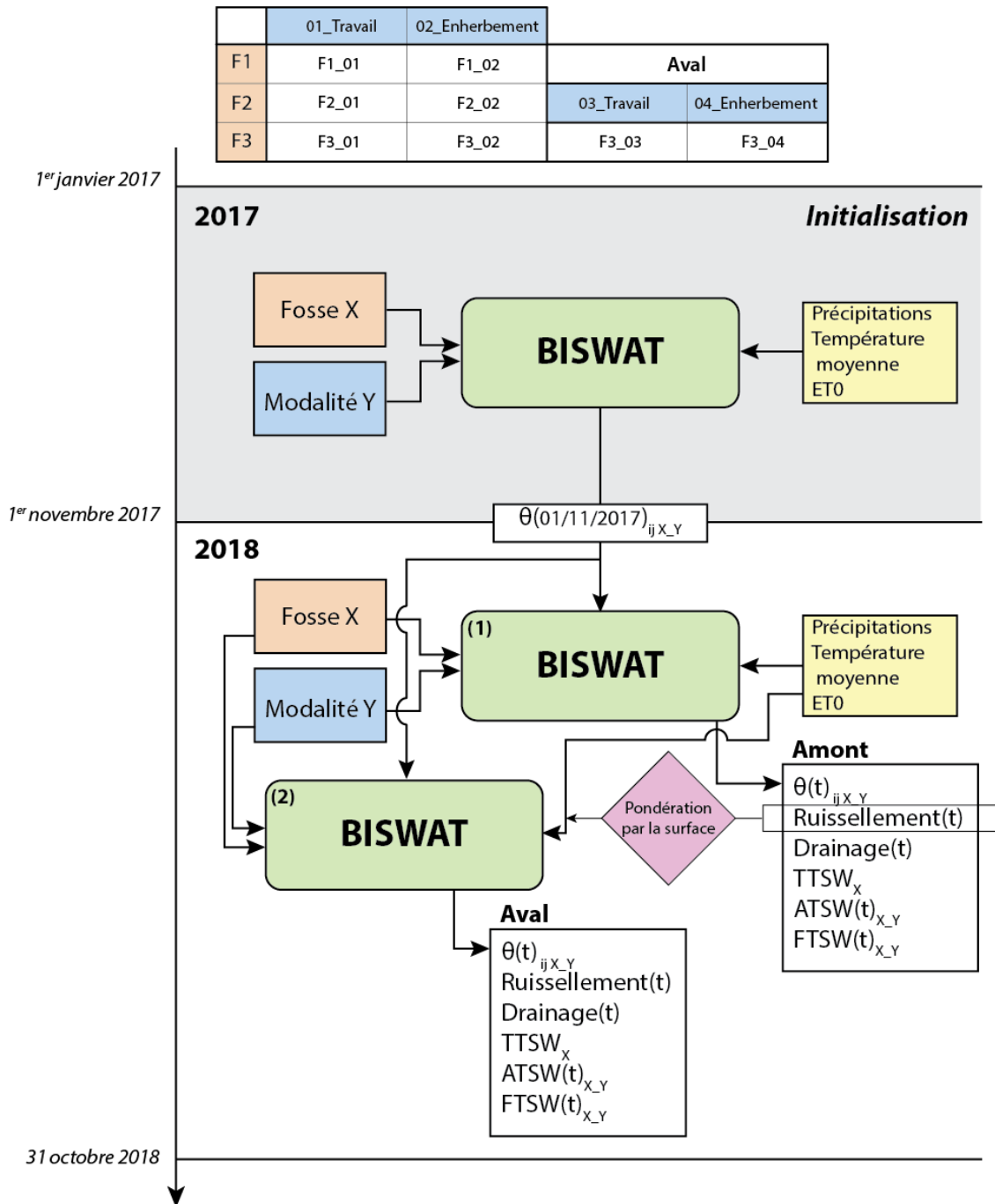


FIGURE 6.4 – Séquences temporelles modélisées pour l'année 2018.

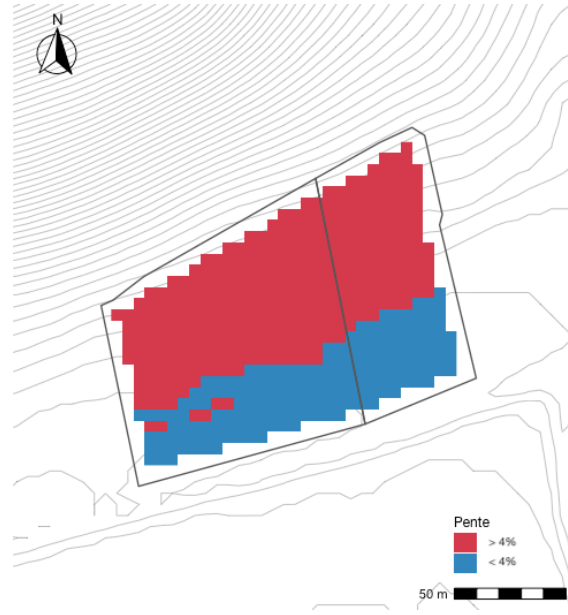


FIGURE 6.5 – Zonage par la pente des apports par ruissellement sur les parcelles C1 et C2 à Capet-Guillier (les courbes de niveau en arrière-plan sont espacées de 1 m).

l'hypothèse que l'ensemble du ruissellement produit dans la zone amont est transmis à la zone d'aval. Cette hypothèse permet de calculer la hauteur d'eau produite en amont ($h_{Off_{amont}}$) et reportée en aval ($h_{On_{aval}}$) à partir du rapport de la surface de la zone amont (S_{amont}) sur la zone aval (S_{aval}) (Eq. (6.3)).

$$h_{On_{aval}} = h_{Off_{amont}} \frac{S_{amont}}{S_{aval}} \quad (6.3)$$

En retenant un seuil de 4% de pente pour délimiter la zone d'apport par ruissellement, le ratio des surfaces amont sur aval est de 1,97 (Figure 6.5). La modélisation est réalisée dans une première phase sur la partie amont. Puis le ruissellement au pas de temps journalier calculé par le modèle est ajouté aux précipitations journalières pour la partie aval (Figure 6.4).

Au total sur les 3 SFU, en prenant en compte les deux modalités d'entretien du sol sur F1 et F2, et les 4 modalités sur F3, les simulations réalisées sur l'année 2018 représentent 8 chroniques (Figure 6.4).

6.3.4 Climat des années 2017 et 2018

La simulation a été réalisée sur l'année viticole 2018 qui s'étend du 1er Novembre 2017 au 31 Octobre 2018. Dans cette partie, nous présentons les données météorologiques mesurées par la station du vignoble.

L'année 2017 a été relativement sèche avec un cumul de précipitations de 749 mm (Table 6.5). En 2018, les précipitations ont été plus importantes avec un cumul annuel de 905 mm, mais également une demande climatique en légère hausse par rapport à 2017 (Table 6.5).

TABLE 6.5 – Données météorologiques des années calendaires 2017 et 2018 au Château Capet-Guillier.

Année	Précipitations annuelles totales [mm]	ET0 annuelle totale [mm]	Température moyenne annuelle [°C]
2017	749	811	13.6
2018	905	826	14.0

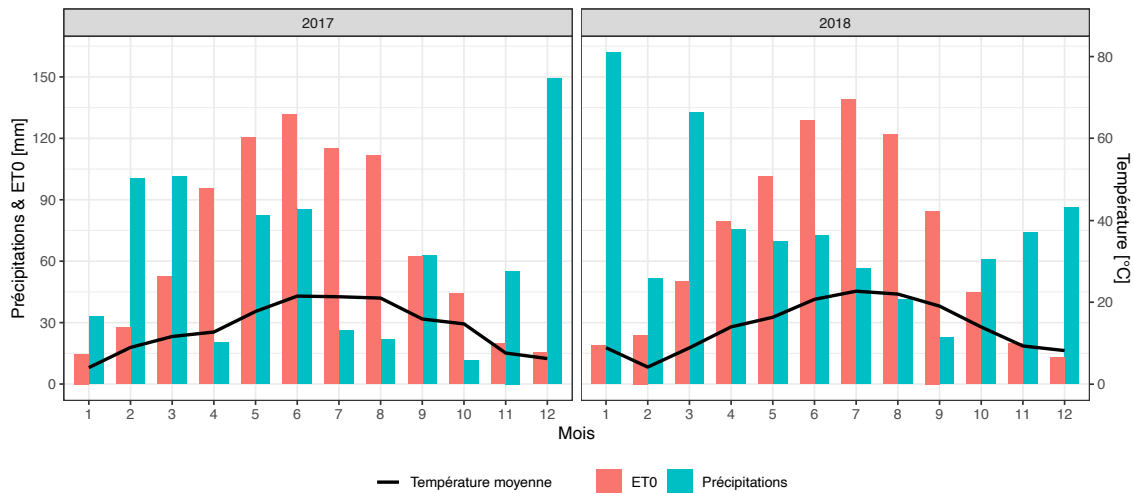


FIGURE 6.6 – Diagrammes ombrothermiques des années 2017 et 2018 à Capet-Guillier

Les diagrammes ombrothermiques (6.6) de 2017 montrent que la fin de l'été a été assez peu pluvieuse et que la fin de l'année est marquée par des précipitations élevées. La première moitié de l'année 2018 est humide, au mois de Juillet 2018 la demande climatique est au maximum, les précipitations diminuent jusqu'au mois d'Octobre avant une augmentation en période automnale. L'année viticole 2018 est donc une année relativement humide avec un cumul de précipitations de 949 mm entre le 1^{er} Novembre 2017 et le 31 Octobre 2018. L'augmentation progressive des températures à la fin du printemps et pendant l'été a favorisé l'augmentation de la demande climatique.

6.3.5 Résultats des simulations

6.3.5.1 Sensibilité au paramètre "humidité minimale"

Les résultats de l'analyse de sensibilité au paramètre α montrent une très faible influence sur le drainage produit, et une forte influence sur la fraction d'eau disponible pour la vigne. En effet, la Figure 6.7 montre la variation de la FTSW de la vigne au cours de l'année 2018 pour les cinq valeurs de α entre 1 et 1,4. En hiver, quelque soit la valeur de α , la FTSW est maximale dès le 10 Décembre. Cependant, avant cette date, plus α est élevé, plus le déficit hydrique est marqué. Ainsi dans le cas de $\alpha=1,4$, la FTSW est inférieure à 0,1 au 1^{er} Novembre 2017 alors qu'elle est proche de 0,65 dans le cas de $\alpha=1$. De même, au 1^{er} Octobre 2018, la simulation pour $\alpha=1,4$ tend vers une FTSW de 0 alors

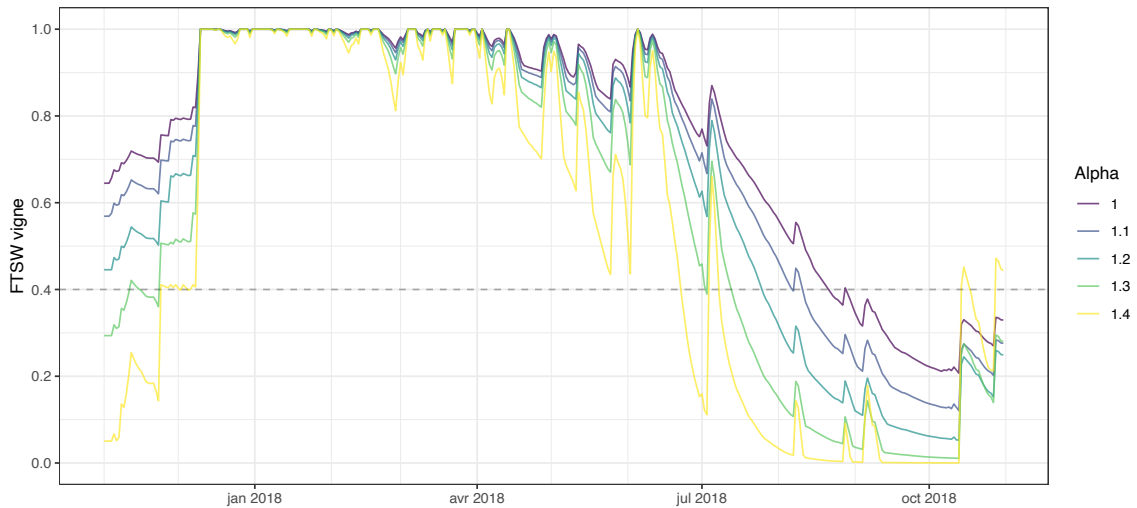


FIGURE 6.7 – Evolution de la FTSW de la vigne au cours de l'année 2018 en fonction du paramètre alpha.

que lorsque $\alpha=1$ la FTSW est proche de 0,22. Au cours de l'année, plus α est élevé plus la FTSW simulée sera sensible à la recharge et à l'évapotranspiration (Figure 6.7).

Les résultats avec $\alpha=1,4$ ne semblent pas conduire à des résultats cohérents avec le fonctionnement de la vigne cette année-là sur le site d'étude. Nous avons donc décidé de garder la valeur $\alpha=1$ pour les simulations suivantes.

6.3.5.2 Drainage

Le drainage simulé par le modèle pour les différentes fosses et modalités est présenté dans la Figure 6.8. Au 31 octobre 2018, le drainage cumulé simulé le plus important est celui de F1 pour la modalité inter-rang travaillé (01) avec 380 mm. Pour la même SFU, avec la modalité d'enherbement maintenu au cours de la saison, le drainage cumulé simulé est plus faible de 30 mm. Au cours de l'année, le drainage cumulé commence à augmenter fortement à partir du 10 décembre jusqu'au 28 janvier pour atteindre plus de 220 mm. Au cours de cette croissance, les courbes des deux modalités sont proches avec un léger décalage d'environ 13 mm de la modalité enherbée (02) sous la modalité de sol travaillé (01). L'augmentation du drainage cumulé au cours du temps reste importante jusqu'à mi-avril pour atteindre 350 mm (modalité 01) et 337 mm (modalité 02). On note une dernière augmentation brutale du drainage au début du mois de juin. Au cours de cette dernière séquence, le drainage produit pour la modalité 01 (environ 22 mm) et plus important que celui produit pour la modalité 02 (environ 8 mm). Au niveau de la SFU F2, la dynamique du drainage au cours de l'année est relativement semblable à celle décrite précédemment pour F1. Le cumul total de drainage atteint 349 mm pour la modalité 01 (inter-rang travaillé) et 328 mm pour la modalité 02 (inter-rang enherbé). Cependant dans le cas de F2, le décalage d'environ 20 mm entre les courbes des deux modalités est quasiment constant dès le premier épisode de drainage en décembre. De plus, le dernier épisode de drainage important observé au début du mois de juin pour F1, n'est pas visible pour F2 qui atteint son niveau maximal de drainage cumulé dès mi-avril. On observe également

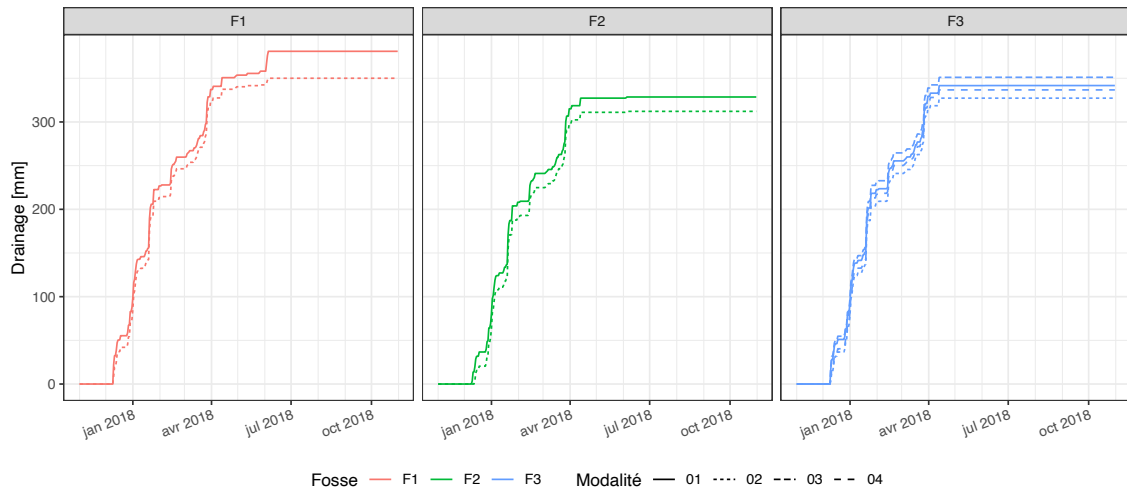


FIGURE 6.8 – Cumuls des drainages simulés pour les différentes fosses et modalités en 2018.

une dynamique semblable pour F3 avec une forte augmentation dès le 10 décembre. Les cumuls arrivent à leur niveau maximal à partir du 13 avril. Le cumul le plus important (351 mm) est atteint pour la modalité 03 (inter-rang travaillé en aval), en seconde position (342 mm) on trouve la modalité 01 (inter-rang travaillé en amont), puis (337 mm) la modalité 04 (inter-rang enherbé en aval) et enfin (327 mm) la modalité 02 (inter-rang enherbé en amont).

Le drainage ne pouvant contribuer qu'à l'augmentation du niveau de nappe, en non à sa diminution, nous avons sélectionné uniquement les variations positives du niveau piézométrique pour les comparer au drainage produit par le modèle (Figure 6.9). La première remontée du niveau piézométrique est observée à partir du 10 décembre au niveau des deux piézomètres. Cette remontée est progressive pour P1, et assez brutale pour P3. La remontée s'intensifie pour les deux piézomètres au début du mois de janvier. Un court palier d'une dizaine de jours est atteint le 1er février avec un cumul de 2,25 m de remontée pour P1 et 3,36 m pour P3. Une nouvelle séquence de remontée a lieu mi-février : 0,35 m pour F1 et 0,80 m pour F3. Le cumul de remontée continue d'augmenter plus progressivement pour F1 que pour F3 pendant la saison, jusqu'à atteindre un plateau à partir du 6 juin. On notera une légère remontée de 0,10 m pour P1 autour du 5 juillet, non visible dans le piézomètre P3.

F1 et F2 sont situés dans la plaine, les drainages simulés de ces deux SFU sont comparés aux données piézométriques de P1 lui aussi situé dans la plaine (Figure 6.10). Les simulations faites sur la SFU F3 ont été comparées aux données du piézomètre P3 situé à proximité dans le coteau (Figure 6.10). Les graphes sur la figure 6.10 montrent la superposition du cumul de drainage simulé au niveau de F1, F2 et F3 avec le cumul de remontée de nappe mesurée dans les piézomètres P1 (pour F1 et F2) et P3 (pour F3). Le début de remontée de la nappe démarre plus progressivement que le drainage simulé à partir du 10 décembre pour P1. La remontée s'intensifie à partir de début janvier de manière synchrone avec le drainage simulé pour P1, mais avec un léger retard pour P3. Ce retard semble ensuite être rattrapé pendant le reste de la saison. P1 présente une phase

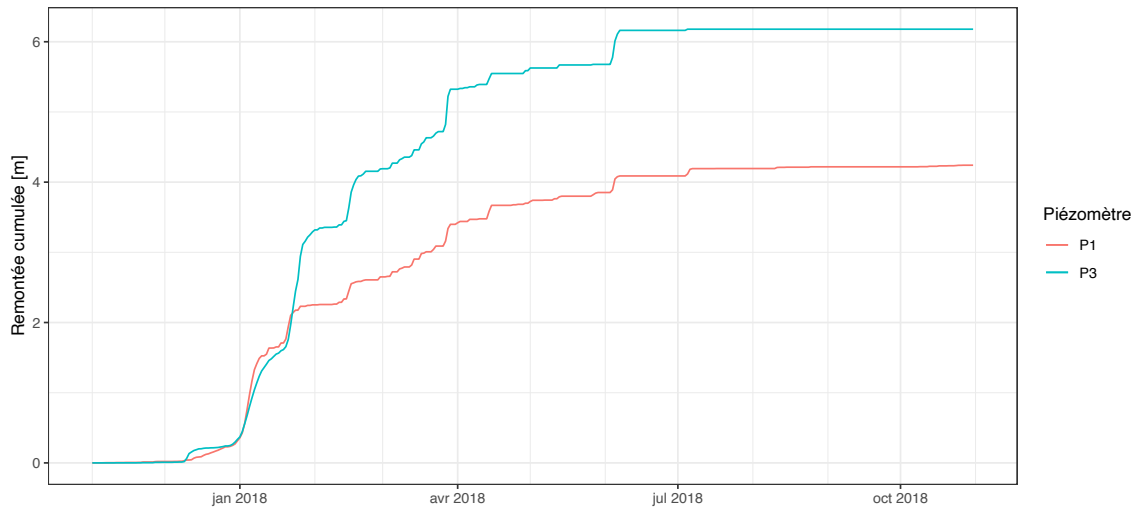


FIGURE 6.9 – Remontés cumulés des niveau piézométriques des piézomètres P1 (plaine) et P3 (côteau).

de remontée de 25 cm autour du 5 juin qui est visible sur la simulation de F1, mais pas de F2. Une autre phase de remontée le 5 juillet, d'une dizaine de cm, n'est visible ni sur la simulation du drainage de F1 ni de F2 (Figure 6.10). La dernière phase de remontée majeure de la nappe dans le piézomètre P3 est celle du début du mois de juin (environ 50 cm), mais le modèle ne produit plus de drainage pour F3 après le 14 avril (Figure 6.10).

Les variations positives des deux piézomètres P1 et P3 semblent donc cohérentes avec les drainages produits par le modèle BISWAT pendant la période de recharge hivernale et printanière après une phase d'initialisation pendant le mois de décembre. A la fin du printemps et au cours de l'été, le modèle ne produit pas de drainage alors que des remontées du niveau piézométriques sont observées dans P1 et P3. Plusieurs hypothèses peuvent répondre à cet écart : (i) BISWAT sous-estime le drainage à cette période, ce qui implique une surestimation de l'évapotranspiration ; (ii) l'augmentation du niveau piézométrique observée à cette période est due au une alimentation latérale de la zone saturée et non par le drainage issu par la percolation de l'épaisseur de sol sus-jacent.

6.3.5.3 Teneur en eau du sol

Le modèle BISWAT génère des variables d'état du sol à un pas de temps journalier au cours de la durée de la simulation. Parmi ces variables d'état, l'humidité des différents horizons pour les trois SFUs modélisés au cours de la saison est présentée dans la Figure 6.11. Les humidités à un pas de temps mensuel entre le 1^{er} Avril et le 1^{er} Octobre ont été rapportés sur ces graphiques. Ces humidités sont bornées par l'humidité minimale et l'humidité à la capacité au champ représentées par des lignes noires.

Les trois fosses présentent des profils d'humidité différents en fonction de la géométrie des horizons et de types de matériaux (Figure 6.11). Le sol au niveau de F1, dominé par une texture grossière, présente des humidités faibles en surface. En profondeur, les textures plus fines alternent avec les textures grossières, donnant aux profils hydriques une forme

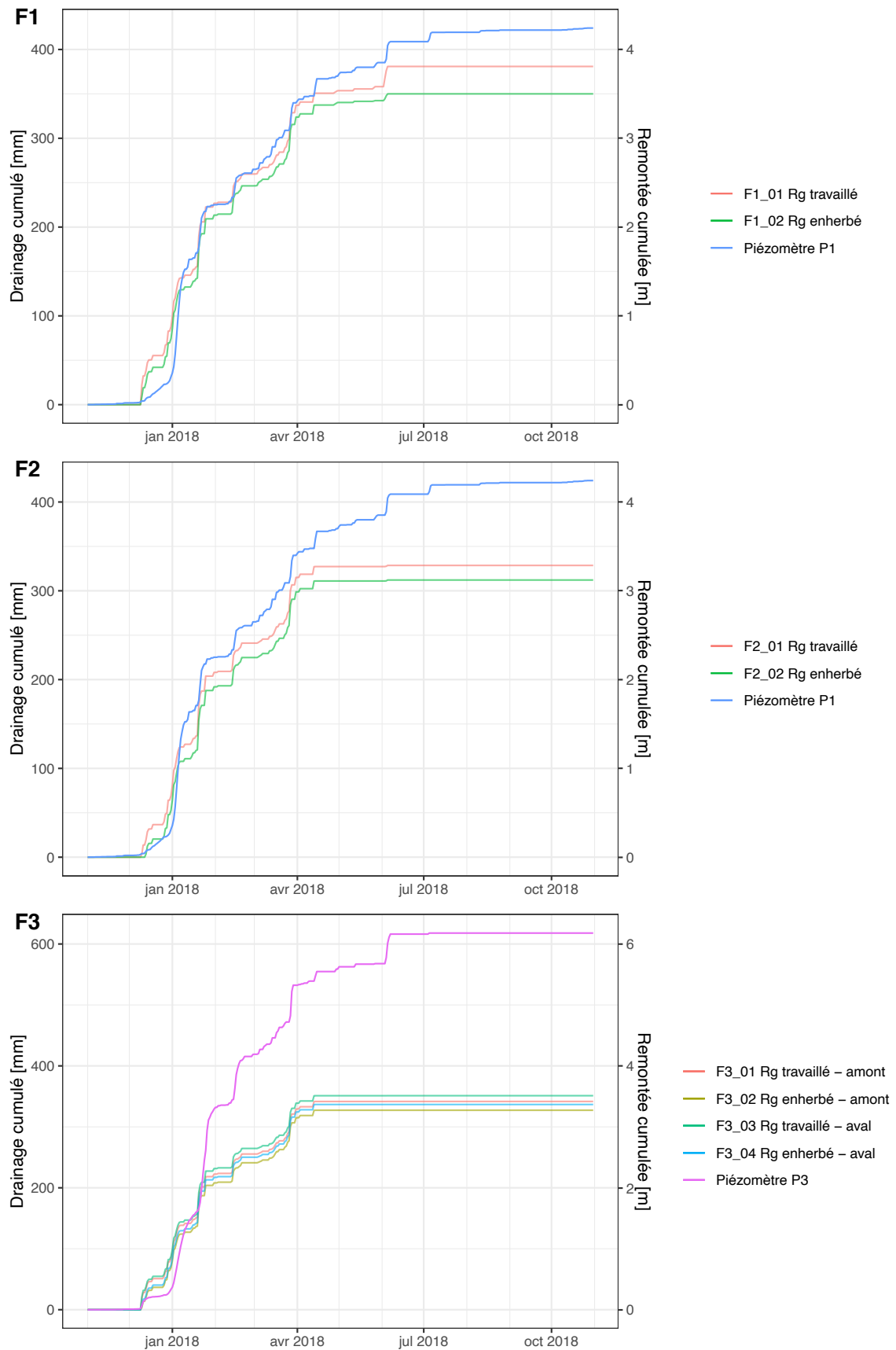


FIGURE 6.10 – Drainage simulé pour F1, F2 et F3 et remonté cumulée du niveau piézométrique de P1 et P3 sur la saison 2018.

en “Z”. Au niveau de F2, la texture du sol est plus fine ce qui donne des humidités caractéristiques plus élevées. L’intervalle entre les deux bornes est également plus important que pour F1, laissant un volume d’eau accessible à la vigne plus important. En profondeur, les deux humidités caractéristiques diminuent à cause d’une texture plus grossière. Au niveau de F3, les textures de sol sont encore plus fines et les humidités caractéristiques associées sont plus élevées que celles de F2. La texture étant assez homogène sur l’ensemble du profil de sol, ces humidités varient assez peu.

Au cours de l’année 2018, pour les trois SFUs, les humidités sont les plus importantes au mois d’Avril et vont en diminuant jusqu’au mois d’Octobre marquant ainsi l’assèchement progressif du profil de sol au cours de la saison (Figure 6.11). Les 50 premiers centimètres de sol étant directement soumis aux précipitations, les humidités simulées dans cet intervalle y sont les plus variables et s’entrecroisent parfois. On remarque également que dans les 10 premiers centimètres de sol, en conditions sèches, l’humidité passe en dessous du seuil de θ_{minus} grâce à la prise en compte de l’évaporation par le modèle. Lorsque l’on compare les modalités “01” (sol travaillé) et “02” (sol enherbé), les profils d’humidités simulées dans le cadre d’un sol enherbé sont systématiquement plus faibles que lorsque l’enherbement est détruit au printemps.

6.3.5.4 Eau disponible pour la vigne

Dans cette partie, nous détaillons les résultats des simulations BISWAT sur l’année 2018 pour les différentes modalités décrites précédemment. La sortie principale du modèle BISWAT et ce pourquoi il a été développé est l’indice de stress hydrique, SWEP (équivalent à la FTSW, cf. Eq. (6.1)).

La Figure 6.12 montre la simulation de l’ATSW au cours de la saison 2018 pour les 3 SFUs et pour la modalité 01 (inter-rang travaillé). La TTSW, soit la quantité maximale d’eau disponible pour la vigne, calculée par le modèle est la plus importante pour F3 (230 mm). Elle est presque deux fois plus faible pour F1 (107 mm) et intermédiaire pour F2 (182 mm). Au cours de cette simulation, les trois sols démarrent avec peu d’eau disponible, puis ils atteignent leur TTSW le 11 décembre 2017. L’ATSW reste proche de la TTSW pendant l’hiver, puis elle commence à diminuer significativement à partir de mi-avril.

Dans la suite, nous avons choisi de présenter la FTSW plutôt que le SWEP car le lien avec l’état hydrique du sol est plus facile. Le seuil de 0,4 pour la FTSW en dessous duquel la vigne réduit sa transpiration à cause du stress hydrique a été retenu (Pellegrino et al., 2006).

Pour les trois SFUs modélisés, on retrouve une évolution globalement assez homogène de la FTSW au cours de la saison (Figure 6.13). La FTSW atteint son maximum pour les trois fosses, le 10 décembre avec l’arrivée des précipitations hivernales. Elle reste proche de 1 jusqu’à mi-Avril puis diminue au cours de la saison alors que la demande climatique augmente et que les précipitations diminuent. Les événements de recharge des réserves en eau du sol sont marqués par des remontées rapide de la FTSW. F1 apparaît être le plus sensible aux événements de recharge, tandis que F3 est le moins sensible. Pour chaque SFU, au cours de la saison, la FTSW est plus faible pour la modalité d’enherbement

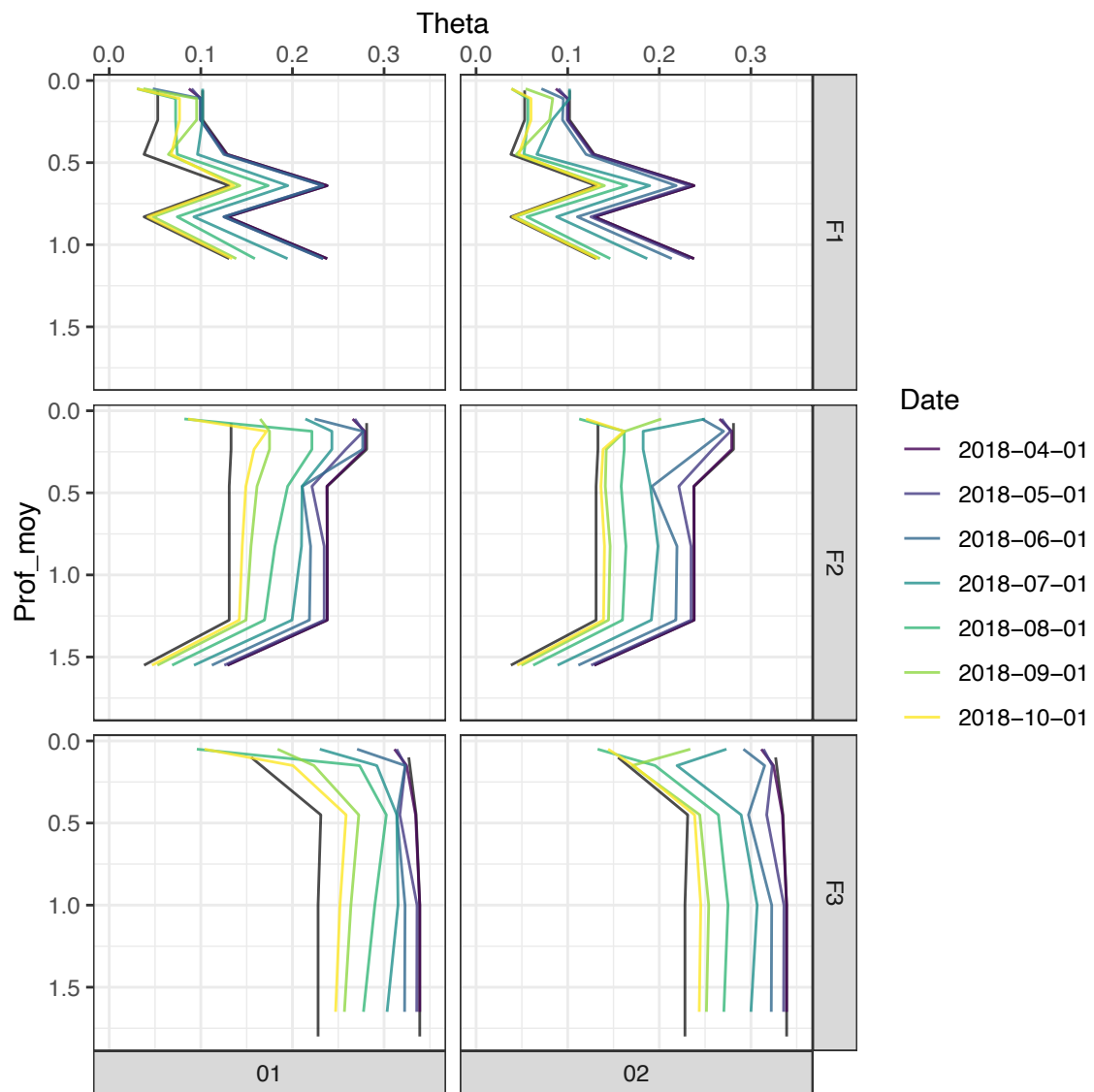


FIGURE 6.11 – Profils d’humidité pour les trois fosses et deux modalités au cours de la simulation sur l’année 2018 avec BISWAT.

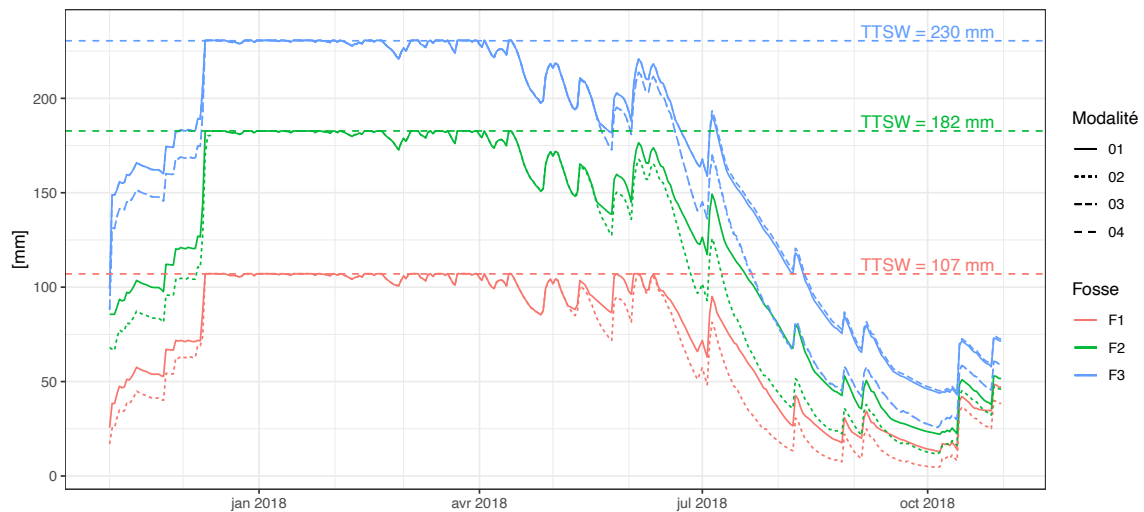


FIGURE 6.12 – Simulation de l'eau disponible pour la vigne (ATSW) pour F1, F2 et F3 au cours de la saison 2018.

TABLE 6.6 – Comparaison des moyennes de FTSW entre les différentes modalités et SFUs sur la période entre le 1er Avril et le 31 Octobre 2018.

Fosse	Travail	Tonte	Travail aval	Tonte aval
F1	0.573	0.488		
F2	0.562	0.491		
F3	0.605	0.536	0.61	0.537

maintenu que pour la modalité de sol travaillé à partir du 8 Mai. La différenciation est visible dès cette date pour F1 et à partir de mi-Mai pour F2 et F3.

Pour la fosse F3, la prise en compte des écoulements de surface à peu d'influence sur la FTSW : la partie aval de la parcelle montre une FTSW très légèrement plus élevée (de l'ordre de 0,01) à partir du début du mois de Juillet pour la modalité sol travaillé, mais la différence n'est pas visible pour la modalité de tonte.

F3 présente la FTSW moyenne entre le 1^{er} Avril et le 31 Octobre la plus forte des trois SFUs de modélisation (Table 6.6) soit 0,605. La moyenne la plus faible est celle de F2 avec 0,562 alors que F1 présente une moyenne de 0,573. Une fois encore, on observe que la prise en compte des écoulements de surface a une faible influence sur la FTSW de F3, car les moyennes sur la période sont très proches.

En termes de date d'apparition du stress hydrique (pour FTSW < 0,4, Lebon et al., 2003 ; Pellegrino et al., 2006), F1 est la SFU la plus précoce avec un passage sous le seuil de FTSW de 0,4 à partir du 29 Juillet dans le cas d'un sol travaillé et le 17 Juillet dans le cas d'un enherbement entretenu par tonte (Table 6.7). Pour F2, le stress apparaît 7 jours plus tard lorsque le sol est travaillé, et deux jours plus tard lorsque l'enherbement est maintenu. F3 montre une apparition plus tardive du stress : respectivement le 16 août et le 26 juillet pour les modalités travail et tonte. La modalité « tonte » présente une plus faible amplitude entre l'apparition du stress pour F1 et F3 (9 jours) que la modalité travail

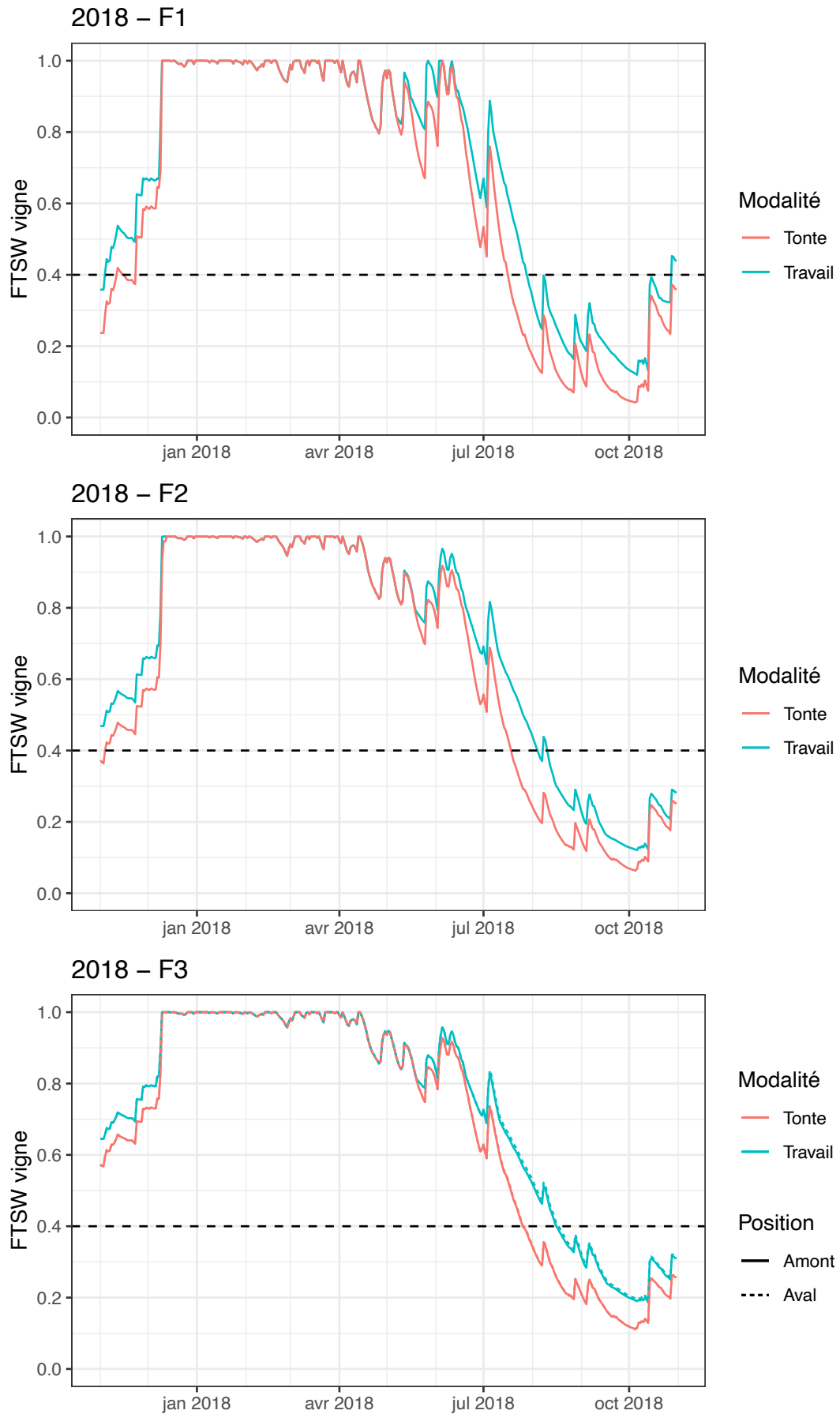


FIGURE 6.13 – FTSW de la vigne pour F1, F2 et F3 en 2018, comparaison des modalités de travail du sol et de tonte.

TABLE 6.7 – Premier jour d’apparition de stress ($FTSW < 0,4$) subit par la vigne pour les différentes fosses et modalité entre le 1er Avril et le 31 Octobre 2018.

Fosse	Travail	Tonte	Travail aval	Tonte aval
F1	29 jul	17 jul		
F2	05 août	19 jul		
F3	16 août	26 jul	18 août	27 jul

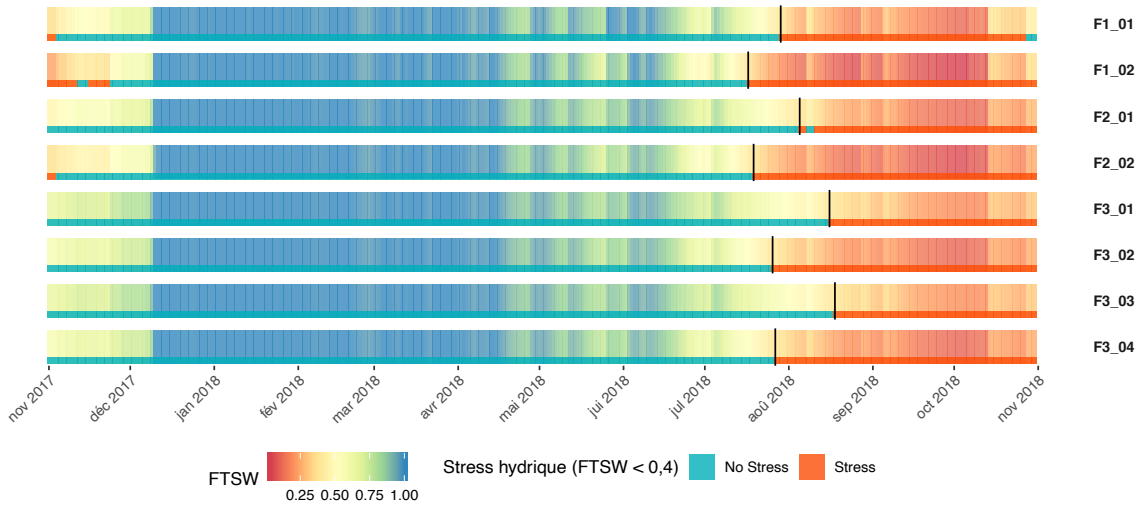


FIGURE 6.14 – Variation du FTSW au cours de la saison 2018.

(18 jours). Pour F1, la destruction de l’enherbement au printemps retarde l’apparition du stress hydrique de 12 jours, de 17 jours pour F2, et de 21 jours pour F3 (6.7).

La Figure 6.14 permet de visualiser l’apparition de la contrainte hydrique au cours de la saison, et de comparer les différentes fosses et modalités entre elles. La bande rouge sur la partie inférieure de chaque chronologie marque la présence d’un stress hydrique ($FTSW < 0,4$) et le trait noir marque la date d’apparition du stress au cours de la saison. La Table 6.8 présente le nombre de jours de stress subi par la vigne pour les différentes fosses et modalités entre le 1er Avril et le 31 Octobre (soit 213 jours).

Le nombre de jours de stress est systématiquement le plus élevé pour F1 et le plus faible pour F3. Le maintien de l’enherbement favorise également systématiquement l’augmentation du nombre de jours de stress. La prise en compte des apports d’eau par ruissellement

TABLE 6.8 – Nombre de jours de stress ($FTSW < 0,4$) subit par la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre 2018.

Fosse	Travail	Tonte	Travail aval	Tonte aval
F1	91	107		
F2	85	105		
F3	77	98	75	97

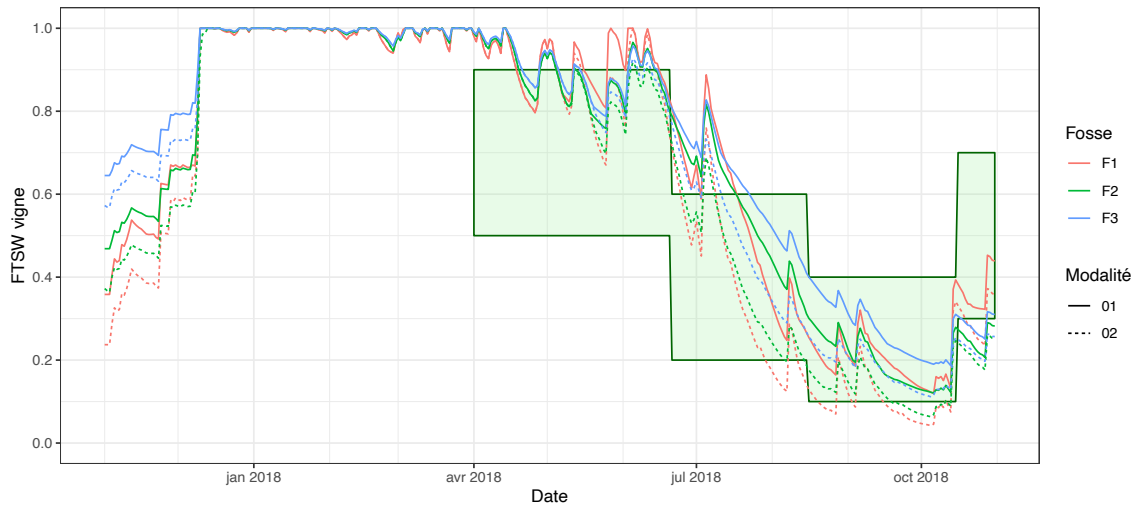


FIGURE 6.15 – Simulation de la FTSW de la vigne sur l'année 2018 pour les différentes fosses et modalité d'enherbement. En vert, la cible d'itinéraire hydrique optimal visé.

TABLE 6.9 – Pourcentage de jours dans la cible de FTSW pour la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre 2018.

Fosse	Travail	Tonte	Travail aval	Tonte aval
F1	65 %	50 %		
F2	62.1 %	62.1 %		
F3	60.3 %	65.9 %	59.3 %	65.9 %

sur la partie aval pour F3 diminue de 1 à 2 le nombre de jours de stress. Les conditions hydriques les plus stressantes sont rencontrées pour F1 avec maintien de l'enherbement, avec 107 jours de stress sur 213 jours, soit près de 50 % de jours de stress au cours de la saison. Avec la même modalité, F2 présente également des conditions de stress important avec 105 jours de stress.

Comme nous avons pu le voir précédemment, dans le cadre de la production viticole, la contrainte hydrique est un facteur de qualité de la production de vin rouge. Au cours de la saison, le moment d'apparition de la contrainte en fonction de la phénologie de la vigne est un élément clé. Dans ce cadre, un exemple d'itinéraire de contrainte hydrique optimal a été défini (Pellegrino et al., 2006) en fonction du calendrier phénologique de la vigne : pas ou peu de contrainte hydrique du débourrement (début Avril) à la floraison (mi-Juin), puis installation progressive d'une contrainte modérée jusqu'à la véraison (début Août) et contrainte marquée pendant la maturation jusqu'aux vendanges (fin Septembre et début Octobre) et un retour des pluies après la récolte. Un tel itinéraire de stress hydrique dépend des ambitions du viticulteur en termes de qualité et de rendement attendu sur ses parcelles. L'itinéraire cible présenté sur la Figure 6.15 est un exemple d'itinéraire pour une conduite qualitative.

La Figure 6.15 montre les itinéraires hydriques de la vigne (FTSW) au cours de l'année 2018 pour les différentes fosses et modalités d'enherbement, superposées à un itinéraire

cible. La Table 6.9 présente le pourcentage de jours dans l'itinéraire cible pour chacun des cas simulés. Le moins bon score obtenu est de 50 % pour F1 avec enherbement maintenu (modalité 02). Le meilleur score est 65,9 % obtenu par F3 avec enherbement (sans différence entre la partie amont (02) et aval (04)). F1 obtient un meilleur score (65 %) lorsque l'enherbement est détruit au printemps. Au contraire, F3 obtient un score plus faible (60,3%) dans la même situation. Dans tous les cas, F2 obtient un score intermédiaire entre F1 et F3 (62,1 %) et ce score n'est pas impacté par la modalité d'enherbement.

Ces résultats apparaissent cohérents vis-à-vis du fonctionnement de la vigne, l'année 2018 ayant constitué une bonne année du point de vue des vignerons (Geny and Marchal, 2018).

6.4 Application à partir de scénarios climatiques

L'intérêt d'un modèle comme BISWAT peut être de simuler le bilan hydrique pour des conditions observées, mais aussi pour des situations différentes. Dès lors que les simulations nous paraissent correctes sur notre site d'étude, nous proposons par la suite de produire et d'analyser les résultats simulés pour deux scénarios climatiques contrastés sur ce site pour la modalité d'entretien par le travail du sol à partir du début du mois de mai (modalité 01).

De la même manière que précédemment pour 2018, nous travaillons sur les années viticoles en considérant le début de l'année N le 1er Novembre de l'année N-1 et la fin le 31 Octobre de l'année N. Entre le 1^{er} Janvier 2046 et le 31 Décembre 2050, nous disposons de 4 années viticoles complètes (2047 à 2050). Le début de l'année 2046 a été utilisée afin d'initialiser le modèle. Les simulations BISWAT ont été faites pour chacune des SFU F1, F2 et F3 utilisés précédemment en 2018.

6.4.1 Projections climatiques

Les scénarios climatiques futurs ont été obtenus en utilisant un modèle climatique régional (RCM) du projet EURO-CORDEX. Le nombre de simulations disponibles étant très important, nous avons contraint notre recherche à une simulation à un pas de temps journalier proposant les trois variables nécessaires : précipitations, température moyenne de l'air au niveau du sol et évapotranspiration de référence. Nous avons retenu la simulation réalisée par le SMHI (*Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre*) en 2013 sur l'emprise de l'Europe (EUR-11) à une résolution de 0,11° avec le modèle RC4 (*driving model* : CNRM-CERFACS-CNRM-CM5) pour l'ensemble r11p1. Parmi les quatre profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP, *Representative Concentration Pathway*) établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2015), nous avons retenu deux scénarii :

- RCP4.5 : Les stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre entraînent une stabilisation du forçage radiatif à 4,5 W/m² avant 2100 (GIEC, 2015).
- RCP8.5 : L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre signifie que le forçage radiatif atteindra 8,5 W/m² en 2100 (GIEC, 2015). Ce scénario est le plus proche des tendances actuellement mesurées dans les concentrations de gaz à effet de serre.

TABLE 6.10 – Données météorologiques simulées pour les années 2046 à 2050 pour les scenarii RCP 4.5 et 8.5.

RCP	Année	Précipitations annuelles totales [mm]	ET0 annuelle totale [mm]	Température moyenne annuelle
RCP 4.5	2046	1090	720	11.3
	2047	999	808	13.0
	2048	946	803	12.6
	2049	1113	743	12.1
	2050	832	856	12.6
RCP 8.5	2046	1016	754	12.1
	2047	1316	744	12.9
	2048	934	842	13.0
	2049	1017	839	13.1
	2050	1036	811	13.0

TABLE 6.11 – Statistiques descriptives des données météorologiques simulées de 2046 à 2050 pour les scenarii RCP 4.5 et 8.5.

RCP	RR_moy	RR_sd	ET0_moy	ET0_sd	Tm_moy	Tm_sd
RCP 4.5	996	114	786	54	12.3	0.7
RCP 8.5	1064	146	798	46	12.8	0.4

Des résultats de simulation de ces projections climatiques sont mis à disposition sur le site de l'ESGF (*Earth System Grid Federation*; <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cordex-ipsl/>) sous forme de fichiers NetCDF (*Network Common Data Form*) correspondant ici à un empilement de dalles raster à un pas de temps journalier. Les variables de précipitations, température moyenne de l'air au niveau du sol et évapotranspiration de référence ont été extraites pour le pixel correspondant au site d'étude du Château Capet-Guillier afin d'obtenir une série temporelle pour ces trois variables sur la période 2046 à 2050 pour chacun des deux scenarii.

Les précipitations annuelles totales moyennes modélisées par le RCM sur la période 2046 à 2050 sont respectivement de 996 mm (± 114 mm d'écart-type) et 1064 mm (± 146 mm d'écart-type) pour les scenarii RCP 4.5 et RCP 8.5. Sur la même période, les ET0 annuelles totales moyennes sont respectivement de 786 mm (± 54 mm d'écart-type) et 798 mm (± 46 mm d'écart-type); et les températures moyennes annuelles sont de 12,3°C ($\pm 0,7$ mm d'écart-type) et 12,8°C ($\pm 0,4$ mm d'écart-type) (respectivement pour RCP 4.5 et RCP 8.5).

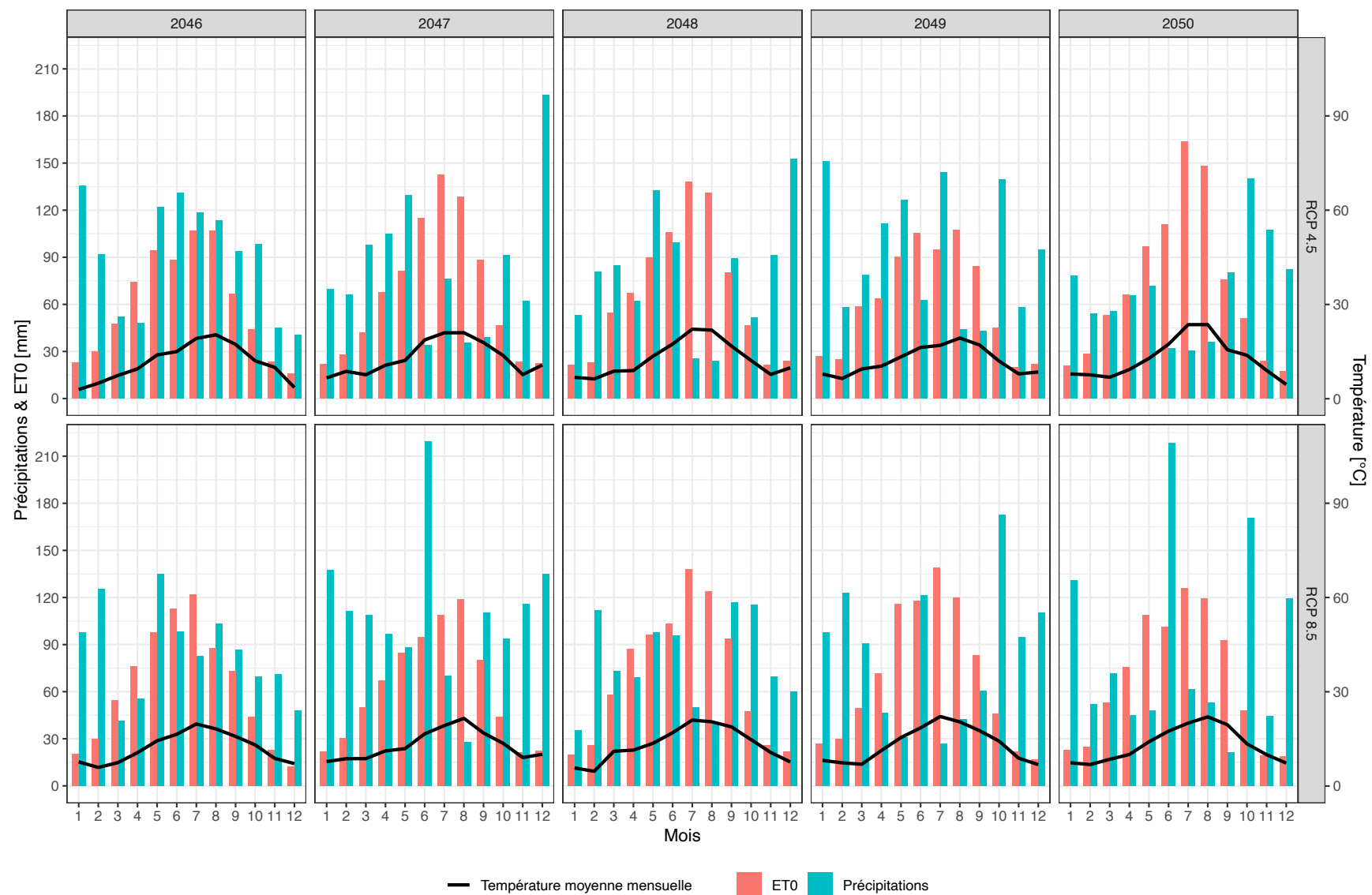


FIGURE 6.16 – Diagrammes ombrothermiques des années 2046 à 2050 pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5.

TABLE 6.12 – FTSW moyen de la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre pour les scenarii RCP 4.5 et 8.5 entre 2047 et 2050.

Fosse	Scenario	Moyenne	Etendue	2047	2048	2049	2050
F1	rcp45	0.601	0.254	0.529	0.612	0.759	0.505
	rcp85	0.669	0.265	0.801	0.657	0.536	0.680
F2	rcp45	0.629	0.315	0.579	0.642	0.804	0.489
	rcp85	0.676	0.271	0.807	0.658	0.536	0.705
F3	rcp45	0.670	0.304	0.627	0.689	0.834	0.530
	rcp85	0.716	0.252	0.837	0.695	0.585	0.748

Les diagrammes ombrothermiques pour les années 2046 à 2050 permettent de visualiser la répartition de la pluviométrie au cours de l'année pour les deux scenarii climatiques retenus (Figure 6.16). Pour le scénario RCP 4.5, la pluviométrie est principalement répartie sur les mois d'hiver et du début du printemps, et à partir du mois de juin sont plus faibles jusqu'au mois d'octobre. L'été constitue une saison qui n'est pas vraiment sèche avec au minimum 30 mm de pluie par mois. On observe une forte variabilité de la pluviométrie : l'année 2046 apparaît comme une année très atypique avec des précipitations concentrées entre le mois de mai et d'octobre (entre 90 et 130 mm par mois). Le scénario RCP 8.5 montre une répartition des précipitations dans l'année encore plus variable avec par exemple des mois très pluvieux (plus de 210 mm) sur les années 2047 et 2050.

6.4.2 Résultats

La Figure 6.17 présente les variations d'eau transpirable pour la vigne (ATSW) au cours des 4 années consécutives de simulations avec BISWAT sur les projections climatiques des scenarii RCP 4.5 et 8.5. Les valeurs maximales d'ATSW sont bornées par la TTSW de chacune des SFU qui est la même que pour les simulations sur l'année 2018, car les paramètres de sol n'ont pas changé. On observe que l'ATSW atteint son maximum chaque année pendant la période hivernale. Elle diminue à la fin du printemps pour arriver à son minimum en fin d'été avec une ampleur qui dépend de l'année et de la SFU. Pour le scénario RCP 4.5, on remarque que la simulation sur 2049 montre une faible diminution de l'ATSW au cours de l'été, avec des valeurs qui n'atteignent pas le seuil de stress (FTSW = 0,4) pour F2 et F3. De même pour le scénario RCP 8.5, lors de la simulation sur 2047, la diminution d'ATSW est de faible ampleur et de courte durée par rapport aux années suivantes.

La Table 6.12 présente les valeurs moyennes de FTSW simulées entre le 1^{er} Avril et le 31 Octobre pour les différentes SFU, années et scenarii climatiques. Les FTSW simulées sont relativement variables d'une année à l'autre et d'un scénario à l'autre : l'étendue des FTSW moyens est entre 0,252 et 0,315. Sur les quatre années simulées, la moyenne des FTSW moyens est systématiquement plus faible pour F1 et plus forte pour F3, pour le RCP 4.5 et 8.5. De plus, quelle que soit la SFU, la moyenne des FTSW moyen est

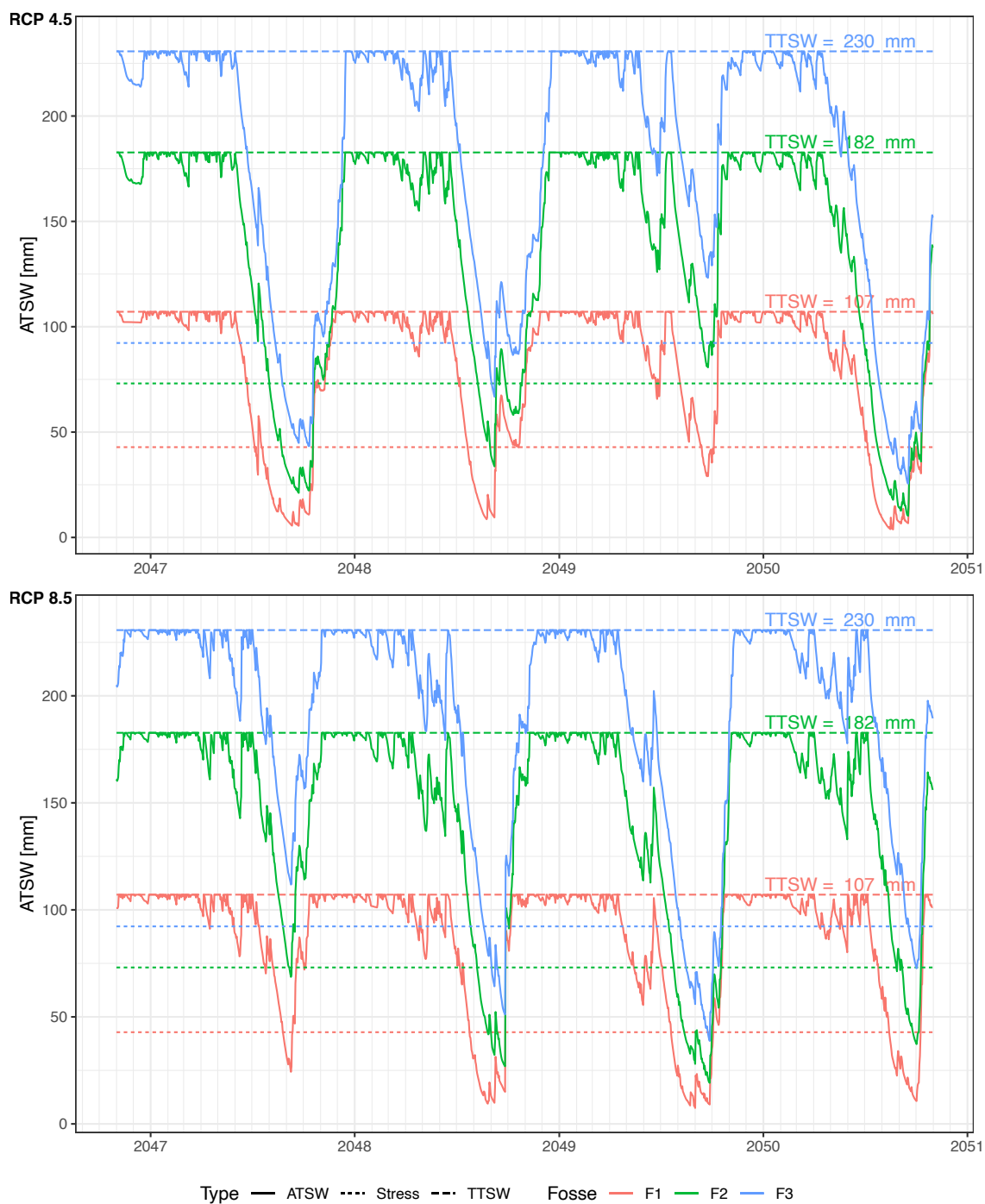


FIGURE 6.17 – Simulation de l'eau disponible pour la vigne (ATSW) pour F1, F2 et F3 pour les projections des années 2047 à 2050 selon les scénarii RCP 4.5 et 8.5.

TABLE 6.13 – Nombre de jours de stress ($FTSW < 0,4$) subi par la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre.

Fosse	Scenariio	Moyenne	Etendue	2047	2048	2049	2050
F1	rcp45	66.5	75	97	52	22	95
	rcp85	53.2	59	17	64	76	56
F2	rcp45	59.5	95	80	63	0	95
	rcp85	44.2	80	5	51	85	36
F3	rcp45	48.5	89	69	36	0	89
	rcp85	33.0	73	0	39	73	20

TABLE 6.14 – Premier jour d'apparition de stress ($FTSW < 0,4$) subi par la vigne pour les différentes fosses et modalité entre le 1er Avril et le 31 Octobre.

Fosse	Scénario	Moyenne	2047	2048	2049	2050
F1	rcp45	27 jul	07 jul	21 jul	13 sep	07 jul
	rcp85	06 aoû	26 aoû	25 jul	20 jul	15 aoû
F2	rcp45	28 jul	02 aoû	09 aoû		11 jul
	rcp85	16 aoû	06 sep	07 aoû	25 jul	27 aoû
F3	rcp45	07 aoû	13 aoû	21 aoû		19 jul
	rcp85	25 aoû		19 aoû	06 aoû	19 sep

systématiquement plus élevée pour le RCP 8.5 que le RCP 4.5. Pour les deux scenarii, les étendues de FTSW moyen montrent la plus forte variabilité simulée pour F2 et la plus faible pour F1.

La Table 6.13 montre le nombre de jours de stress simulé subi par la vigne entre le 1^{er} Avril et le 31 Octobre. La SFU F1 présente systématiquement un plus grand nombre de jours de stress que F2, alors que F3 est le site qui en possède systématiquement le moins. En moyenne, le scénario RCP 4.5 conduit à un plus grand nombre de jours de stress que le RCP 8.5. Pour les deux scenarii, les étendues du nombre de jours de stress montrent la plus forte variabilité pour F2 et la plus faible pour F1.

La Table 6.14 indique la date d'apparition du premier jour de stress simulé pour chaque SFU et chaque scénario climatique. Pour les deux scenarii climatiques, le stress hydrique apparaît toujours le plus précocement pour F1 et le plus tardivement pour F3. Pour les trois SFU, le stress apparaît en moyenne plus tôt pour le RCP 4.5 que pour le RCP 8.5.

La Figure 6.19 présente les itinéraires hydriques simulés pour les trois SFU sur les deux scenarii climatiques. Les courbes de FTSW sont superposées avec la cible d'itinéraire optimal utilisé précédemment sur la simulation de l'année 2018. La Table 6.15 présente pour chaque combinaison la proportion de jours dans la cible entre le 1^{er} Avril et le 31 Octobre. En moyenne, F2 obtient un meilleur score par rapport aux deux autres SFU.

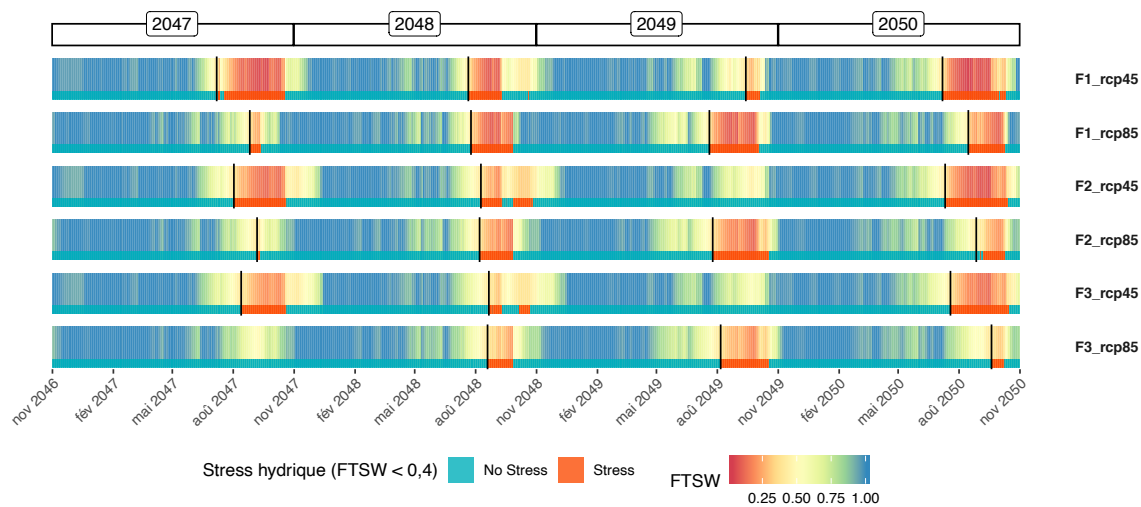


FIGURE 6.18 – Variation du FTSW de Novembre 2046 à Novembre 2050 pour les simulations RCP 4.5 et 8.5.

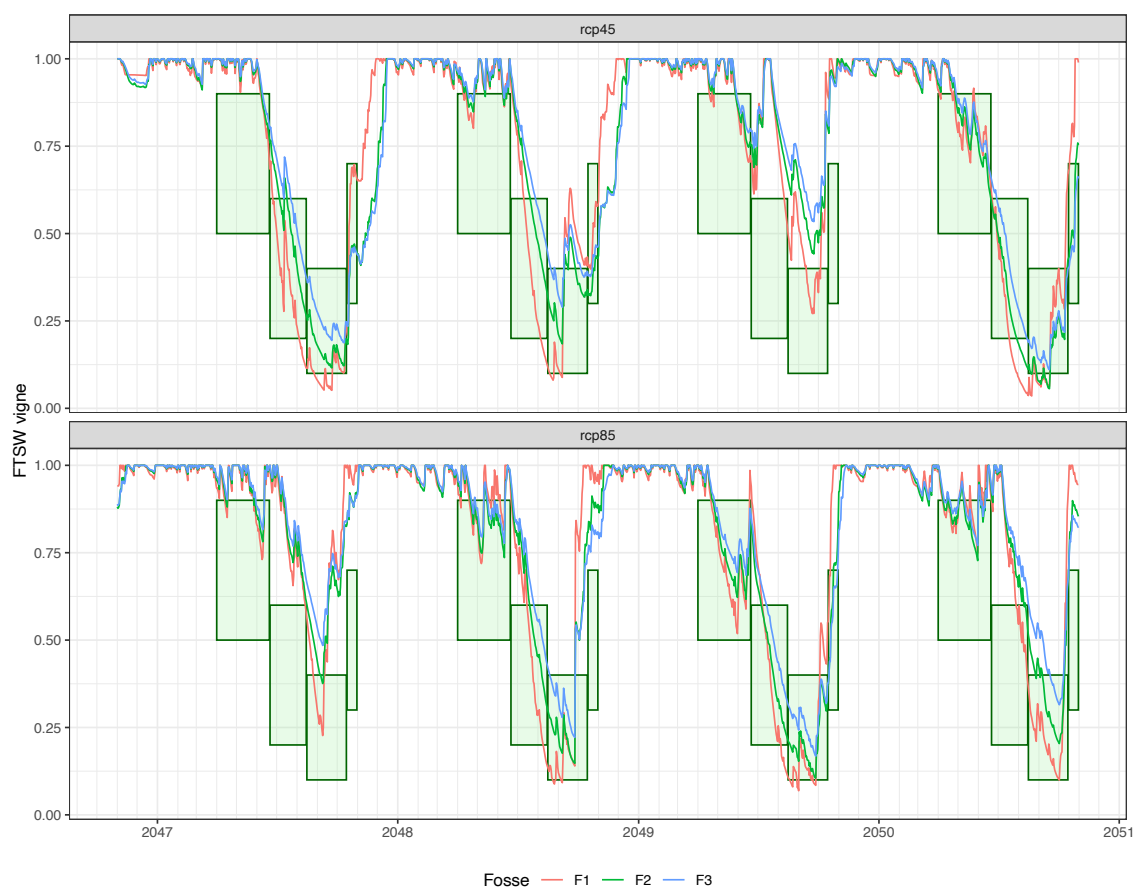


FIGURE 6.19 – Comparaison des simulations de FTSW de la vigne entre 2047 et 2050 pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5. En vert, la cible d'itinéraire hydrique optimal visé.

TABLE 6.15 – Pourcentage de jours dans la cible de FTSW pour la vigne entre le 1er Avril et le 31 Octobre pour les scenarii RCP 4.5 et 8.5 entre 2047 et 2050.

Fosse	Scenario	Moyenne	Etendue	2047	2048	2049	2050
F1	rcp45	40.8%	27.6%	47.7%	35.5%	26.2%	53.7%
	rcp85	43.7%	41.6%	17.8%	43.9%	59.3%	53.7%
F2	rcp45	46.3%	55.6%	57.5%	48.6%	11.7%	67.3%
	rcp85	46.8%	67.3%	10.7%	54.7%	78.0%	43.9%
F3	rcp45	44.5%	72.0%	50.9%	34.6%	10.3%	82.2%
	rcp85	40.8%	71.0%	6.1%	49.1%	77.1%	30.8%

Cependant les valeurs moyennes de score sont relativement proches (en 40 et 47 %) et le détail présente une forte variabilité inter-annuelle : les simulations sur F3 montrent les plus forts écarts de score pour les deux scenarii (plus de 70 %), alors qu'ils sont les plus faibles pour F1.

6.5 Discussion

6.5.1 Sur les forces et faiblesses du modèle BISWAT

Ce travail de recherche a pour objectif d'appréhender la durabilité et l'adaptabilité de vignobles face aux changements globaux. L'hypothèse fondatrice est qu'une connaissance approfondie des sols et de leur géométrie constitue un élément-clé pour progresser vers cet objectif. Le modèle BISWAT permet d'intégrer une description fine du sol à travers la prise en compte de la géométrie des horizons et des volumes racinaires prospectés par les deux plantes considérées. Le résultat principal du modèle, la fraction d'eau transpirable par la vigne (FTSW), est une variable d'intérêt pour le viticulteur, car il est directement lié au statut hydrique de la vigne (*i.e.* SWEP, Pellegrino et al., 2006).

L'outil de modélisation permet de s'affranchir de mesures systématiques (dans l'espace et le temps) en même temps qu'il permet d'obtenir des informations à fort potentiel de transposition. La notion de SFU présentée dans les chapitres précédents apparaît alors comme une bonne clé de transposition des résultats de modélisation.

Le modèle BISWAT présente également l'avantage de pouvoir simuler des trajectoires hydriques en prenant en compte deux espèces végétales, dont un potentiel enherbement dans l'inter-rang dans le cas de la viticulture. L'utilisation de BISWAT constitue donc un outil pour la gestion adaptative des vignobles en ouvrant la possibilité d'anticiper l'effet de l'enherbement sur l'itinéraire hydrique de la vigne en cours d'année culturale.

Enfin, l'intérêt d'un tel modèle à base physique est de permettre de disposer de simulations prospectives basées sur une évolution probable du climat. A titre illustratif, BISWAT a pu être utilisé pour simuler les effets des scenarii climatiques proposés par le GIEC sur le vignoble actuel. Dès lors que l'effort de paramétrisation a été fait sur un site d'étude,

le temps d'intégration des scénarios climatiques est assez faible et le nombre potentiel de situations testées peut être important.

Ces atouts, le modèle BISWAT les doit essentiellement au fait que son application repose sur l'utilisation de paramètres potentiellement tous mesurables ou facilement estimables à partir d'expertises largement partagées. La mise en oeuvre de BISWAT sur le site d'étude de Capet-Guillier a montré que c'était possible au prix toutefois d'une analyse approfondie du système viticole et notamment une description fine des sols dans les trois dimensions. Cet effort de récolte et d'analyse de données ne doit être sous-estimé afin de renseigner l'ensemble des paramètres requis (cf. Table 6.1).

Le modèle BISWAT est fondé sur des équations physiques et une description directe du milieu, il a donc été par principe utilisé dans ce travail sans phase de calage. La validation s'est opérée par un contrôle de cohérence des résultats et une expertise issue d'observation *in situ*. En particulier, le contrôle de cohérence apporté par la comparaison des flux de drainage simulés et de variations de piézométriques se sont avérée novatrice et concluantes.

Toutefois, il apparaît un point faible dans la représentation des processus lié à la capacité des plantes à extraire l'eau du sol. Dans la plupart des modèles de bilan hydrique, cette capacité est bornée par une humidité caractéristique, le plus souvent prise comme l'humidité du sol à pF 4,2. Dans le modèle BISWAT, cette valeur seuil peut être modulée par le paramètre α . Or ce paramètre n'est aujourd'hui pas facile à renseigner et semble nécessiter un calage en fonction de conditions locales. Les résultats de l'analyse de sensibilité effectuée sur ce paramètre ont montré que dans le cas de notre site d'étude une valeur de 1 était préférable à une valeur de 1,4 rapportée par d'autres auteurs des sites différents. Dans la mesure où ce paramètre est en partie lié au matériel végétal et la capacité des porte-greffes à prélever l'eau du sol, un plus large partage d'expérience de modélisation serait à opérer pour faire progresser l'expertise. En attendant cet effort, un minimum de mesure du statut hydrique de la vigne serait à réaliser en vue d'une application opérationnelle du modèle.

Enfin, si le modèle BISWAT offre une des meilleures représentations du sol parmi les modèles de bilan hydrique existant, il ne représente pas l'ensemble des processus de transfert d'eau. Les remontées capillaires à partir d'un niveau saturé ne sont représentées. Elles peuvent être négligées dans de nombreux cas, mais pas forcément dans tous, notamment dans des contextes de sols argileux profonds comme ceux de la SFU (F3). De même les flux latéraux de versant dans le sol ne constituent pas de conditions aux limites du profil modélisé. Dans certaines conditions géomorphologiques, il pourrait être pertinent d'intégrer ce processus. Les variations de niveau piézométrique en F3 comparées aux flux de drainage semblent indiquer l'existence de ce processus en fin de période humide.

6.5.2 Sur les résultats de modélisation obtenus

L'ambition de ce chapitre exploratoire est d'évaluer le potentiel de la modélisation, à l'aide d'un outil tel que BISWAT, à fournir des éléments pour l'analyse de la durabilité et de l'adaptabilité des vignobles du point de vue de la ressource en eau. En particulier, pour des sols dont les propriétés seraient fixées, il s'agit donc de s'interroger sur la capacité de

ces sols à garantir des conditions de production données en fonction de différents forçages climatiques et des modulations permises par les modalités d'entretien du sol. A titre illustratif sont présentés quelques éléments issus des simulations effectuées sur l'année 2017-2018 et pour les scénarios climatiques.

Les résultats des simulations sur l'année 2018 montrent que F1 présente des conditions hydriques plus contraignantes que F2, elles-mêmes plus contraignantes que F3 (Table 6.6 et Figure 6.14) : durant la saison, l'apparition du stress hydrique est plus précoce pour F1 et ce stress est maintenu pendant un plus grand nombre de jours. Lors des simulations réalisées sur 2018, la présence d'un enherbement maintenu pendant toute la saison (modalité 02), contribue à diminuer la FTSW de la vigne au cours de la saison sans modifier l'ordre de contrainte hydrique entre les SFU. Sur cette année climatique particulière, l'effet du sol sur le stress hydrique est donc prépondérant sur l'effet pratique.

La redistribution des eaux de surface au sein des parcelles qui a été intégrée en contexte de relief marqué n'a pas semblé avoir d'impact sur les teneurs en eau du sol et les trajectoires hydriques de la vigne simulées. Pour le site d'étude les circulations latérales dans le sol en condition de pente (F3) semblent plus importantes à considérer. Ces deux points sont toutefois à replacer dans le cadre climatique de 2007-2008 avec une pluviométrie importante répartie sur toute l'année.

Lorsque l'on compare les scénarii climatiques RCP 4.5 et 8.5 pour les années 2046 à 2050 (Tables 6.10 et 6.11) avec les données actuelles mesurées sur le site d'étude (Table 6.5), les projections climatiques montrent une augmentation des précipitations annuelles totales, et une diminution de l'évapotranspiration potentielle annuelle totale et de la température moyenne annuelle. De plus, les diagrammes ombrothermiques des projections climatiques (Figure 6.16) montrent une forte variabilité inter-annuelle de la répartition des précipitations au cours de l'année. Dans ces conditions, les résultats des simulations BISWAT à partir de ces scénarii climatiques présentent des valeurs de FTSW moyennes plus élevées que sur 2018. La forte variabilité inter-annuelle des précipitations influence toutefois fortement les trajectoires hydriques simulées au cours des saisons culturales. Certaines années montrent même une absence de stress hydrique pour F2 et F3. Les FTSW moyennes (Table 6.12) et le nombre de jours de stress (Table 6.13) semblent montrer une réponse de FTSW la moins variable pour F1 et la plus variable pour F3. Dans le même temps, en examinant le nombre de jours dans la cible en termes de trajectoire hydrique pour les 4 années de climat projeté, on note pour F3 les forts écarts entre la valeur minimale et maximale (10%, 6% et 82%, 71% pour respectivement RCP4.5 et RCP8.5). Cet exemple pourrait illustrer une intensification de l'effet millésime avec une plus grande fréquence de bonnes années.

6.6 Conclusion

Le modèle BISWAT (Bertrand et al., 2018) est récent dans le paysage des modèles de bilan hydrique des cultures. Son choix s'appuyait sur son formalisme à base physique et sa discrétisation de l'espace permettant de gérer deux couverts dans une parcelle et d'intégrer des données pédologiques dans la profondeur en respectant la notion d'horizon.

Ce modèle a été implémenté sur les SFU identifiées sur le site de Capet-Guillier à l'aide des données récoltées et analysées aux chapitres précédents. Les simulations ont été menées sur la période actuelle, 2017-2018, et sur un futur scénarisé par le GIEC (2046-2050, CORDEX RCA4 RCP 4.5 et RCP 8.5). L'application sur le passé récent a permis d'effectuer un bon contrôle de cohérence du modèle et l'application à partir de scénarios climatiques a permis un premier regard vers les évolutions possibles des trajectoires hydriques futures des vignobles bordelais.

L'outil de modélisation s'est avéré performant et quelques pistes d'amélioration ont pu être proposées pour son évolution et son utilisation future. Une démarche d'utilisation de la modélisation ainsi que quelques indicateurs destinés à comparer les résultats simulés ont été proposés. L'exploration d'un ensemble de possibilités climatiques et de pratiques constitue une perspective prometteuse pour enrichir les réflexions sur la durabilité/adaptabilité des vignobles.

Chapitre 7

Conclusion générale

L'alimentation hydrique et minérale de la vigne est un facteur prépondérant de la qualité du vin (White, 2003). Pourtant, d'une part ces deux besoins sont souvent abordés de manière différenciée, alors qu'ils sont couplés sur une entrée processus, et d'autre part cette alimentation est considérée à partir d'un réservoir sol homogène, alors que dans bien des cas le sol est constitué d'horizons différenciés. C'est pourquoi il est nécessaire de produire des connaissances sur les relations entre les facteurs pédoclimatiques et la production au vignoble.

Dans le Chapitre 4, les résultats montrent que les meilleures qualités de vin ont été observées dans des conditions pour lesquelles la prospection racinaire soit la capacité intrinsèque de prélèvements en eau et en éléments nutritifs, n'est pas limitée. Les facteurs explicatifs de cette concordance résident dans les interactions du sol, de l'eau et des racines au cours du temps (Figure 7.1). Les conditions contraignantes qui ont été mises en évidence sont essentiellement liées soit à la nature du matériau géologique sous-jacent, soit à l'hydromorphie profonde, c'est-à-dire les remontées de la zone saturée du sol. Dans Fayolle et al. (2019) et le Chapitre 4, nous proposons le concept d'unité pédofonctionnelle (SFU) afin de répondre à ce besoin de caractériser le sol et la capacité de la vigne à s'alimenter grâce à lui. Ces résultats impliquent que les interactions sol-racine en profondeur doivent être plus étudiées afin de mieux comprendre le lien entre les facteurs de qualité du vin et les conditions d'alimentation hydrique et minérale de la vigne. L'observation et la quantification de la zone racinaire restent aujourd'hui un verrou majeur dans la compréhension de l'alimentation, car ces mesures sont intrusives et coûteuses en temps et en énergie. Observer la structure racinaire d'un pied de vigne implique la plupart du temps le sacrifice du cep (Figure 7.1) limitant ainsi la multiplication des observations.

Les mesures de résistivité électrique (Chapitre 5) permettent l'acquisition de données à haute densité spatiale. Cependant cette technique géophysique ne permet pas de se passer d'une prospection pédologique classique pour une analyse typologique des sols. Un verrou majeur dans l'utilisation des données acquises avec le MUCEP est l'impossibilité d'inverser les résistivités apparentes en résistivités vraies avec seulement trois écartements d'électrodes. Cependant le potentiel proposé par ce type de mesure est intéressant, car les données de résistivité obtenues sont spatialement pseudo-continues et sont en lien avec deux types de paramètres du sol : intrinsèque (type de matériaux, granulométrie, etc.)



FIGURE 7.1 – Système racinaire d'un pied de vigne au Château Capet-Guillier lors de l'ouverture d'une fosse pédologique dans SFU-1.



FIGURE 7.2 – Acquisition de la résistivité électrique avec le MUCEP dans une parcelle de jeunes vignes au Château Capet-Guillier.

et d'état (teneur en eau, matière organique, etc.). Les mesures de résistivité électrique apparentes faites à Capet-Guillier montrent une bonne cohérence avec la carte de sol et particulièrement avec les SFU. Cette complémentarité avec l'approche pédologique dite classique constitue un appui intéressant pour diminuer l'effort de prospection et améliorer les limites des plages cartographiques. La tomographie par résistivité électrique (ERT) apporte un complément intéressant aux mesures du MUCEP. Cette technique présente l'avantage majeur d'obtenir des valeurs de résistivité vraie à une profondeur réelle après inversion. Offrant ainsi une visualisation de la géométrie verticale du sol à travers l'interprétation des valeurs de résistivité. Cependant le temps d'acquisition limite fortement l'étendue spatiale prospecté par rapport au MUCEP. Ces deux techniques basées sur la résistivité électrique apparaissent donc complémentaires : les mesures MUCEP permettant une caractérisation spatiale de la variabilité du sol, et l'ERT une caractérisation verticale du sol et de l'eau. En outre, les récents travaux sur les mesures de résistivité électriques ouvrent la perspective d'améliorer les connaissances de la zone racinaire de la vigne (Mary et al., 2018, ; Brillante et al., 2016, ; Brillante et al., 2014) et la disponibilité des nutriments du sols (Peruzzo et al., 2018) dont l'intérêt a été mis en avant dans le Chapitre 4.

Le modèle BISWAT (Bertrand et al., 2018) a été mis à profit sur la base de la définition des SFU afin de simuler de manière dynamique la trajectoire hydrique de la vigne. Cet outil permet en effet de simuler l'état hydrique de la vigne, au sein d'un couvert bi-spécifique, sous un forçage climatique, en intégrant la connaissance détaillée des paramètres de sol, en prenant en compte les différents horizons (Figure 7.3) et l'architecture du système racinaire. L'utilisation de ce modèle permet de tester l'influence d'itinéraire technique sur le fonctionnement de la vigne, tel que les itinéraires d'enherbement pour piloter la contrainte hydrique au cours de la saison. BISWAT a permis de tester l'influence du maintien ou non de l'enherbement dans l'inter-rang au cours de la saison sur la chronologie d'apparition du stress hydrique. Il a également permis de comparer les trois SFU définies dans le Chapitre 4 en considérant l'impact du maintien de l'enherbement dans chaque cas. Enfin, à titre démonstratif, les simulations ont été réalisées à partir de projections climatiques. Les premiers résultats montrent qu'il faut s'attendre à ce que les modifications du climat à venir aient un impact significatif sur les contraintes hydriques et qu'il sera nécessaire d'anticiper pour maintenir des conditions de production favorables. BISWAT apparaît donc comme une perspective intéressante pour tester des leviers d'adaptation face aux changements à venir, que ce soit des changements climatiques, de pratiques et des changements couplés.

L'une des limites de BISWAT pour son intégration à l'échelle d'un ensemble de parcelles ou d'une exploitation est le caractère local de ce modèle. En effet, afin d'intégrer une variabilité des sols, nous l'avons appliqué sur plusieurs sites de modélisation, faisant ainsi une application "multi-locale". Nous avons également montré qu'en réalisant des simulations en cascade, les écoulements de surface pouvaient également être pris en compte. La valorisation des données de résistivité électrique pour estimer la variabilité spatiale de paramètres de sol ouvre la perspective d'une modélisation spatialisée.

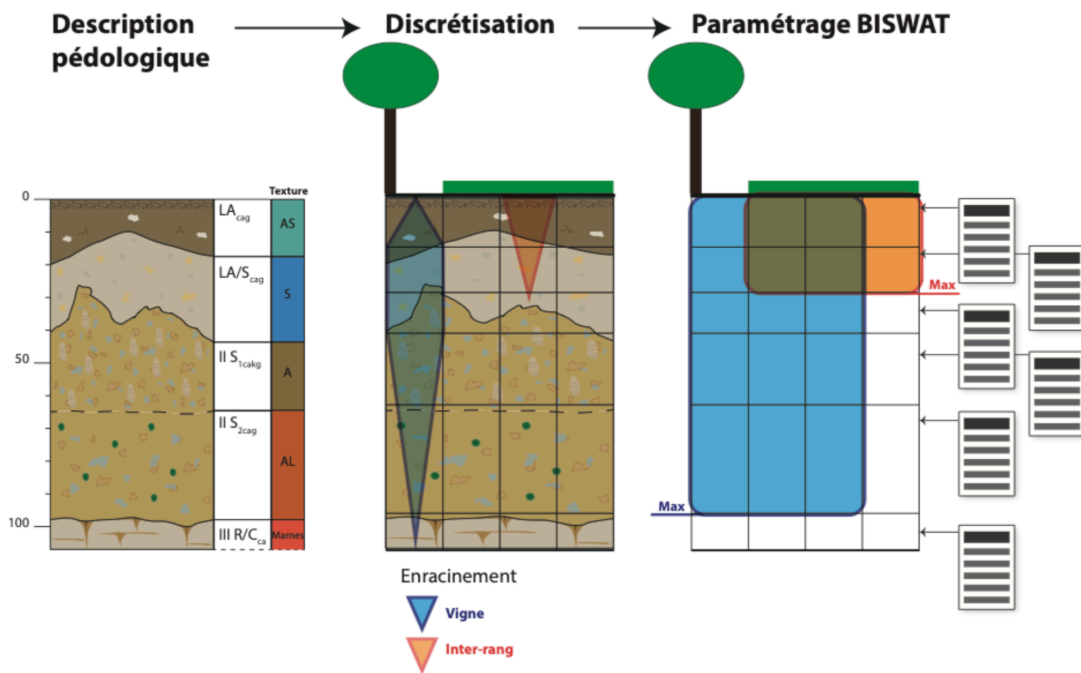


FIGURE 7.3 – Discretisation des données pédologiques pour la paramétrisation du modèle BISWAT.

Le contexte CIFRE au cours de ce travail de thèse a permis un dialogue direct avec les vignerons sur chacun des sites d'étude. Ces discussions ont mis en avant la place importante de l'empirisme et des retours d'expérience sur les choix techniques au vignoble. Cependant les responsables techniques sont demandeurs d'outils d'aide à la décision pour guider leurs choix. Dans un contexte de changement climatique (et/ou de pratique), il est nécessaire de produire des éléments d'aide à la décision pour engager les adaptations du système de production aux changements futurs.

Annexe A

Carte des sols du Château Patache d'Aux

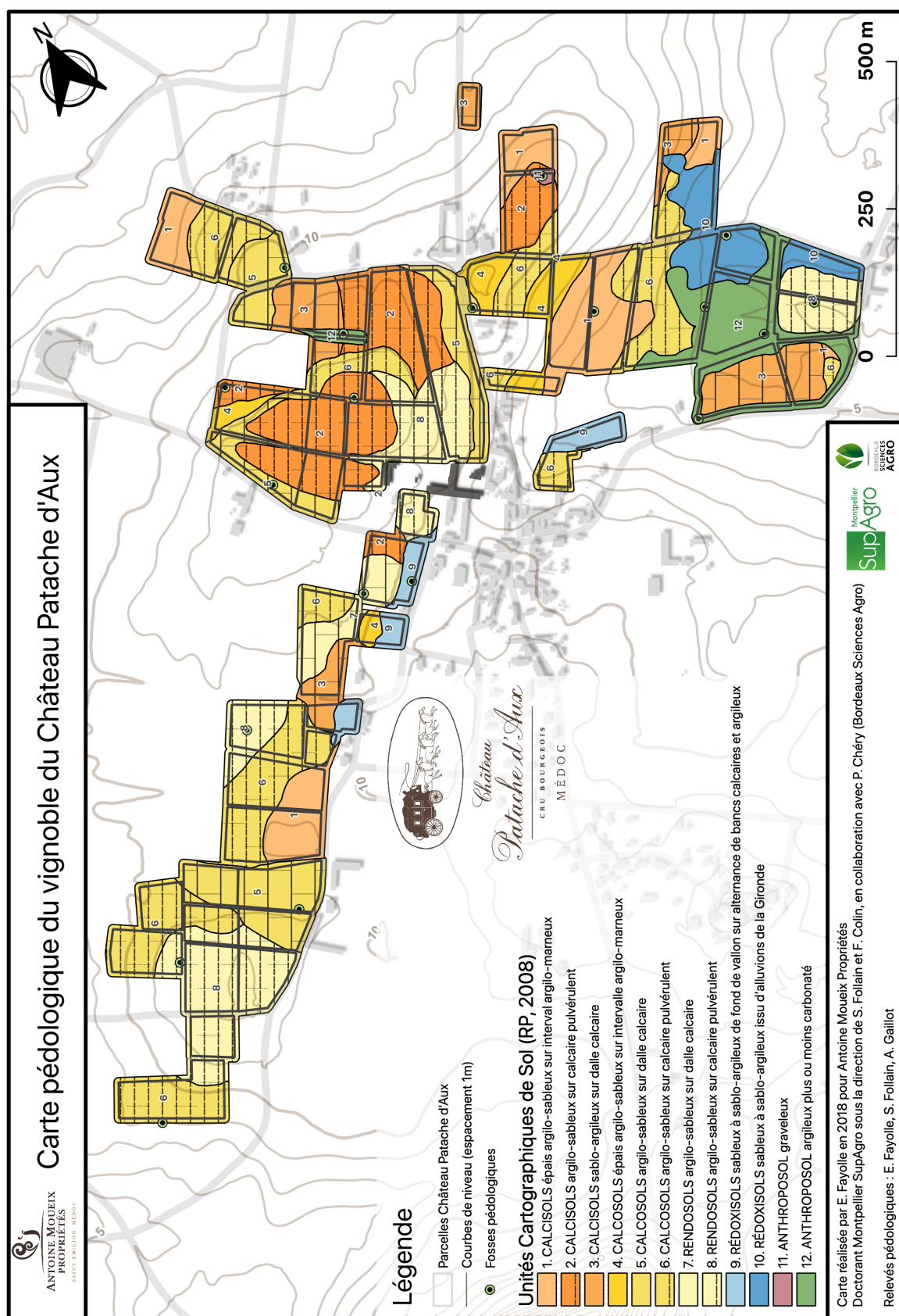


FIGURE A.1 – Carte pédologique du Château Patache d'Aux, réalisée à l'échelle 1/2 500^{ème}.

Annexe B

Résultats du MUCEP au Château Patache d'Aux

Pour des raisons techniques, la paire d'électrodes de mesures correspondant à la voie 2 n'a pas pu être installée sur l'enjambeur du Château Patache d'Aux. Cette contrainte limite donc les mesures aux voies 1 et 3.

De même que pour les mesures réalisées à Capet-Guillier, il a été nécessaire d'écarter les valeurs abérantes correspondant à de mauvais contacts entre le sol et les électrodes. Pour cela nous avons utilisé la même méthode que sur l'autre site d'étude : pour chaque voie, les valeurs supérieures au percentile 98 ont été écartés (Figure B.1).

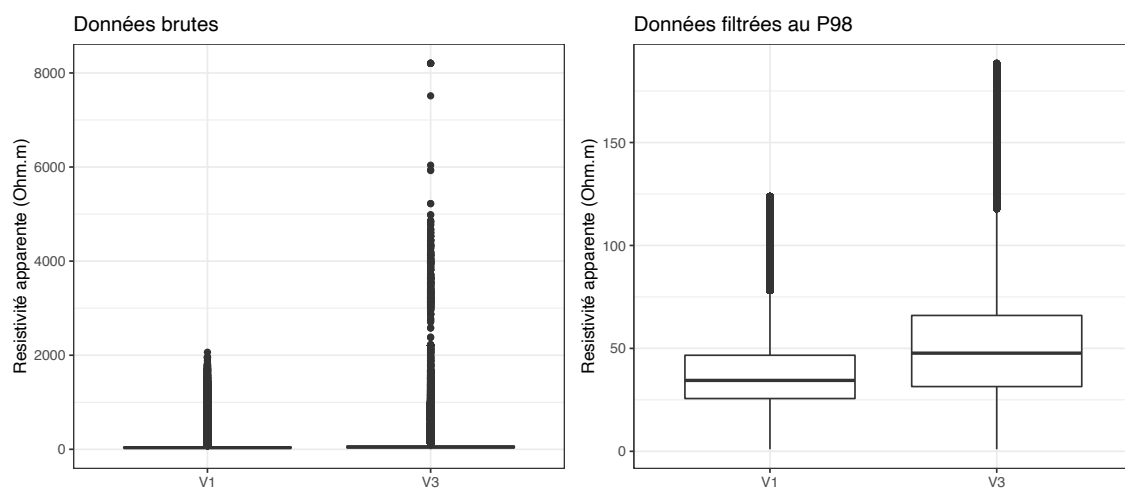


FIGURE B.1 – Distribution des valeurs de résistivités apparentes mesurées avec le MUCEP à Patache d'Aux. Comparaison des données brutes avec les données filtrées au percentile 98.

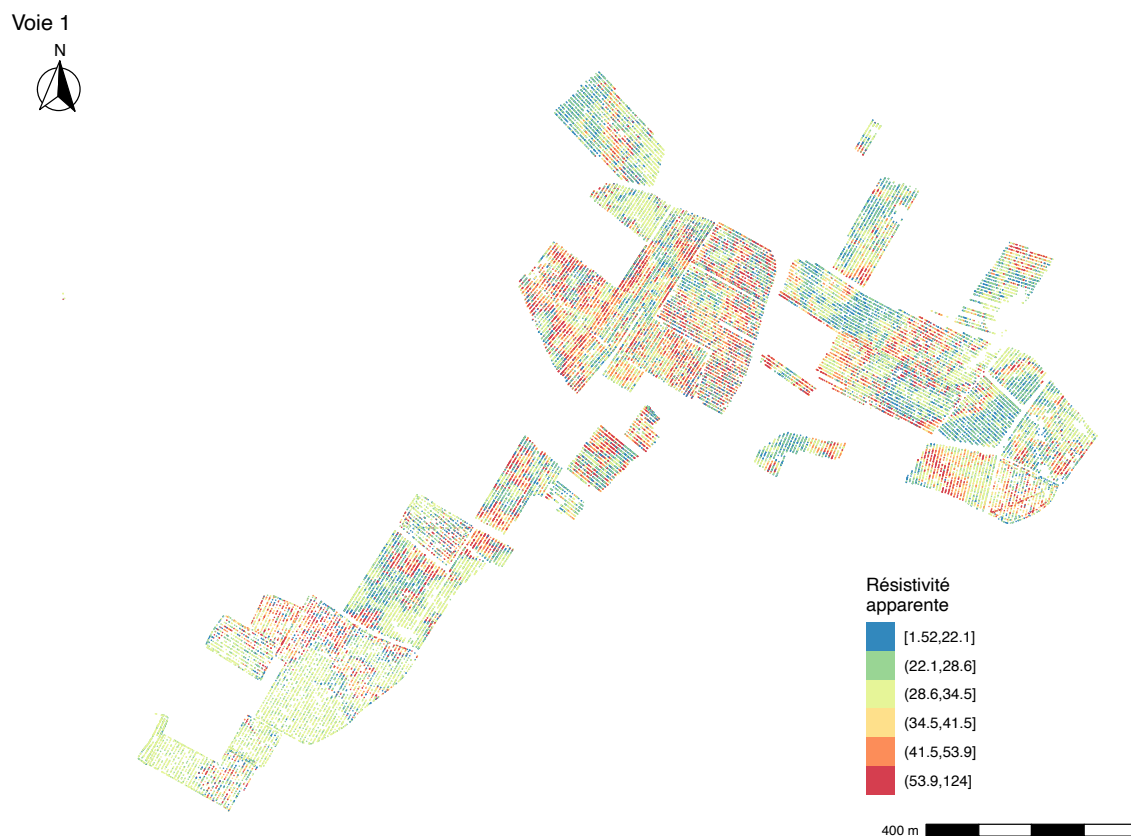


FIGURE B.2 – Cartogramme des résistivités apparentes mesurées avec la Voie 1 du MUCEP à Patache d'Aux.

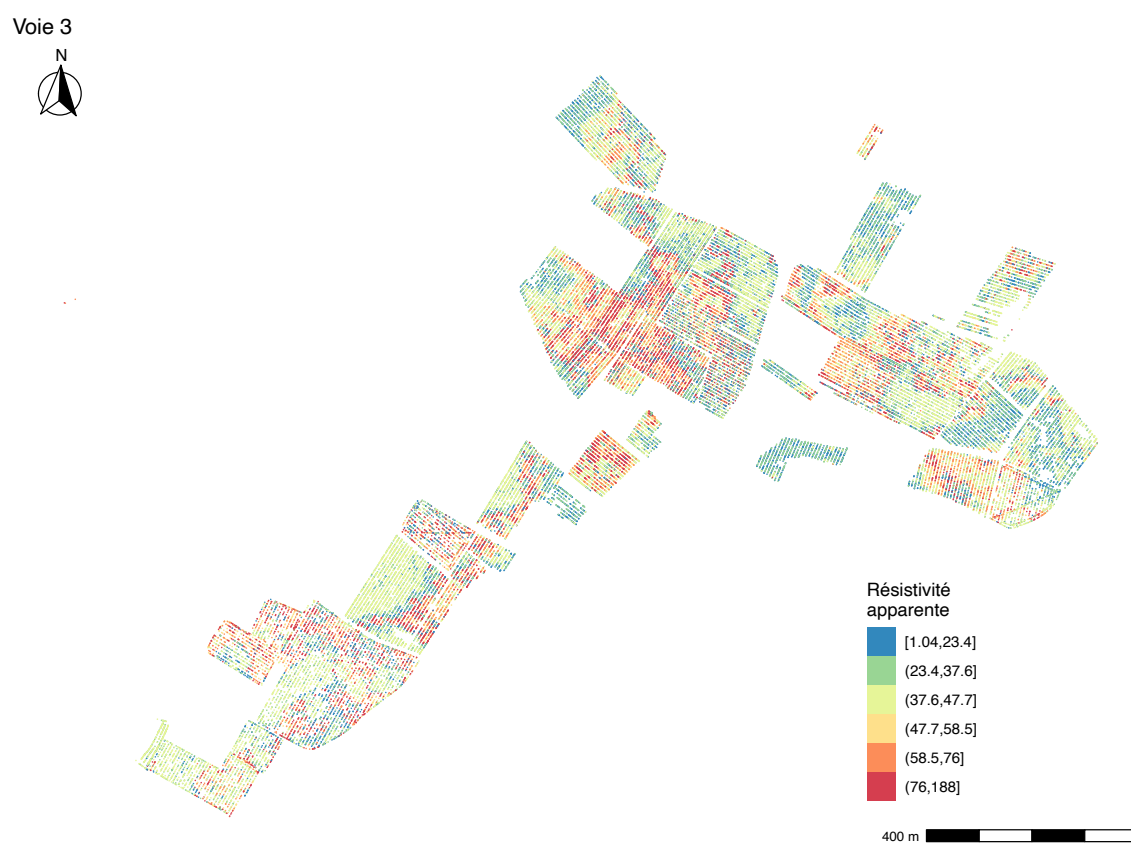


FIGURE B.3 – Cartogramme des résistivités apparentes mesurées avec la Voie 3 du MU-CEP à Patache d'Aux.

Bibliographie

- Agreste Aquitaine (2014). Mémento de la statistique agricole. Technical report, Direction Régionale de l' Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt. 00000.
- Agreste Aquitaine (2018). Mémento filière viti-vinicole. Technical report, Direction Régionale de l' Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt. 00000.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Technical Report 56, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 18077.
- André, F., van Leeuwen, C., Saussez, S., Van Durmen, R., Bogaert, P., Moghadas, D., de Rességuier, L., Delvaux, B., Vereecken, H., and Lambot, S. (2012). High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography. *Developments in GPR and near-surface seismics - New applications and strategies for data integration, inversion, and modeling*, 78 :113–122. 00061.
- Archer, E. and Saayman, D. (2018). *Vine Roots*. The Institute for Grape and Wine Sciences (IGWS), Stellenbosch. 00004.
- Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01) :54–62. 07193.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., and White, M. J. (2012). SWAT : Model use, calibration, and validation. page 20.
- Baciocco, K. A., Davis, R. E., and Jones, G. V. (2014). Climate and Bordeaux wine quality : Identifying the key factors that differentiate vintages based on consensus rankings. *Journal of Wine Research*, 25(2) :75–90. 00011.
- Baize, D. and Girard, M.-C. (2009). *Référentiel Pédologique 2008*. Quae. 00080.
- Balesdent, J. and Balabane, M. (1996). Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(9) :1261–1263. 00342.
- Barham, E. (2018). Translating terroir : The global challenge of French AOC labeling. pages 1–12. 00826.

- Bertrand, N., Roux, S., Forey, O., Guinet, M., and Wery, J. (2018). Simulating plant water stress dynamics in a wide range of bi-specific agrosystems in a region using the BISWAT model. *European Journal of Agronomy*, 99 :116–128. 00002.
- Blake, G. R. (2008). Particle density. In Chesworth, W., editor, *Encyclopedia of Soil Science*, pages 504–505. Springer Netherlands, Dordrecht. 00829.
- Blotevogel, S., Schreck, E., Laplanche, C., Besson, P., Saurin, N., Audry, S., Viers, J., and PrisciaOliva (2019). Soil chemistry and meteorological conditions influence the elemental profiles of West European wines. *Food Chemistry*, page 125033. 00000.
- Bocquier, G. (1971). Génèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad interprétation biogéodynamique. page 7.
- Bodin, F. (2003). *Contribution à l'étude Du Terroir Viticole En Anjou : Approche Utilisant Un Modèle de Terrain et Une Enquête Auprès Des Vignerons*. PhD thesis, Angers. 00009.
- Bohmrich, R. (1996). Terroir :competing perspectives on the roles of soil, climate and people. *Journal of Wine Research*, 7(1) :33–46.
- Bois, B., Van Leeuwen, C., Pieri, P., Gaudillère, J.-P., Saur, E., Joly, D., Wald, L., and Grimal, D. (2008). Viticultural agroclimatic cartography and zoning at mesoscale level using terrain information, remotely sensed data and weather station measurements. Case study of Bordeaux winegrowing area. In *Implications on Vine Development and Fruit Ripening*. Université Bordeaux, volume 1, page 9. 00009 ZSCC : NoCitation-Data[s0].
- Bonfante, A., Basile, A., Langella, G., Manna, P., and Terribile, F. (2011). A physically oriented approach to analysis and mapping of terroirs. *Geoderma*, 167-168 :103–117. 00039.
- Bonfante, A., Monaco, E., Langella, G., Mercogliano, P., Bucchignani, E., Manna, P., and Terribile, F. (2018). A dynamic viticultural zoning to explore the resilience of terroir concept under climate change. *Science of The Total Environment*, 624 :294–308. 00006.
- Bramley, R. G. V. (2005). Understanding variability in winegrape production systems 2. Within vineyard variation in quality over several vintages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11(1) :33–42. 00211.
- Bramley, R. G. V. and Hamilton, R. P. (2007). Terroir and precision viticulture : Are they compatible. 00055.
- Brillante, L., Bois, B., Lévêque, J., and Mathieu, O. (2016). Variations in soil-water use by grapevine according to plant water status and soil physical-chemical characteristics—A 3D spatio-temporal analysis. *European Journal of Agronomy*, 77 :122–135. 00010.
- Brillante, L., Bois, B., Mathieu, O., Bichet, V., Michot, D., and Lévêque, J. (2014). Monitoring soil volume wetness in heterogeneous soils by electrical resistivity. A field-based pedotransfer function. *Journal of Hydrology*, 516 :56–66. 00018.

- Bruand, A., Duval, O., and Cousin, I. (2004). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d'horizon, sa densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 11 :pp. 3, 323–334. 00000.
- Brunet, M.-F. (1984). Subsidence history of the Aquitaine basin determined from subsidence curves. *Geological Magazine*, 121(5) :421–428.
- Camps, J. O. and Ramos, M. C. (2012). Grape harvest and yield responses to inter-annual changes in temperature and precipitation in an area of north-east Spain with a Mediterranean climate. *International Journal of Biometeorology*, 56(5) :853–864. 00000.
- Carbonneau, A. (1986). Stress modérés sur feuillage induits par le système de conduite et régulation photosynthétique de la vigne. In *Symp. Physiologie de La Vigne, OIV, Bordeaux*, pages 378–385. 00000.
- Carbonneau, A. (2001). Concepts “terroir”. In *XIIèmes Journées Du GESCO*, pages 3–7, Montpellier.
- Celette, F., Ripoche, A., and Gary, C. (2010). WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association : The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management*, 97(11) :1749–1759. 00000.
- Chery, P. (1995). *Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol : conséquences pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de petite Beauce*. PhD thesis.
- Choné, X. (2001). *Contribution à l'étude Des Terroirs de Bordeaux : Étude Des Déficits Hydriques Modérés, de l'alimentation En Azote et de Leurs Effets Sur Le Potentiel Aromatique Des Raisins de Vitis Vinifera L. Cv. Sauvignon Blanc*. PhD. Thesis, Bordeaux 2. 00000.
- Choné, X., Dubourdieu, D., Van Leeuwen, C., and Tregoat, O. (2000). Déficit hydrique modéré de la vigne : Parmi les 3 applications de la chambre à pression, le potentiel tige est l'indicateur le plus précis. *Journal international des sciences de la vigne et du vin*, 34(4) :169–176. 00000.
- Clemmensen, K. E., Finlay, R. D., Dahlberg, A., Stenlid, J., Wardle, D. A., and Lindahl, B. D. (2015). Carbon sequestration is related to mycorrhizal fungal community shifts during long-term succession in boreal forests. *New Phytologist*, 205(4) :1525–1536. 00000.
- Clingeffer, P. (2014). Terroir : The Application of an Old Concept in Modern Viticulture. In Van Alfen, N., editor, *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems : VAN ALFEN - ENCYC OF AGRICULTURE AND FOOD SYSTEMS*, pages 277–288. Elsevier. 00000.
- Costantini, E. A., Castaldini, M., Diago, M. P., Giffard, B., Lagomarsino, A., Schroers, H.-J., Priori, S., Valboa, G., Agnelli, A. E., Akça, E., D'Avino, L., Fulchin, E., Gagnarli, E., Kiraz, M. E., Knapič, M., Pelengić, R., Pellegrini, S., Perria, R., Puccioni, S., Simoni, S., Tangolar, S., Tardaguila, J., Vignozzi, N., and Zombardo, A. (2018). Effects of

- soil erosion on agro-ecosystem services and soil functions : A multidisciplinary study in nineteen organically farmed European and Turkish vineyards. *Journal of Environmental Management*, 223 :614–624. 00000 ZSCC : NoCitationData[s0].
- Costantini, E. A. C., Agnelli, A. E., Fabiani, A., Gagnarli, E., Mocali, S., Priori, S., Simoni, S., and Valboa, G. (2015). Short-term recovery of soil physical, chemical, micro- and mesobiological functions in a new vineyard under organic farming. *SOIL*, 1(1) :443–457. 00000.
- Costantini, E. A. C., Barbetti, R., Fantappiè, M., L'Abate, G., Lorenzetti, R., and Magini, S. (2013). Pedodiversity. In Costantini, E. A. and Dazzi, C., editors, *The Soils of Italy*, pages 105–178. Springer Netherlands, Dordrecht. 00000.
- Costantini, E. A. C. and Bucelli, P. (2014). Soil and Terroir. In *Soil Security for Ecosystem Management*, pages 97–133. Springer, Cham, Cham. 00000.
- Courrèges, M. (1997). Le crypto-karst de la péninsule du Médoc. Crypto-altération, dissolution, karst sous-marin et évolution quaternaire [The covered karst of the Medoc peninsula. Crypto-alteration, dissolution, submarine karst and quaternary evolution.]. *Quaternaire*, 8(2) :289–304.
- Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A., and Ducomet, G. (1989). Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du sol*, 27(1) :65–68.
- Dane, J., Topp, G. C., Flint, A., and Flint, E. L. (2002). 2.2 Particle Density. In *Methods of Soil Analysis : Part 4 Physical Methods*, SSSSA Book Series, pages 229–240. 00000.
- de Bouïard, M. (1965). La mesure de la résistivité électrique des sols en archéologie. *Annales de Normandie*, 15(3) :461–477.
- De Jong, E. and Kowalchuk, T. E. (1995). The effect of shelterbelts on erosion and soil properties. *Soil Science*, 159(5) :337–345.
- Delfaud, J. (1970). *Résumé d'une Recherche Sur La Dynamique Du Domaine Aquitano-Pyrénéen Durant Le Jurassique et Le Crétacé Inférieur*. Société linnéenne de Bordeaux.
- Delfaud, J. (1971). Réflexions sur l'environnement jurassique : L'exemple des séries Périgord-Quercy. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., Sér. 3*, 13 :214–231.
- Deloire, A., Carbonneau, A., Wang, Z., and Ojeda, H. (2004). Vine and water : A short review. *OENO One*, 38(1) :1–13. 00000.
- Deloire, A., Vaudour, E., Carey, V. A., Bonnardot, V., and Van Leeuwen, C. (2005). Grapevine responses to terroir : A global approach. *OENO One*, 39(4) :149–162. 00000.
- Dercourt, J., Gaetani, M., and Vrielynck, B. (2000). *Atlas Peri-Tethys Palaeogeographical Maps*. CCGM.

- Dercourt, J., Ricou, L. E., and Vrielynck, B. (1993). *Atlas Tethys Palaeoenvironmental Maps : Explanatory Notes. Liste Des Articles, Communications, Cartes et Thèses. Programme GS-Téthys, 1986-1993*. Gauthier-Villars.
- Dry, P. and Loveys, B. (1998). Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 4(3) :140–148. 00000.
- Dry, P. R. (2016). Understanding the components of terroir. In *Proceedings of the 16th Australian Wine Industry Technical Conference : Adelaide, South Australia, 24–28 July*, volume 2017, pages 39–44. The Australian Wine Industry Technical Conference Inc. Glen Osmond, SA. 00000.
- Dubreuilh, J. (1987). *Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluviatiles tertiaires du nord du Bassin d'Aquitaine : passage aux formations palustres, lacustres et marines*. PhD thesis, Université Michel de Montaigne - Institut EGID, Bordeaux. OCLC : 489975229.
- Dubreuilh, J. (1995). Carte géologique n°804, Libourne. 00000.
- Dubreuilh, J., Marionnaud, J.-M., and Andreieff, P. (1973). Carte géologique n°754, Lesparre-Médoc – Foret du Junca. 00000.
- Duteau, J. and Seguin, G. (1977). Le vignoble des Côtes de Bourg. Les sols et le climat. Influence sur la croissance des sarments et sur la maturation du raisin. *OENO One*, 11(1) :1–50. 00000.
- Enjalbert, H. (1978). Les terroirs viticoles du Libournais : vue d'ensemble. *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée*, 2(1) :27–35.
- Falcetti, M. (1994). Le terroir. Qu'est-ce qu'un terroir ? Pourquoi l'étudier ? Pourquoi l'enseigner. *Bull. OIV*, 67(2) :246–275.
- Fayolle, E., Follain, S., Marchal, P., Chéry, P., and Colin, F. (2019). Identification of environmental factors controlling wine quality : A case study in Saint-Emilion Grand Cru appellation, France. *Science of The Total Environment*, page 133718.
- Fierer, N. (2017). Embracing the unknown : Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10) :579–590. 00000 ZSCC : 0000216.
- Follain, S. (2005). *Effet du réseau bocager sur l'organisation des sols. Redistributions des sols et stockage en carbone organique*. PhD thesis.
- Follain, S. (2015). *Géomorphologie Des Sols Cultivés. Des Modèles Dévolution à La Conservation Des Sols*. PhD thesis. 00000.
- Follain, S., Minasny, B., McBratney, A. B., and Walter, C. (2006). Simulation of soil thickness evolution in a complex agricultural landscape at fine spatial and temporal scales. *Geoderma*, 133(1-2) :71–86.

- Follain, S., Walter, C., Bonté, P., Marguerie, D., and Lefevre, I. (2009). A-horizon dynamics in a historical hedged landscape. *Geoderma*, 150(3-4) :334–343.
- Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., and Taya, N. (1999). The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology*, 54(1) :43–53.
- Gade, D. W. (2004). Tradition, Territory, and Terroir in French Viniculture : Cassis, France, and Appellation Contrôlée. *Annals of the Association of American Geographers*, 94(4) :848–867. 00000.
- Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoché, A., Valdés-Gómez, H., and Metay, A. (2018). Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards : A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251 :158–170. 00000.
- Garcia, M., Ibrahim, H., Gallego, P., and Puig, P. H. (2001). Effect of Three Rootstocks on Grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. Negrette, Grown Hydroponically. II. Acidity of Musts and Wines. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 22(2) :104–106. 00000.
- Geny, L. and Marchal, A. (2018). Le millésime 2018 à Bordeaux. Technical report, Institut des Sciences de la Vigne et du Vin de l'Université de Bordeaux, Unité de Recherche Œnologie.
- GIEC (2015). *Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC, Genève (Suisse). 00000 OCLC : 948289514.
- Griffiths, D. H. and Turnbull, J. (1985). A multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break*, 3(7) :16–20.
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P. A., and Hijmans, R. J. (2013). Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17) :6907–6912. 00000 ZSCC : 0000362.
- Hantzpergue, P. (1979). Biostratigraphie du Jurassique supérieur nord-aquitain. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(6) :715–725.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics : Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Elsevier, academic press edition. 00000.
- Huglin, P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes rendus des seances*. 00000.
- IPCC (2014). Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical report. 00000.

- IUSS Working Group WRB (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 : International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports 106, FAO, Rome. 00000.
- Jackson, D. I. and Lombard, P. B. (1993). Environmental and Management Practices Affecting Grape Composition and Wine Quality - A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44(4) :409–430. 00000.
- Jackson, P. D. (1975). An electrical resistivity method for evaluating the in-situ porosity of clean marine sands. *Marine Geotechnology*, 1(2) :91–115.
- Jahn, R., Blume, H. P., Asio, V. B., Spaargaren, O., and Schad, P. (2006). *Guidelines for Soil Description*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 4th ed edition. 00000.
- Jones, G. V. and Davis, R. E. (2000). Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. 51(3) :14. 00000.
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., and Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73(3) :319–343. 00000.
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting.
- Kodur, S. (2011). Effects of juice pH and potassium on juice and wine quality, and regulation of potassium in grapevines through rootstocks (*Vitis*) : A short review. *VITIS Journal of Grapevine Research*, 50 :1–6. 00000.
- Koefoed Otto (1979). *Geosounding Principles. 1. Resistivity Sounding Measurements*. Methods in Geochemistry and Geophysics 14A. Elsevier, Amsterdam.
- Kuzyakov, Y. and Domanski, G. (2000). Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(4) :421–431. 00000.
- Lacape, M. J., Wery, J., and Annerose, D. J. M. (1998). Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton *Gossypium hirsutum* L./ cultivars. page 15. 00000.
- Laville, P. (1993). Unités de terroir naturel et terroir. Une distinction nécessaire pour redonner plus de cohérence au système d'appellation d'origine. page 25.
- Lebon, E. (1993). *De l'influence Des Facteurs Pédologiques et Mésoclimatiques Sur Le Comportement de La Vigne et Les Caractéristiques Du Raisin : Application à l'établissement de Critères de Zonage Des Potentialités Qualitatives En Vignoble à Climat Semi-Continental (Alsace)*. Thesis, Dijon.
- Lebon, E. and Cortazar-Atauri, I. (2014). Dans un contexte de changement climatique, quels sont les impacts de la sécheresse sur la vigne et sur le devenir des vignobles ? L'exemple du Languedoc. 38 :1–12. 00000.

- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., and Schultz, H. R. (2003). Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, 30(6) :699.
- Loisy, C., Cohen, G., Laveuf, C., Le Roux, O., Delaplace, P., Magnier, C., Rouchon, V., Cerepi, A., and Garcia, B. (2013). The CO₂-Vadose Project : Dynamics of the natural CO₂ in a carbonate vadose zone. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 14 :97–112.
- Loke, M., Chambers, J., Rucker, D., Kuras, O., and Wilkinson, P. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95 :135–156. 00000.
- Lovelle, B. R., Trambouze, W., and Jacquet, O. (2009). Evaluation de l'état de croissance végétative de la vigne par la "méthode des apex". *Le Progrès agricole et viticole*, 126(4) :77–88.
- Mackenzie, D. and Christy, A. (2005). The role of soil chemistry in wine grape quality and sustainable soil management in vineyards. *Water Science and Technology*, 51(1) :27–37. 00000.
- Maltman, A. (2008). The Role of Vineyard Geology in Wine Typicity. *Journal of Wine Research*, 19(1) :1–17. 00000.
- Marciniak, M., Reynolds, A. G., and Brown, R. (2013). Influence of water status on sensory profiles of Ontario Riesling wines. *Food Research International*, 54(1) :881–891. 00000.
- Marionnaud, J.-M. and Dubreuilh, J. (1972). Carte géologique n°730, St-Vivien-de-Médoc – Soulac-sur-Mer. 00000.
- Mary, B., Peruzzo, L., Boaga, J., Schmutz, M., Wu, Y., Hubbard, S. S., and Cassiani, G. (2018). Small-scale characterization of vine plant root water uptake via 3-D electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10) :5427–5444.
- Matthews, M. A. (2016). *Terroir and Other Myths of Winegrowing*. Univ of California Press. 00000.
- Matthews, M. A. and Anderson, M. M. (1988). Fruit Ripening in *Vitis vinifera* L. : Responses to Seasonal Water Deficits. *American Journal of Enology and Viticulture*, 39(4) :313–320. 00000.
- Mendez-Millan, M., Dignac, M. F., Rumpel, C., Rasse, D. P., Bardoux, G., and Derenne, S. (2012). Contribution of maize root derived C to soil organic carbon throughout an agricultural soil profile assessed by compound specific ¹³C analysis. *Organic Geochemistry*, 42(12) :1502–1511. 00000.
- Mendez-Millan, M., Dignac, M. F., Rumpel, C., Rasse, D. P., and Derenne, S. (2010). Molecular dynamics of shoot vs. root biomarkers in an agricultural soil estimated by natural abundance ¹³C labelling. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(2) :169–177. 00000.

- Michot, D. (2003). *Intérêt de La Géophysique de Subsurface et de La Télédétection Multispectrale Pour La Cartographie Des Sols et Le Suivi de Leur Fonctionnement Hydrique à l'échelle Intraparcellaire*. PhD thesis, Paris 6. 00000.
- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., and Tabbagh, A. (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 39(5). 00000.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2017a). Cahier des charges de l'appellation d'origine contrôlée « SAINT-EMILION GRAND CRU ». 00000.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2017b). Cahier des charges de l'appellation d'origine contrôlée « SAINT-EMILION ». 00000.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2018). Cahier des charges de l'appellation d'origine contrôlée « MEDOC ». 00000.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*, volume 422. John Wiley&Sons, New York, N.Y.
- Morari, F., Castrignanò, A., and Pagliarin, C. (2009). Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1) :97–107. 00000.
- Morlat, R. (1989). *Le Terroir Viticole : Contribution à l'étude de Sa Caractérisation et de Son Influence Sur Les Vins : Application Aux Vignobles Rouges de Moyenne Vallée de La Loire*. Thesis, Bordeaux 2.
- Morlat, R., Barbeau, G., and Asselin, C. (2001). Facteurs naturels et humains des terroirs viticoles français : Méthode d'étude et valorisation. *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, pages 111–127.
- Morlat, R. and Bodin, F. (2006). Characterization of Viticultural Terroirs using a Simple Field Model Based on Soil Depth – II. Validation of the Grape Yield and Berry Quality in the Anjou Vineyard (France). *Plant and Soil*, 281(1-2) :55–69. 00000.
- OIV (2010). RESOLUTION OIV/VITI 333/2010. *oiv.int*. 00000.
- OIV (2012). RESOLUTION OIV/VITI 423/2012.
- Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A., and Deloire, A. (2002). Influence of Pre- and Postveraison Water Deficit on Synthesis and Concentration of Skin Phenolic Compounds during Berry Growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53(4) :261–267. 00000.
- Palacky, G. (1988). Resistivity characteristics of geologic targets. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics : Theory*, volume 3, pages 53–129. Society of Exploration Geophysicists Tulsa.

- Panissod, C., Dabas, M., Jolivet, A., and Tabbagh, A. (1997). A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0–3 m) geoelectrical investigation : The ‘Vol-de-canards’ array. *Geophysical Prospecting*, 45(6) :983–1002.
- Papendick, R. and Miller, D. (1977). Conservation tillage in the pacific northwest [United states]. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5) :1633–1644. 00000.
- Pellegrino, A., Gozé, E., Lebon, E., and Wery, J. (2006). A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy*, 25(1) :49–59. 00000.
- Pellegrino, A., Lebon, E., Voltz, M., and Wery, J. (2004). Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil*, 266(1-2) :129–142. 00000.
- Penman, H. L. (1948). Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032) :120–145. 00000 ZSCC : 0008198.
- Penz, S. (2012). Modélisation et inversion de données électriques en courant continu : vers une prise en compte efficace de la topographie. page 181.
- Peruzzo, L., Schmutz, M., Franceschi, M., Wu, Y., and Hubbard, S. S. (2018). The Relative Importance of Saturated Silica Sand Interfacial and Pore Fluid Geochemistry on the Spectral Induced Polarization Response. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences*, 123(5) :1702–1718.
- Platel, J. and Dubreuilh, J. (1986). Le bassin d’Aquitaine. Technical Report 86-SGN-424-GEO, BRGM.
- Priori, S., Pellegrini, S., Perria, R., Puccioni, S., Storchi, P., Valboa, G., and Costantini, E. A. C. (2019). Scale effect of terroir under three contrasting vintages in the Chianti Classico area (Tuscany, Italy). *Geoderma*, 334 :99–112. 00000.
- Puigdefàbregas, C., Muñoz, J. A., and Vergés, J. (1992). Thrusting and foreland basin evolution in the Southern Pyrenees. In McClay, K. R., editor, *Thrust Tectonics*, pages 247–254. Springer Netherlands, Dordrecht.
- QGIS Development Team (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 00000.
- R Core Team (2014). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 00000.
- Rasse, D. P., Rumpel, C., and Dignac, M.-F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon ? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1) :341–356. 00000.

- Ratliff, L. F., Ritchie, J. T., and Cassel, D. K. (1983). Field-Measured Limits of Soil Water Availability as Related to Laboratory-Measured Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 47(4) :770–775. 00000.
- Retallack, G. J. and Burns, S. F. (2016). The effects of soil on the taste of wine. *GSA Today*, 26(5). 00000.
- Rhoades, J. D., Raats, P. a. C., and Prather, R. J. (1976). Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity 1. *Soil Science Society of America Journal*, 40(5) :651–655.
- Richer-de-Forges, A. (2014). Base de données du Référentiel Régional Pédologique du département de la Gironde à 1/250 000, en format DoneSol3.4. Technical report, INRA InfoSol.
- Richer-de-Forges, A. and Arrouays, D. (2014). Couche graphique du Référentiel Régional Pédologique de la région Nouvelle-Aquitaine : Carte des pédopaysages du département de la Gironde à 1/250 000, en format ArcInfo. Technical report, INRA InfoSol.
- Rodrigo-Comino, J. (2018). Five decades of soil erosion research in “terroir”. The State-of-the-Art. *Earth-Science Reviews*, 179 :436–447. 00000.
- Rumpel, C. and Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 338(1) :143–158. 00000.
- Ruth de Andrés-de Prado, t., María Yuste-Rojas, t., Xavier Sort, t., Cristina Andrés-Lacueva, t., , Mireia Torres, t., and Rosa M. Lamuela-Raventós*, t. (2007). Effect of Soil Type on Wines Produced from *Vitis vinifera* L. Cv. Grenache in Commercial Vineyards. 00000.
- Salvador-Blanes, S., Cornu, S., Couturier, A., King, D., and Macaire, J.-J. (2006). Morphological and geochemical properties of soil accumulated in hedge-induced terraces in the Massif Central, France. *Soil and Tillage Research*, 85(1-2) :62–77.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., and Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science : A review. *Soil and Tillage Research*, 83(2) :173–193. 00000.
- Saurin, N., Tisseyre, B., and Lebon, E. (2014). Comment mesurer la contrainte hydrique de la vigne, de la plante au vignoble. pages 1–16.
- Seguin, G. (1970). *Les Sols de Vignobles Du Haut-Métoc Influence Sur l'alimentation En Eau de La Vigne et Sur La Maturation Du Raisin*. PhD thesis, Université, Faculté des Sciences.
- Seguin, G. (1986). Terroirs and pedology of wine growing. *Experientia*, 42(8) :861–873.
- Seguret, M. (1972). Etude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. *Pub. Estela, Ser geol. struct.*, 2 :1–155.

- Serrano, O., Guillocheau, F., and Leroy, E. (2001). Évolution du bassin compressif Nord-Pyrénéen au Paléogène (bassin de l'Adour) : Contraintes stratigraphiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 332(1) :37–44.
- Sinclair, T. R. and Ludlow, M. M. (1986). Influence of Soil Water Supply on the Plant Water Balance of Four Tropical Grain Legumes. *Functional Plant Biology*, 13(3) :329–341.
- Smart, R. and Robinson, M. (1991). *Sunlight into Wine. A Handbook for Winegrape Canopy Management*. Winetitles, Adelaide.
- Taylor, J., Coulouma, G., Lagacherie, P., and Tisseyre, B. (2009). Mapping soil units within a vineyard using statistics associated with high-resolution apparent soil electrical conductivity data and factorial discriminant analysis. *Geoderma*, 153(1-2) :278–284.
- Tonietto, J. and Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1) :81–97.
- Tregoat, O. (2003). *Caractérisation du régime hydrique et du statut azoté de la vigne par des indicateurs physiologiques dans une étude terroir au sein de huit grands crus de Bordeaux : Influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin*. PhD. Thesis, Bordeaux 2, Bordeaux.
- Tregoat, O., Van Leeuwen, C., Choné, X., and Gaudillère, J.-P. (2002). Etude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 36(3) :133–142.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration : A simple climatic formula evolved up to date. *Ann. Agron*, 12(1) :13–49.
- Van Leeuwen, C. (1989). Carte des sols du vignoble de Saint-Emilion.
- Van Leeuwen, C. (2010). Terroir : The effect of the physical environment on vine growth, grape ripening and wine sensory attributes. In *Managing Wine Quality*, pages 273–315. Elsevier.
- Van Leeuwen, C., Baudet, D., Duteau, J., Seguin, G., and Wilbert, J. (1989). Les sols viticoles et leur répartition à Saint-Emilion. *Pomerol et quelques autres communes du Libournais, Connaissance de la Vigne et du Vin*, 23 :131–150.
- Van Leeuwen, C., Choné, X., Friant, P., Molot, C. H., Soyer, J. P., and Dubourdieu, D. (2000). L'intérêt du dosage de l'azote total et de l'azote assimilable dans le moût comme indicateur de la nutrition azotée de la vigne. *Journal international des sciences de la vigne et du vin= International journal of vine and wine sciences*, 34(2) :75–82.
- Van Leeuwen, C., Friant, P., Choné, X., Tregoat, O., Koundouras, S., and Dubourdieu, D. (2004). Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(3) :207–217.

- Van Leeuwen, C. and Seguin, G. (1994). Incidence de l'alimentation en eau de la vigne, appreciee par l'etat hydrique du feuillage, sur le developpement de l'appareil vegetatif et la maturation du raisin (Vitis vinifera variété Cabernet franc, Saint-Emilion 1990). *OENO One*, 28(2) :81–110.
- Van Leeuwen, C. and Seguin, G. (2006). The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research*, 17(1) :1–10.
- Van Leeuwen, C., Tregoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., and 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. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 43(3) :121–134.
- Vaudour, E. (2002). The quality of grapes and wine in relation to geography : Notions of terroir at various scales. *Journal of Wine Research*, 13(2) :117–141.
- Vaudour, E., Costantini, E. A. C., Jones, G. V., and Mocali, S. (2015). An overview of the recent approaches to terroir functional modelling, footprinting and zoning. *SOIL*, 1(1) :287–312.
- Walter, C., Bispo, A., Chenu, C., Langlais-Hesse, A., and Schwartz, C. (2015). Les services écosystémiques des sols : Du concept à sa valorisation. *Agriculture et Foncier-Concurrences entre Usages des sols et entre Usagers des sols Agricoles : La Question Foncière Renouvelée*, ed C. Demeter (Paris : Cahier Demeter), pages 51–68.
- White, R. E. (2003). *Soils for Fine Wines*. Oxford University Press, Oxford, New York.
- Wilbert, J. (1978). Lesparre G-17. OCLC : 6732732.
- Winkler, A. J., Cook, J. A., Kliewer, W. M., and Lider, L. A. (1974). *General Viticulture : Second Revised Edition*. University of California Press.