

Propriétés hydriques et hydrodynamiques de quatre parcelles viticoles à contraintes hydriques contrastées

Présenté par Hélène Sosnowski

Co-promoteurs : Prof. Bruno Delvaux (UCL/ELI/ELIE)
Prof. Mathieu Javaux (UCL/ELI/ELIE)

Lecteurs : Prof. Xavier Draye (UCL/ELI/ELIE)
Ir. Vincent Dienst (Bioingénieur et œnologue)

Mémoire de fin d'études présenté en vue de
l'obtention du diplôme de Bioingénieur :
Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

J'aimerais avant tout remercier chaleureusement mon promoteur, Prof. Bruno Delvaux, de m'avoir encadré et guidé tout au long de ce travail. Votre passion, votre confiance et votre enthousiasme ont été autant de qualités appréciées et inspirantes. Merci de m'avoir supportée (comprenez ce terme comme vous le souhaitez), que ce soit dans ce mémoire ou dans mon éventuel futur de viticultrice.

J'aimerais également remercier mon deuxième promoteur, Prof. Mathieu Javaux pour sa patience sans limites. Merci d'avoir toujours essayé de comprendre mes explications quand moi-même je n'étais pas sûre de les comprendre. Merci également pour le bon accueil au GERU durant cet été.

Un énorme merci également à Vincent Dienst, qui a été bien au-delà de sa fonction de lecteur. Merci pour les précieux conseils, les contacts et les opportunités que tu m'as ouvertes. J'aimerais également remercier le Prof. Xavier Draye et Antoine Saint-Amand pour leur aide précieuse dans les analyses statistiques.

Merci évidemment à Frédéric Laurent, pour son aide au laboratoire de physique du sol. De même pour Sébastien François, merci d'avoir été là pour presque toutes mes sorties de terrain ; sous le soleil, la pluie, la neige, le vent et que sais-je encore.

Merci à Danaé Falesse, partenaire de ce mémoire. Ta rigueur, ton organisation et ton efficacité ont été autant de coups de stress nécessaires à mon avancement. Je tiens également à remercier toute la famille Avenanti, de Terracruda, pour leur très bon accueil en novembre 2017 sur leur superbe propriété. Merci évidemment aussi à Benoît Heggen et au vignoble X de nous avoir permis d'étudier leur parcelles!

Un très grand merci à toute l'unité SOLS de m'avoir accueilli toute l'année et de même à l'unité GERU d'avoir pris le relais durant cet été.

Le meilleur pour la fin, merci du fond du cœur à ma famille de m'avoir soutenue dans toute la durée mon parcours universitaire.

Remerciements peu formels

Mon parcours universitaire et ce mémoire furent ponctués de petites et grandes rencontres et événements, j'aimerais leur faire honneur dans cette section.

Merci à Gembloux Agro-Bio tech de m'avoir inculqué la passion pour ces études durant les trois premières années de mon parcours et de m'avoir permis de rencontrer une multitude de personnes de très haute qualité. Merci ensuite à l'UCL de m'avoir si bien accueillie les deux années suivantes et donné l'opportunité de réaliser ce mémoire en bonne compagnie. Merci à la promotion Eau et Sol 2018, la meilleure équipe qu'une petite Gembloutoise aurait pu souhaiter ! Je remercie tout spécialement Alice Danzin AKA "la Goug" pour son amitié.

Grosse pensée pour mon frère, dont le cerveau m'a été d'une grande utilité durant ce mémoire et qui m'a introduit au monde louvaniste et kapiste. Un grand merci de m'avoir accueillie dans ton bureau cet été (Albéric, je pense à toi aussi!).

Un merci tout spécial au CircoKot, partenaire de mon retard et de ma procrastination. Merci à Julien, pour tous les gros coups de pouce répétés durant ces vacances. Puis spéciale dédicace à tous mes frangins, de LLN ou d'ailleurs, d'avoir fait de ce parcours une aventure complètement folle et très certainement initiatique.

Finalement, je tiens à me remercier moi-même d'avoir gardé mon sang froid durant les mesures faites sur ces 500 échantillons de sol et d'avoir ainsi résisté à l'envie de cracher du feu dans toute l'unité SOLS avec le pétrole nécessaire à mes mesures.

"A cœur vaillant, rien n'est impossible"

(Lucas Demierbe, chaque jour de sa vie)

Table des matières

Table des matières	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
1 Introduction	1
2 Le contexte	3
2.1 L'environnement	3
2.1.1 Le terroir italien	3
2.1.2 Les terroirs belges	6
3 Etat de l'art	13
3.1 Le terroir	13
3.2 L'importance de l'eau pour la vigne	16
3.2.1 Les pratiques culturales influant sur le statut hydrique de la vigne	18
3.2.2 L'impact du réchauffement climatique	18
3.3 L'eau dans le sol	20
3.4 Caractériser l'eau du sol	20
3.4.1 Courbe de rétention en eau	21
3.4.2 La conductivité hydraulique	23
3.4.3 L'infiltration	23
3.5 L'interaction sol-plante	24
4 Matériel et méthode	25
4.1 Echantillonnage	25
4.1.1 Sélection des parcelles et des sites de mesure et d'échantillonnage	25
4.1.2 Les échantillons de sol	27
4.1.3 Les forages	29
4.2 Mesure des courbes de rétention	29
4.2.1 Détermination de la CR sur cylindres kopecki	30
4.2.2 Détermination de la CR sur mottes	31
4.2.3 Récapitulatif des expériences faites pour chaque sol	33
4.3 Mesure de la densité apparente	34
4.3.1 Mesure du volume total des mottes	34
4.4 Infiltrométrie à succion contrôlée	34
4.4.1 Traitement des données	36
4.5 Analyses statistiques	37

5 La densité apparente (ρ_a)	41
5.1 Valeurs de ρ_a des sols italiens	41
5.2 Analyses statistiques	43
5.2.1 L'ensemble des parcelles	44
5.2.2 Les sols belges	45
5.2.3 Les sols italiens	47
6 Les courbes de rétention (θ-h ou θ-ψ)	51
6.1 Le Vignoble X	51
6.2 Le Domaine des Marnières	52
6.3 Pianelli	55
6.4 Gilberto	56
6.5 La réserve en eau utile	58
6.5.1 Résultats et interprétation des résultats statistiques	58
6.6 La porosité du sol	61
6.6.1 Analyses statistiques	62
7 La conductivité hydraulique	67
7.1 Le vignoble X	67
7.2 Le Domaine des Marnières	69
7.3 Pianelli	71
7.4 Gilberto	73
8 Conclusions pour chaque parcelle	77
8.1 Les parcelles belges	77
8.2 Les parcelles italiennes	79
9 Conclusion générale	81
A Annexes	83
A.1 Liste des symboles	84
A.2 Liste des abréviations	85
A.3 Informations collectées durant le forage au Vignoble X	86
A.4 Informations collectées durant le forage au Domaine des Marnières	94
A.5 Succions appliquées pour les mesures d'infiltrométrie à succion contrôlée	99
A.6 Tendances linéaires de la variation de la densité apparente des mottes pour les sols italiens	100
A.7 Tendances quadratiques de la variation de la densité apparente des mottes pour les sols italiens	101
A.8 Infiltration cumulée mesurée par infiltrométrie à succion contrôlée au Vignoble X	102
A.9 Infiltration cumulée mesurée par infiltrométrie à succion contrôlée à Pianelli, Terracuda	103
B Annexes relatives aux analyses statistiques	105
B.1 GLM 1 - Densité apparente : Résultats SAS	106
B.2 GLM 2 - Densité apparente : Résultats SAS	108
B.3 GLM 3 - Densité apparente : Résultats SAS	109
B.4 GLM 4 - Densité apparente : Résultats SAS	110
B.5 GLM 5 - Densité apparente : Résultats SAS	111
B.6 GLM 6 - Densité apparente : Résultats SAS	112
B.7 GLM 7 - REU : Résultats SAS	113

B.8 GLM 8 - REU : Résultats SAS	115
B.9 GLM 9 - Porosité X : Résultats SAS	117
B.10 GLM 10 - Porosité Marnières : Résultats SAS	122
B.11 GLM 11 - Porosité Italie K : Résultats SAS	127
B.12 GLM 12 - Porosité Italie M : Résultats SAS	131
B.13 REG 1 : Résultats SAS	135
B.14 Codes SAS	136
Bibliographie	147

Liste des figures

3.1	Représentation du phénomène d'hystérèse sur une courbe de rétention théorique, obtenue soit en désorption (dessiccation) ou sorption (humectation). Succion matricielle en fonction de la teneur en eau. Les courbes intermédiaires entre les deux branches principales sont les "scanning curves". Source : HILLEL, 1971	22
3.2	Représentation théorique du phénomène de "bouteille d'encre". Il détermine la hauteur de l'eau à l'équilibre dans différentes tailles de pore en désorption (a) et sorption (b). Source : HILLEL, 1971	23
4.1	Sites d'échantillonnages à Gilberto et Pianelli, Terracuda. Point rouge : sur le sommet convexe de la pente (SC). Point jaune : sur le versant plan (P). Point orange : sur la plaine alluviale.	26
4.2	Sites d'échantillonnages au Vignoble X. Point rouge : sur le sommet convexe de la pente (SC). Point jaune : sur le versant plan (P). Point vert : point supplémentaire uniquement pour le forage.	27
4.3	Sites d'échantillonnages au Domaine des Marnières. Point rouge : sur le sommet convexe (SC) de la pente. Point jaune : sur le versant plan (P). . .	28
4.4	Prise de cylindres kopeckis sur le terrain (il ne s'agit pas des sols étudiés dans ce mémoire).	28
4.5	Schéma d'une coupe longitudinale du dispositif mottes (cellule pF)	32
4.6	Illustration du dispositif au laboratoire SOLS	32
4.7	Prélèvement d'agrégats et mesure du volume de mottes individualisées par poussée d'Archimède dans le pétrole	33
4.8	Schéma du dispositif d'un infiltromètre à succion à disque déporté. Adapté à partir des notes de TP6 du cours LBRES2102 (LAMBOT & VANCLOOSTER, 2012)	35
4.9		36
5.1	Comparaison des tendances quadratique et linéaire représentant la variation de la densité apparente des mottes selon le pF pour le sol GiEa. . . .	43
5.2	Valeurs du pourcentage d'erreur de la densité apparente mesurée par la "méthode motte" au Vignoble X.	46
6.1	Courbe θ -h pour le Vignoble X sur le sommet convexe (SC) de la pente . .	51
6.2	Courbe θ -h pour le Vignoble X sur le versant plan (P) de la pente	52
6.3	Courbe θ -h pour le Domaine des Marnières sur le sommet convexe (SC) de la pente avec prise en compte de la charge caillouteuse.	52
6.4	Courbe θ -h pour le Domaine des Marnières sur le versant plan (P) de la pente avec prise en compte de la charge caillouteuse.	53

6.5	Courbe θ -h pour le Domaine des Marnières sur le sommet convexe (SC) de la pente sans prise en compte de la charge caillouteuse.	54
6.6	Courbe θ -h pour le Domaine des Marnières sur le versant plan (P) de la pente sans prise en compte de la charge caillouteuse.	54
6.7	Courbe θ -h pour Pianelli à la profondeur a (0 à 10 cm)	56
6.8	Courbe θ -h pour Pianelli à la profondeur b (10 à 20 cm)	56
6.9	Courbe θ -h pour Gilberto à la profondeur a (0 à 10 cm)	57
6.10	Courbe θ -h pour Gilberto à la profondeur b (10 à 20 cm)	57
7.1	Courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque site d'échantillonnage au Vignoble X. A et B sont situés en position topographique SC. C et D sont situés en P.	68
7.2	Infiltration cumulée mesurée pour les différents sites d'échantillonnages au Domaine des Marnières. A et B sont situés en position topographique SC. C et D sont situés en P.	70
7.3	Courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque site d'échantillonnage au Domaine des Marnières. A et B sont situés en position topographique SC. C et D sont situés en P.	71
7.4	Courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque site d'échantillonnage sur Pianelli.	72
7.5	Infiltration cumulée mesurée pour les différents sites d'échantillonnages sur Gilberto. A,B et C sont situés en position topographique SC. D,E et F sont situés en P.	74
7.6	Courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque site d'échantillonnage sur Gilberto. A,B et C sont situés en position topographique SC. D,E et F sont situés en P.	75
A.1	Infiltration cumulée mesurée pour les différents sites d'échantillonnages au Vignoble X. A et B sont situés en position topographique SC. C et D sont situés en P.	102
A.2	Infiltration cumulée mesurée pour les différents sites d'échantillonnages à Pianelli. A,B et C sont situés sur une plaine alluviale.	103

Liste des tableaux

2.1	Indices de Huglin pour les années 2015, 2016 et 2017 pour le vignoble de Terracuda. Source : Falesse, non publié	4
2.2	Caractéristiques des parcelles Pianelli et Gilberto, Vignoble de Terracuda, source : ENGELEN, 2016 et terrains de novembre 2017	4
2.3	Granulométrie de la parcelle Pianelli, Terracuda. Source : ENGELEN, 2016	5
2.4	Granulométrie de la parcelle Gilberto, Terracuda. Source : ENGELEN, 2016	6
2.5	Indices de Huglin pour les années 2015, 2016 et 2017 pour le Vignoble X et le Domaine de Marnières. Source : Falesse, non publié	7
2.6	Quelques caractéristiques environnementales et culturelles des parcelles et de la vigne des vignobles belges étudiés	8
2.7	Quelques caractéristiques des forages aux Marnières, Belgique	9
2.8	Quelques caractéristiques de la parcelle au vignoble X, Belgique	10
3.1	Ordre de grandeurs de l'infiltration à régime permanent pour différents types de sol. Source : HILLEL, 1971	24
4.1	Valeurs de pF et temps d'équilibrage par dispositif pour les CR en dessiccation. BP = basses pressions, HP = hautes pressions	31
5.1	Valeurs moyennes de la densité apparente des sols italiens, mesurée sur mottes, selon la position dans la pente (PL = plaine, P = versant plan, SC = sommet convexe) et la profondeur d'échantillonnage (a = entre 0 et 10 cm et b = entre 10 et 20 cm). Mesures sur les mottes.	42
5.2	Valeurs moyennes marginales des ρ_a pour chaque parcelle, calculées par SAS.	44
5.3	Moyenne arithmétique des densités apparentes pour chaque parcelle.	45
5.4	Valeurs de densité apparente moyenne pour Pianelli selon la profondeur, mesures sur mottes. Les valeurs moyennes de densité apparente reprennent les mesures sur l'ensemble des pF.	47
5.5	Valeurs de densité apparente moyenne pour Pianelli selon la profondeur et la méthode de mesure, pour pF = 1.	47
5.6	Valeurs de densité apparente moyenne pour Gilberto selon la profondeur, mesures sur mottes. Les valeurs moyennes de densité apparente reprennent les mesures sur l'ensemble des pF.	48
5.7	Valeurs de densité apparente moyenne pour Gilberto selon la profondeur et la méthode de mesure, pour pF = 1.	48
6.1	Charge caillouteuse mesurée pour chaque point de mesure au Domaine des Marnières. SC = sommet convexe, P = versant plane	53
6.2	Teneurs en eau massiques lors de l'échantillonnage des sols italiens et valeur correspondante du pF.	55

6.3	Moyenne des valeurs de REU pour chaque parcelle.	58
6.4	Valeurs de REU moyenne pour les sols belges selon la profondeur.	59
6.5	Valeurs de REU moyenne pour les sols italiens selon la profondeur.	60
6.6	Valeurs de REU moyenne pour les sols italiens selon la méthode de détermination : humectation (mottes) ou dessiccation (kopecki).	61
6.7	Valeurs des indicateurs de porosité pour le Vignoble X.	63
6.8	Valeurs des indicateurs de porosité pour le Domaine des Marnières.	63
6.9	Valeurs des indicateurs de porosité pour les parcelles Pianelli et Giblerto, mesures sur kopecki.	65
6.10	Valeurs des indicateurs de porosité pour les parcelles Pianelli et Giblerto, mesures sur mottes.	66
7.1	Ajustement des CR pour les sites du Vignoble X.	67
7.2	Valeurs de K_s , λ modélisés et SSQ I(t) pour les sites d'échantillonnages du Vignoble X.	68
7.3	Ajustement des CR pour les sites du Domaine des Marnières.	69
7.4	Valeurs de K_s , λ modélisés et SSQ I(t) pour les sites d'échantillonnages au Domaine des Marnières.	70
7.5	Ajustement des CR pour les sites de Pianelli.	71
7.6	Valeurs K_s , λ modélisés et SSQ I(t) pour les sites d'échantillonnages pour Pianelli.	72
7.7	Ajustement des CR pour les sites de Gliberto.	73
7.8	Valeurs de K_s , λ modélisés et SSQ I(t) pour les sites d'échantillonnages pour Gliberto.	73
A.1	Succions appliquées pour les différents sites de mesures d'infiltrométrie.	99
A.2	Tendances linéaires de la variation de la densité apparente des mottes pour les sols italiens et leurs R^2 . $x = pF$ et $y = \text{densité apparente [g/cm}^3\text{]}$	100
A.3	Tendances quadratiques de la variation de la densité apparente des mottes pour les sols italiens et leurs R^2 . $x = pF$ et $y = \text{densité apparente [g/cm}^3\text{]}$	101

Chapitre 1

Introduction

La viticulture se distingue des autres cultures car le rendement qualitatif supplante largement le rendement quantitatif. La qualité prime sur la quantité, particulièrement en viticulture traditionnelle, celle du "Vieux Monde" (SCHIRMER, 2007). Or, c'est en réduisant le rendement des pieds de vigne que la meilleure qualité sera obtenue, ce qui constitue la *viticulture sous contrainte* (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008; LEEUWEN, TREGOAT *et al.*, 2009; DES GACHONS *et al.*, 2005; KOUNDOURAS *et al.*, 1997). Quelle contrainte sera bénéfique pour la qualité des baies ? Usuellement, le viticulteur joue sur deux tableaux : la contrainte hydrique et la contrainte azotée. Ce mémoire se concentre sur la contrainte hydrique. Celle-ci doit être modérée, dans la mesure où un stress hydrique important est néfaste pour la qualité du vin, particulièrement pour les cépages blancs. La contrainte hydrique dépend de la réserve en eau utile du sol, de sa capacité d'infiltration, de la profondeur d'enracinement des vignes et du climat de la région. Si l'environnement ne permet pas d'atteindre une contrainte hydrique suffisante ou crée un stress hydrique délétère, le viticulteur peut adapter le matériel végétal et les pratiques culturales afin d'atteindre un statut hydrique adéquat de ses vignes (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008; van LEEUWEN & DARRIET, 2016). L'interaction entre la contrainte hydrique et azotée est également à prendre en compte, si l'une est trop forte, il s'agit de réduire l'autre et vice versa (DES GACHONS *et al.*, 2005).

L'ensemble de ces facteurs : l'environnement naturel, le matériel végétal et le facteur humain sont repris en un concept central dans le monde du vin : le terroir (VAN LEEUWEN & G. SEGUIN, 2006). Cette notion est bien plus large que la seule contrainte hydrique ; elle reprend plus largement le sol, le climat sous toutes ses échelles d'espace et de temps, les pratiques viticoles et œnologiques, les caractéristiques physiologiques de la plante et bien plus encore. Le terroir peut être défini comme un écosystème en interaction avec tous ces facteurs. C'est dans cet écosystème complexe que le viticulteur et le vigneron doivent faire des choix adéquats pour atteindre un produit de qualité, reflétant en même temps la typicité de sa vigne, de son environnement et des pratiques œnologiques éventuellement prescrites par une appellation, bref ; de son terroir.

L'objectif du présent travail est de caractériser les sols de différentes parcelles viticoles selon leurs propriétés hydriques (réserve en eau utile et infiltration). Ces caractéristiques seront mises en lien avec les pratiques culturales existant au vignoble. Quatre parcelles ont été sélectionnées, toutes cultivées avec des cépages blancs destinés à la production de vins blancs. Deux de ces parcelles sont italiennes, dans la région des Marches. Elles présentent un sol argileux, à caractère gonflant. Le cépage local est le *Bianchello Del Metauro*. Deux parcelles sont situées en Belgique, une en pays de Herve et l'autre dans le Brabant Wallon. La première présente également un sol argileux et crayeux, dont la charge caillouteuse peut atteindre le 40%. La seconde présente une texture sablo-limoneuse. Sur

ces deux parcelles, le cépage est le Chardonnay. Sur chaque parcelle, la vitesse d'infiltration et la réserve en eau utile sont mesurées expérimentalement. L'effet de la pente et de la profondeur (entre 0 et 20 cm) est étudié, ainsi que l'effet de l'hystérèse pour les parcelles italiennes. Une comparaison des différents terroirs sur le plan de la contrainte hydrique est réalisée.

Dans l'avenir, il s'agira ensuite de travailler sur les propriétés organoleptiques du vin produit et de suivre le statut hydrique de la vigne sur plusieurs millésimes, en vue d'affiner la compréhension de l'impact du sol sur le raisin. La contrainte azotée devra également être prise en compte. Ces études sont d'autant plus intéressantes que la majorité des recherches dans ce champ sont conduites pour les vins rouges, pour lesquels les composés d'intérêt sont très différents. Comprendre l'impact des propriétés hydrodynamiques et hydriques du sol permettra de progresser sur le problème du manque de qualité des vins blancs lors des millésimes secs, enjeu bien connu pour le vignoble bordelais. Cette question revêt une acuité particulière dans le contexte du réchauffement climatique.

Bonne lecture et je l'espère, découverte !

Mots-clefs : contrainte hydrique, sol viticole, terroir, vin blanc, Chardonnay, Bianchello Del Metauro

Chapitre 2

Le contexte

Avertissement au lecteur

Dans le cadre de ce chapitre, les données de contexte concernant le terroir italien (Terracuda) sont reprises d'un mémoire précédent (ENGELIN, 2016), mis à part quelques informations fournies par le viticulteur lors de ma campagne de terrain de novembre 2017. En revanche, pour les deux terroirs belges, toutes les données présentées ont été collectées dans le cadre du présent travail. Ces données sont donc des résultats propres pour lesquels les aspects méthodologiques seront présentés dans le chapitre « Matériel et Méthode ». Nous avons fait ce choix afin d'harmoniser au mieux la présentation du contexte sur une base comparative pour le confort de lecture de ce mémoire.

2.1 L'environnement

2.1.1 Le terroir italien

Le vignoble étudié se situe à Fratte Rosa, dans la région des Marches en Italie. Elle est au centre de l'Italie, sur un secteur du versant adriatique de l'Apennin central (ROUX, 2018). Les Alpes et les Apennins sont souvent considérés comme appartenant au même système Alpes-Apennins. Cependant, les Apennins n'ont émergé que bien plus tard de la mer, lors de l'orogénèse apennine au début du Néogène, il y a environ 20 millions d'années. Cette chaîne montagneuse est principalement formée de roches sédimentaires, déposées dans l'ancien Téthys, paléo-océan qui séparait autrefois la Pangée (DEMANGEOT & AUBOUIN, 2018). La région du vignoble étudié présente un sol formé par des sédiments calcarifères marins du Pliocène et du Pléistocène (les deux plus récentes époques géologiques du Néogène cité plus haut), ainsi que des sédiments alluviaux plus récents, datant de l'Holocène COSTANTINI *et al.*, 2004. Ces formations calcarifères sont majoritairement argileuses ou sableuses, avec localement des affleurements rocheux. Les cambisols, regosols, calcisols, phaeozems et luvisols sont majoritaires, avec éventuellement des caractéristiques vertiques (ROBERTO *et al.*, 2015; ABATE *et al.*, 2013). La topographie gouverne aujourd'hui les processus pédologiques. Les alentours de Fratte Rosa présentent des reliefs accidentés : l'érosion, l'alluvionnement et le colluvionnement sont dès lors des processus majeurs. Le climat est méditerranéen, avec température annuelle moyenne de 12,5 à 16°C et des précipitations annuelles moyennes entre 700 et 1000 mm. Les indices héliothermiques de HUGLIN, 1978 (IH) caractérise le climat comme tempéré chaud à chaud et son repris à la table 2.1 pour les années 2015 à 2017 (données fournies par la station météorologique de Pergola (Security and Civil Protection Département), située à moins de 15 km de Fratte Rosa).

Année	IH	Catégorie climatique
2015	2394,92	Tempéré chaud
2016	2203,74	Tempéré chaud
2017	2501,21	Chaud

TABLEAU 2.1 – Indices de Huglin pour les années 2015, 2016 et 2017 pour le vignoble de Terracuda. Source : Falesse, non publié

La région des Marches est caractérisée par une activité agricole importante : cultures maraîchères, céréales, élevage et la vigne sont les activités principales. La production de vin y a débuté il y a 2000 ans. Aujourd'hui, les Marches présentent onze zones DOC et une zone IGT (MA CAVE À VIN, 2018). Les zones DOC, *denominazione di origine controllata*, correspondent aux appellations d'origine contrôlées françaises, elles garantissent le respect d'une zone d'origine des raisins et de méthodes spécifiques de production de vin. Les zones IGT, *indicazione geografica tipica*, identifient des territoires spécifiques, allant d'une région à quelques collines. Cette appellation est moins restrictive que le DOC tout en garantissant une reconnaissance officielle de la région (LA REVUE DU VIN DE FRANCE, 2008). Le vignoble de Terracuda étudié dans ce document produit 3 vins d'appellation DOC, en utilisant les trois cépages respectifs *Bianchello Del Metauro* DOC, *Pergola* DOC Rosso et du *Sangiovese dei Colli Pesare* DOC, avec un total de 80% de la production en DOC en 2007 (TERRACUDA, 2018). Dans ce travail, deux parcelles de ce vignoble sont étudiées, les parcelles Pianelli et Gilberto, chacune plantée avec du *Bianchello Del Metauro*.

Les parcelles étudiées - Pianelli et Gilberto

	Pianelli	Gilberto
Surface	4 ha	1,5 ha
Ecartement x Distance Intercep (cm x cm)	270 x 70	270 x 70
Orientation	Sud - Sud-est	Sud-ouest
Altitude (m)	183	270 - 280
Drainage	Bon	Bon
Topographie	Pente faible 0 - 1%	Pente très forte 20 - 30%
Présence de carbonates	Oui	Oui
Entretien de la vigne		
Taille	Juste après la chute des feuilles, fin novembre	
Effeuvillage	1 à 2 fois par an	
Vendange	Deuxième moitié de septembre	Première moitié d'octobre
Rendement	9 t/ha	7 t/ha

TABLEAU 2.2 – Caractéristiques des parcelles Pianelli et Gilberto, Vignoble de Terracuda, source : ENGELEN, 2016 et terrains de novembre 2017

Le tableau 2.2 présente quelques caractéristiques générales des deux parcelles étudiées. On y constate la présence de carbonates, associés à l'origine marine des sédiments

(notamment : coquillages bien visibles sur le terrain).

Fait intéressant, ces deux parcelles sont vendangées et vinifiées séparément. De Pianelli, on tirera le vin nommé "Boccalino". De Gilberto, on produira le vin "Campodarchi", considéré comme de qualité supérieure au Boccalino. Le Campodarchi est généralement vendangé plus tard que le Boccalino, la parcelle Gilberto (7T/ha) présente un rendement par hectare moindre que Pianelli (9 T/ha).

Pianelli Cette parcelle est localisée dans une petite plaine alluviale, située à proximité d'un ruisseau. Elle présente un profil pédologique homogène sur toute sa surface ainsi qu'en profondeur, caractérisé par une texture majoritairement argileuse dépassant les 58% entre 0 et 170 cm de profondeur. La granulométrie plus complète est reprise au tableau 2.3. La teneur en limon grossier mesurée entre 70 et 98 cm est selon l'auteure, due à un artefact lors de l'analyse granulométrique. Les argiles sont dominées par la smectite, un minéral 2 :1 conférant au sol ses propriétés de gonflement-retrait en fonction de la teneur en eau. L'illite et la kaolinite sont les deux argiles également présentes (ENGELN, 2016).

Profondeur (cm)	Horizon	Sable 500 µm - 2 mm (%)	Limon grossier 20 - 500 µm (%)	Limon fin 2 - 20 µm (%)	Argile < 2 µm (%)
0 - 20	Ap	10,89	0,61	27,23	61,27
20 - 70	AB1	10,22	7,14	23,72	58,92
70 - 98	AB2	9,17	26,92	1,07	62,84
98 - 100	BW	2,09	5,95	26,81	65,15
126 - 154		10,58	8,06	19,7	61,66
154 - 168		14,86	7,51	19,34	58,29

TABLEAU 2.3 – Granulométrie de la parcelle Pianelli, Terracuda. Source : ENGELN, 2016

Gilberto Cette parcelle est étudiée selon une toposéquence allant du sommet de pente convexe (SC : sommet convexe) au versant plane (P : plane). Le bas de pente concave, très court, n'a pas été étudié. Les profils granulométriques des séquences SC et P sont présentés au tableau 2.4. Ils sont caractérisés par une faible variation de la teneur en limon (15 - 30 %) mais une grande variation des teneurs en sable et argile (respectivement 2 - 65% et 15 - 69%). Le triangle textural dévoile une texture globalement sablo-limoneuse pour Gilberto SC, avec des teneurs en argiles entre 15 et 38%. L'horizon 2C (89 - 98 cm) est composé d'un matériau très compact et argileux appelé le "tufa" (ENGELN, 2016). Gilberto P est nettement plus argileux, (47 à 69% argile) dans le premier mètre du profil. L'analyse granulométrique des deux profils suggère une plus grande variabilité à Gilberto qu'à Pianelli. La pente est à incriminer, comme énoncé plus haut, la topographie gouverne les processus pédologiques, cette parcelle en est un bon exemple, avec une granulométrie fonction de la dynamique de colluvionnement. En plus de cet effet, ENGELN, 2016 nous informe que des origines sédimentaires distinctes peuvent être attribuées aux deux horizons 2C, précédemment qualifiés de "tufa". La nature des argiles est la même que celle identifiée à Pianelli, avec d'abord une dominance de la smectite, ensuite de l'illite et de la kaolinite. Un dernier point est remarquable à Gilberto : on trouve un horizon très compact et induré, débutant entre les 10 et 25 premiers centimètres de sol, au travers duquel les racines peinent à croître et l'eau à s'infiltrer.

Profondeur (cm)	Horizon	Sable > 500 µm (%)	Limon grossier 20 - 500 µm (%)	Limon fin 2 - 20 µm (%)	Argile < 2 µm (%)
Gilberto SC - sommet de pente convexe					
0 - 24	Ap	44,90	2,90	18,72	33,47
24 - 56	BW1	36,91	2,81	22,35	27,93
56 - 89	BW2	46,36	5,96	17,76	29,91
89 - 98	2C	13,51	8,93	18,53	59,03
117 - 142		70,11	4,35	10,07	15,46
147 - 162		63,05	4,38	12,25	20,32
Gilberto P - versant plane					
0 - 28	Ap	29,92	8,45	14,74	46,90
28 - 67	BW1	15,70	7,13	17,54	59,63
67 - 98	BW2	18,79	9,21	13,28	58,71
98 - 110	2C	5,36	10,35	14,89	69,40
98 - 108		1,74	11,22	25,44	61,60
108 - 110		65,23	4,50	10,88	19,39
140 - 155		60,43	2,96	13,05	23,57
155 - 180		7,78	5,88	23,81	62,54

TABLEAU 2.4 – Granulométrie de la parcelle Gilberto, Terracruda. Source : ENGELIN, 2016

2.1.2 Les terroirs belges

Le vignoble X, que nous appellerons ainsi par discrétion demandée par le propriétaire, se situe dans la province du Brabant Wallon. Il repose sur le socle Brabant datant du Primaire. Ensuite, différentes couches se sont succédées pour former le matériau parental du sol de la région (BOULVAIN & PINGOT, 2018).

— Tertiaire :

- Tongrien : assise inférieure faite de sable surmontée par de l'argile
- Bruxellien : sable et grès calcarifères
- Landénien : assise inférieure de sable fin et galets

— Quaternaire (Pléistocène) : limons éoliens ; loess

Cette couche limoneuse s'élève jusqu'à 9 m dans le meilleur des cas du loess brabantien (BOUR, 2010). Un sol limoneux est caractérisé par sa grande réserve en eau utile. Cet attribut a fait de la région une zone très cultivée.

Le domaine des Marnières est situé dans la commune de Dalhem, dans le Pays de Herve. Là-bas, la transgression du Crétacé commence par déposer des sédiments sableux sur toute la région. Cette transgression continua ensuite au Campanien et apporte une marne ou une argile silteuse riche en glauconite. Là-dessus se dépose les niveaux crayeux du Campanien-Maastrichtien. Ensuite, la fin du Crétacé se caractérise par une importante régression au cours de laquelle les craies ont été en partie érodées, laissant un conglomérat de silex résiduels. La parcelle au domaine des Marnières repose sur la formation de Gulpen, caractérisée par des craies présentant différents faciès selon la séquence qui suit :

- craie glauconifère,
- craie blanche avec des silex noirs, peu altérée
- craie karstifiée dont le sommet est irrégulier

. L'épaisseur de cette craie est variable mais d'environ 40 m (RUTHY *et al.*, 2014). Ces caractéristiques font des sols de la région de bons pâturages, on trouve ainsi dans la commune de Dalhem de grandes surfaces de prairies plutôt que des cultures.

La viticulture en Belgique date du premier siècle, lorsque les Romains importèrent la vigne en Gaule. Mais elle prend réellement son essor au Moyen-Âge, aux alentours du cinquième siècle, dans le but d'instaurer une autarcie économique (HALKIN, 1895). La dynastie des Francs favorise la vigne en vallée mosane, mais reste réservée aux hautes classes sociales (DURIEUX & VANEL, 2013). La pratique s'étend à la vallée de l'Ourthe, de l'Amblève et du Geer et au treizième siècle, chaque ville possède ses vignes. Ensuite, la viticulture belge décroît considérablement. Dès le quinzième siècle, la petite ère glaciaire met à mal la viticulture sous nos latitudes. En parallèle, la bière prend son essor car elle est moins coûteuse, plus saine et se conserve mieux. Entre le septième et le dix-huitième siècle, la politique et les guerres dirigent l'attention sur d'autres activités. La révolution industrielle, ensuite, rend le transport de vin étranger plus aisé, qui supplante ainsi le vin belge moins réputé (HALKIN, 1895). C'est ainsi qu'au dix-neuvième siècle, la viticulture a presque disparu dans nos régions. Ce n'est que dans les années soixante que deux viticulteurs passionnés plantent de la vigne en Wallonie. Ce regain d'intérêt gagne la Flandre : en 1997, la région de Louvain décroche la première appellation viticole d'origine belge. Trois autres suivront. Le secteur viticole belge se professionnalise.

Les deux parcelles étudiées - Domaine des Marnières et Vignoble X

Deux vignobles wallons sont étudiés, Le domaine des Marnières et le Vignoble X. Dans chaque vignoble, une parcelle plantée de vignes du cépage Chardonnay est sélectionnée. Les deux terroirs se distinguent en termes de sol et de climat. Les IH pour chaque parcelle sont calculés et repris au tableau 2.5, caractérisant le climat au Vignoble X comme frais et celui au Domaine des Marnières comme frais à tempéré (données fournies par l'Institut Royal Météorologique pour les stations d'Ernage et Liège-Monsin). Les pratiques culturelles présentent des différences. Quelques caractéristiques sont présentées au tableau 2.6.

Vignoble	Année	IH	Catégorie climatique
Vignoble X	2015	1520,40	Frais
	2016	1666,86	Frais
	2017	1625,1	Frais
Les Marnières	2015	1760,28	Frais
	2016	1990,62	Tempéré
	2017	1948,14	Tempéré

TABLEAU 2.5 – Indices de Huglin pour les années 2015, 2016 et 2017 pour le Vignoble X et le Domaine de Marnières. Source : Falesse, non publié

Le domaine des Marnières Des forages de sol effectués entre 0 et 105 cm avec la société Gefotec ont permis de décrire brièvement des profils de sol en conditions non

	Marnières	Vignoble X
Caractéristiques physiques		
Surface	2 ha	4 ha
Ecartement x Dist. Intercep (cm x cm)	240 x 100	160 x 75
Orientation	Nord-Est	Est
Altitude (m)	215	100
Drainage	Bon	Bon + drains, surtout dans la cuvette
Topographie		Pente de 8%
Présence de carbonates	Oui	Non
Caractéristiques de la vigne et du vin		
Âge de la vigne	8 ans	4 ans
Cépage	Chardonnay	
Clone	DUFT/D258	Bourguignons peu productifs
Porte-greffe	450 pieds 5BB; 3000 pieds SO4	principalement 3309C; quelques Gravesac
Vin biologique	Non	Bio et biodynamie à partir de 2017
Début de production	2013	2017
Taux d'alcool potentiel	11,9% à 12,5%	10,3%
Entretien de la vigne		
Occupation avant la vigne	Pâturage	Culture de maïs
Avant la plantation	sous-solage à 60 cm entre les dents, labourage à 30 cm, 2 liersages perpendiculaires	3 ans de repos puis labour
Enherbement	Permanent entre les rangs, pas sous le pied	
Taille	novembre à février, bois laissé dans la vigne	fin février à mars, bois exporté, méthode Guyot simple bourguignon
Effeuillage	léger, 2 mois avant les vendanges	Partiellement côté nord, 2-3 semaines avant les vendanges
Passerillage	Non	Non
Eclaircissage	Réduction à 2 grappes par pousse. Retrait du grapillon de la grappe qui fleurit 4 à 5 jours plus tard que la grappe principale	Non
Ebourgeonnage	Oui, manuellement	

TABLEAU 2.6 – Quelques caractéristiques environnementales et culturelles des parcelles et de la vigne des vignobles belges étudiés

perturbées¹. Comme pour Gilberto, la parcelle est étudiée selon un toposéquence, des forages sont effectués en sommet de pente convexe (SC) et sur le versant plan (P). Le profil fait apparaître deux horizons contrastés : un horizon d'une trentaine de cm de couleur foncée (10 YR 2/1 à 3/2), argilo-limoneux (+/- 35% d'argile au toucher). Superpose un horizon plus dense, très collant et plastique, à la manière de la terre glaise. La couleur change vers le jaunâtre (10 Y/R 5/5 à 5/6). Cet horizon contient des éléments grossiers (> 2mm) de nature crayeuse. La charge caillouteuse est variable (1% à 42%). Le tableau 2.7 reprend quelques caractéristiques des forages réalisés aux différents points d'échantillonnage. Les points A et B sont situés au sommet convexe, les points C et D sont situés sur le versant plane.

	Point A, SC	Point B, SC	Point C, P	Point D, P
Présence de carbonates	Non	Léger, dès la surface	A partir de 50 cm	Dès la surface
Présence de craie visible	Très peu à partir de 40 cm	Non	A partir de 50 cm	Dès la surface
Apparition de l'horizon plus jaunâtre	à 37 cm	à 30 cm	à 30 cm	à 35 cm
Charge caillouteuse	a : 16,65% b : 12,37 %	a : 42,23% b : 2,97 %	a : 32,54% b : 23,76 %	a : 1,05% b : 29,35 %

TABLEAU 2.7 – Quelques caractéristiques des forages aux Marnières, Belgique

La position topographique ne semble pas influencer la profondeur d'apparition de l'horizon argileux et "jaunâtre". En revanche, ce matériau crayeux apparaît en position P. La charge caillouteuse ne semble pas être discriminée par la topographie. Plusieurs types d'éléments grossiers sont présents, dont une fraction de silex relativement importante.

Le vignoble X Il a aussi été étudié à l'aide de forages "Gefotec"² selon une toposéquence SC-P. En SC, l'horizon de surface est sablo-limoneux. Il superpose le sable bruxellois typique de la région lœssique qui apparaît à une profondeur variable selon la toposéquence : superficiel en SC, profond en P. Ce sable est localement glauconifère. Le tableau 2.8 reprend ces deux caractéristiques pour les différents points de forage : A et B se situent en position SC, C et D en P. Deux points supplémentaires ont été réalisés : E en bas de pente concave et X sur le plateau en haut de parcelle. Les forages ont été effectués jusqu'à 120 cm.

1. Descriptif des forages visibles à l'annexe A.2
2. Descriptif des forages visibles à l'annexe A.2

	Point A, SC	Point B, SC	Point C, P	Point D, P	Point E, bas de pente	Point X, plateau
Apparition du sable	à 50 cm	à 1,2m	Non	Non	Non	à 50 cm
Présence de glaucinite	Altérée, à 70 cm	Non	Non	Non	Non	à 84 cm

TABLEAU 2.8 – Quelques caractéristiques de la parcelle au vignoble X, Belgique

Les observations rapportées au tableau 2.8 suggèrent une influence de la topographie sur la profondeur d'apparition du sable bruxellien, celle-ci est moindre en haut qu'en bas de parcelle. Cela révèle un processus d'érosion en haut de la parcelle et d'apport jusqu'en bas de pente. A titre de comparaison, en région limoneuse et en position de plateau, la profondeur d'apparition du sable bruxellien varie globalement de 2 à 9m. Cela suggère que la zone d'étude est déjà relativement érodée.

Le matériel végétal

L'espèce végétale concernée est *Vitis vinifera*, une liane ou arbrisseau sarmenteux de la famille des *Vitaceae*. Cultivée pour ses fruits en grappes, la vigne est à l'origine de très nombreux cépages. Seuls les cépages étudiés seront présentés ci-dessous.

Le Bianchetto Del Metauro Le Bianchetto Del Metauro est un clone du Trebbiano. L'historien Tacite attribue à ce cépage un rôle primordial dans la célèbre bataille de Métaure, lors de la deuxième guerre punique, en -207 A.C.N. Cette bataille a eu lieu à proximité du fleuve Métaure, dont la source est localisée dans les Apennins et à l'embouchure près de la ville côtière de Fano. L'armée carthaginoise, dirigée par Hasdrubal, frère d'Hannibal, fut écrasée par l'armée romaine, car la veille, les carthaginois auraient un peu forcé sur le vin local, le Bianchetto (TERRACRUDA, 2018). C'est un cépage vigoureux, produisant abondamment. Il présente une bonne résistance au mildiou, à l'oïdium mais il est sensible à la pourriture. Il craint le froid printanier. Il est cultivé dans les collines de la région des Marches, où il est à la base du DOC *Biachello Del Metauro* (GALET, 2000).

Le Chardonnay Le Chardonnay est un cépage originaire de Bourgogne et proviendrait d'un croisement entre le Pinot et le Gouais B. C'est un cépage très connu et sa plantation n'a fait que croître, jusqu'à atteindre 46 000 ha en 2011 en France. Il est généralement taillé à long bois, surtout dans des zones fraîches comme la Belgique. Les sols lui convenant le mieux sont calcaires ou marneux. Le Chardonnay débouffe environ à la mi-mars et vient à maturité aux alentours de fin août en France en climat chaud (PL@NTGRAPE, 2018). Plus au Nord, en Belgique, sa véraison ne commence qu'à la fin août pour les années chaudes et vers le 10 septembre en années normales à froides (VANDERLINDEN, 2015).

Porte-greffe 5BB Son nom complet est le *Kober 5 BB*. On estime son utilisation à 9 000 ha en France, principalement en Alsace, Aquitaine, Bourgogne Franche-Comté, Val de Loire, Charentes, Midi-Pyrénées et Rhône-Alpes. Il supporte jusqu'à 35% de calcaire total, 20% de calcaire actif et jusqu'à un IPC de 40. Il présente donc une tolérance

moyenne à bonne à la chlorose ferrique. Le 5 BB est de plus bien adapté aux conditions humides et aux sols sableux. Ce porte-greffe a tendance à retarder la maturité des greffons et induit une vigueur très importante. Il produit beaucoup de bois et peut même être considéré comme un des porte-greffes les plus producteurs de bois parmi les plus classiquement utilisés (PL@NTGRAPE, 2018).

Porte-greffe S04 Ce porte-greffe porte le nom complet de *Sélection Oppenheim 4*. Il est utilisé sur pas moins de 180 000 ha en France et y est présent dans toutes les régions viticoles. Ce porte-greffe résiste moyennement à la chlorose ferrique, avec jusqu'à 35% de calcaire total, 17% de calcaire actif et à un IPC de 30. Il présente de bons comportements en sols acides. Le S04 se montre résistant à la sécheresse, mais est moyennement à faiblement adapté à l'humidité. Il s'adapte bien aux sols sablonneux, aux terroirs de plaines et aux sols argilo-calcaires moyennement ou peu fertiles. Son interaction avec le greffon pousse ce dernier à présenter une très grande vitesse de développement et une grande vigueur les 15 premières années du vignoble. Les rendements seront donc élevés, il faut donc penser à l'éclaircissage. Les teneurs en sucre sont assez hautes mais parfois le vin peut manquer de corps et présenter des notes herbacées du fait de ce haut rendement. Ce porte-greffe produit souvent également des vins à pH élevé. Le S04 présente également une production significative de bois.

Porte-greffe 3309C Le nom complet du porte-greffe est le *3309 Couderc*. 105 000 ha du vignoble français serait greffé avec ce porte-greffe, principalement en Bourgogne Franche-Comté, Val de Loire, Aquitaine, Alsace, Midi-Pyrénées, Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur et en Champagne. Le 3309C offre un degré de tolérance faible à moyen à la chlorose, et il ne résiste qu'à 20% de calcaire total, 11% de calcaire actif et une IPC de 10%. Il tolère bien les sols acides. Il est sensible au stress hydrique, particulièrement si ce dernier est brusque et survient lors du cycle végétatif. Il s'adapte difficilement aux excès d'humidité. Ce porte-greffe est bien adapté aux sols profonds, sablo-argileux, limono-argileux et pas ou peu calcaires. Concernant son interaction avec le greffon, le 3309C apporte une vitesse de développement et de mise en fruits un peu lente. Il limite également la vigueur de la vigne (PL@NTGRAPE, 2018).

Chapitre 3

Etat de l'art

3.1 Le terroir

Le concept de terroir fut d'abord développé par Seguin1969, G. SEGUIN, [1983] SEGUIN, [1986] et ensuite par VAN LEEUWEN & G. SEGUIN, [2006]. Selon ces auteurs, le terroir relie les attributs sensoriels du vin aux conditions environnementales dans lesquelles les grappes se sont développées. En d'autres mots, la qualité et le style du vin peuvent être très largement expliqués par le terroir. Celui-ci est toutefois difficile à étudier car il inclut de nombreux facteurs qui interagissent : le climat, le sol, le cépage et les pratiques culturales. Selon ces mêmes auteurs, la meilleure expression du terroir est accomplie lorsque "la précocité du cépage est adaptée aux conditions climatiques locales de manière à atteindre une maturité complète des baies à la fin de la saison de croissance". En particulier, la production de vins rouges de haute qualité nécessite une vigueur modérée de la vigne, "soit par un déficit hydrique modéré ou par un apport faible en azote". Par conséquent, hormis le climat, la topographie et l'exposition, les sols contribuent fortement à la qualité des vins, notamment grâce à l'alimentation en eau et en azote. Aucun autre produit agricole n'a une relation aussi forte avec le sol que le vin (van LEEUWEN, [2010]). Un ouvrage collectif italien récent souligne le rôle crucial des sols en viticulture : "Il suolo rappresenta quindi il fattore fisico che assieme al clima trasmette al vino l'essenza del luogo" (SCIENZA *et al.*, [2015]), c'est-à-dire "Le sol est le facteur physique qui, avec le climat, transmet au vin l'essence même du lieu de production".

Facteur humain Il couvre les aspects historiques et, surtout, les techniques culturales. A ce propos, tout l'art du vigneron sera d'exprimer les caractéristiques du terroir dans le style et l'originalité de son vin. Pour ce faire il adoptera les techniques *ad hoc* à la fois au champ et en chai. Ces techniques couvrent notamment : le choix du cépage et du porte-greffe, la taille et l'effeuillage, l'enherbement inter-rangs et sa gestion... Un élément essentiel sera d'optimiser la contrainte hydrique.

Facteurs de l'environnement physique

Le climat L'étude du climat en viticulture se discrétise en trois échelles d'espace et de temps (VAN LEEUWEN & G. SEGUIN, [2006] DELOIRE, VAUDOUR, V. A. CAREY *et al.*, [2005]) :

- Le macroclimat (échelle espace-temps : 10^2 m - décennie) est le climat régional : caractérisé par des séries de données mensuelles, saisonnières ou annuelles.
- Le mésoclimat (échelle km) : se définit à l'échelle d'un vignoble, de la journée à l'heure. Il reprend le topoclimat, influencé par la topographie via l'altitude, la pente, l'exposition ou la proximité de plans d'eau.

- Le microclimat (échelle cm/m) : relève du climat de l'environnement direct de la canopée des vignes, à l'échelle allant de la seconde à la minute. Il est influencé par les pratiques, la vigueur de la plante et les caractéristiques de la surface du sol.

La température tient un rôle très important. *Vitis vinifera* est une plante pérenne s'adaptant à une grande diversité de climats. Supportant jusqu'à -20°C en hiver, elle demande au minimum 1200 degrés jour pour arriver à maturité dans le cas des cultivars les plus précoces (VAN LEEUWEN & G. SEGUIN, 2006). La température ainsi que la photopériode sont fondamentales au développement phénologique ainsi qu'à la maturation de la vigne (JONES & DAVIS, 2000, VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008, ALVES *et al.*, p. d.). L'accumulation de chaleur requise pour atteindre un stade phénologique donné varie selon le cépage (PARKER *et al.*, 2011) et le porte-greffe ALVES *et al.*, p. d.). Pres de quatre-cent cépages, une trentaine de portes-greffes et un grand nombre de clones par cépage sont disponibles (PL@NTGRAPE, 2018).

Le déficit de chaleur sera une contrainte pour la culture à haute latitude. En effet, le vin produit à partir de raisins peu matures sera vert, acide et à faible contenu en alcool. A faible latitude, par contre, la maturité des vignes ne doit pas arriver trop tôt dans la saison, sous peine de réduire l'expression aromatique de ses baies (VAN LEEUWEN & G. SEGUIN, 2006). La période idéale de fin de maturation des baies se situerait entre mi-septembre et mi-octobre.

Le gel des organes reproducteurs après débourrement de la vigne (généralement entre avril et mai) doit être évité. En cas de gelées tardives, une taille tardive permettrait de retarder ce débourrement (OPUSVINS, 2018, DIENST, 2015).

La chaleur, donc, influence la maturité des raisins et la production de certains composés, notamment les proanthocyanidines (PASTOR DEL RIO & KENNEDY, 2006) qui apportent l'astringence des vins rouges. L'exposition solaire serait aussi importante pour l'accumulation de substances dans la baie (HASELGROVE *et al.*, 2000; PEREIRA *et al.*, 2006, SON *et al.*, 2009, SPAYD *et al.*, 2002). La distinction entre l'effet de la température et celui de l'exposition solaire est complexe à mettre en évidence, il semblerait que l'interaction des deux soit importante et que le résultat varie selon le contexte climatique (année plus fraîche ou plus chaude).

En termes de macroclimat, les étés doivent promettre suffisamment de chaleur et les hivers ne seront pas trop froids. Au sein d'une région, le mésoclimat joue un rôle dans le choix de la situation topographique de la parcelle (versant exposé, fond de vallée). L'hygrométrie pouvant induire un gel des plants (DIENST, 2015). Dans des régions plus fraîches, il est déconseillé de planter dans une cuvette. Concernant le microclimat, l'apport d'ombre ou de lumière aux grappes, dépendant directement de la vigueur de la plante conditionnera le profil chimique des baies.

Les précipitations jouent aussi un rôle primordial en viticulture,, vu l'impact de l'alimentation hydrique sur la composition de baie. Cet aspect sera développé plus loin.

Le sol La vigne est cultivée sur des sols variés. La production de vins de haute qualité sera favorisée sur des sols aptes à produire une contrainte hydrique et une vigueur modérée de la vigne. Les propriétés du sol (notamment : texture, porosité, teneur en azote) influencent l'alimentation hydrique, la nutrition minérale de la vigne, la profondeur d'enracinement et la température dans la zone racinaire (VAN LEEUWEN & G.

SEGUIN, [2006]. Certaines constantes peuvent être mises en avant. Par exemple : les sols calcaires sont connus pour produire des vins de haute qualité : le Chardonnay s'adapte tout particulièrement bien aux sols crayeux, alors que les sols gorgés d'eau sont moins adaptés.

Le vieil adage, *"la vigne doit souffrir pour produire des raisons de qualité"* (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, [2008]) ; recouvre la viticulture sous contrainte. Le contrôle de la vigueur de la vigne exerce un effet positif sur la qualité du vin (JACKSON & LOMBARD, [1993], VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, [2008], KOUNDOURAS *et al.*, [1997]) via une augmentation de la teneur en composés phénoliques, en sucre, en acidité titrable et en certains composés aromatiques dans le vin (DES GACHONS *et al.*, [2005], KOUNDOURAS *et al.*, [1997]). L'effet sera différent selon le cépage. Il est possible de contrôler la vigueur de la vigne en induisant chez elle un déficit hydrique et/ou azoté modéré (MATTHEWS *et al.*, [1987], VAN LEEUWEN, GOUTOULY *et al.*, [2006], VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, [2008], KOUNDOURAS *et al.*, [1997]). Par ailleurs, il est plausible qu'un haut statut azoté de la vigne augmente la probabilité d'un stress hydrique chez la vigne, en induisant une vigueur importante au début de la croissance qui rendra la vigne plus sensible à un stress hydrique (DES GACHONS *et al.*, [2005]). L'importance de l'eau pour la vigne sera développée dans la partie [3.2].

Outre son impact sur la réserve hydrique du sol, la texture impactera l'aération, le drainage, la température et la rétention de nutriments du sol (WHITE, [2003]). L'aération et la température du sol ont un effet prépondérant sur les racines de la vigne. La température du sol est affectée par son contenu en eau, vu la capacité calorifique de celle-ci. De plus, la charge caillouteuse à la surface du sol influence aussi le régime thermique du vignoble. Puit de chaleur en journée, les pierres la redistribuent durant la nuit (WHITE, [2003]), l'AOC Châteauneuf-du-pape en bénéficie grandement et cela contribue au prestige de ces vins.

L'effet du sol peut être tranché. Ainsi, les différents vins du Chablis se différencient par la position topographique et la différence de matériau parental. Ils sont présentés ici par ordre de qualité croissante. Le *Petit Chablis* est produit sur le plateau calcaire du Portlandien, exposé aux vents. Le Chardonnay y peine à atteindre sa maturité complète. Des Chablis de meilleure qualité y sont produits sur des marnes kimméridgiennes en pentes exposées sud à sud-est, l'exposition solaire compense le climat frais de la région. L'appellation *Chablis* est produite à flancs de coteaux et en début de plateau, les réputées appellations *Chablis Vieilles Vignes*, *Chablis 1er Cru Fourchaume* et *Chablis 1er Cru Homme Mort* étant produites sur le versant. Pour ces trois dernières, les différences tiennent à l'âge des vignes et aux propriétés physico-chimiques du sol (SEGUINOT, [2018], VAN LEEUWEN & G. SEGUIN, [2006]).

Une vision mouvante dans le temps

Aujourd'hui, un vin dit de terroir est gage de qualité. En était-il toujours ainsi dans la passé ? Dans le *"Dictionnaire d'Agriculture et de Viticulture"* de 1911 on lit : **"Terroir : Terrain considéré par rapport à la production agricole"** ainsi qu'une explication du goût de terroir, d'abord en général : *"Goût spécial et mal défini que l'on rencontre dans certains produits alimentaires d'origine végétale"*, puis plus particulièrement, en œnologie, *"se dit plus spécialement en parlant du vin, dont le goût de terroir, d'ailleurs très variable, peut-être dû à certaines matières organiques enfouies dans le sol, comme engrais, tourteaux, ou à certains ferments, pendant le cuvage. D'autre part, les goûts de terroir sont particulièrement accusés dans les terrains argileux et d'autant plus que l'argile s'y trouve en proportion élevée. On peut les atténuer par les*

soutirages au moyen de procédés spéciaux" (SELTENSPERGER, 1911). L'impact de la réserve en eau du sol n'est pas mis en exergue. L'importance du goût de terroir est associée à des sols particulièrement argileux, présentant une réserve en eau utile moindre que des sols limoneux. Il est aussi étonnant de lire que des méthodes pour atténuer le goût de terroir existent, alors que la vision d'aujourd'hui est de le laisser exprimer son potentiel.

De plus, malgré l'omniprésence du terme "terroir" dans le secteur viticole (recherche, dégustations, vendeurs, consommateurs, ...) c'est une notion controversée. Certains réfutent l'existence d'une "qualité de terroir" dans le vin, la considérant comme une notion socialement construite (CRENN & TECHOUEYRES, 2001, GADE, 2004) et non l'expression d'une "cause externe naturelle" (VAN LEEUWEN & G. SEGUIN, 2006). La difficulté qu'ont les scientifiques à définir des relations quantitatives entre les caractéristiques d'un terroir et du produit fini limite son acceptation unanime (WHITE, 2003). Les acteurs du monde du vin; producteurs, vendeurs et consommateurs, eux, sont largement convaincus de l'existence des qualités de terroir. C'est d'ailleurs ce concept qui permet la démarcation de zones viticoles par le système d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC). En réponse à ces considérations, des études sociologiques et économiques ont fait leur entrée dans le débat sur le terroir (TEIL, 2012).

3.2 L'importance de l'eau pour la vigne

La viticulture a ceci de particulier qu'elle se pratique sur une plante en dessous de l'optimum agronomique (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008). Différentes contraintes environnementales permettent de limiter la vigueur des vignes et augmenter la qualité du produit. La limitation de l'alimentation hydrique en est une. Elle provoque des effets négatifs (en limitant la photosynthèse via la fermeture des stomates) mais aussi des effets positifs (discutés plus loin). Lorsque le déficit hydrique est modéré, les effets positifs prennent le pas sur les négatifs (DES GACHONS *et al.*, 2005). KOUNDOURAS *et al.*, 1997 et VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008 précisent de plus que le moment d'apparition de la contrainte hydrique a son importance. Un déficit hydrique pré-véraison stimule davantage les effets favorables qu'un déficit après cette période.

La contrainte hydrique modère la vigueur de la vigne et induit une composition plus intéressante des raisins et *in fine* du vin (KOUNDOURAS *et al.*, 1997 VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008). Elle entraîne également un poids plus faible des baies à maturité et en une précocité du cycle phénologique. En effet, les racines explorant un sol en cours d'assèchement, produisent de l'acide abscissique, phytohormone favorable à la maturation du raisin. La contrainte hydrique réduit aussi la compétition pour les substances carbonées entre baies et apex (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008). Il est d'ailleurs coutumier d'écimer la vigne pour induire cet effet, la vigne se concentrant donc sur l'accumulation des sucres dans les baies qui sont, qui plus est, de taille réduite lors d'un déficit hydrique.

Généralement, les sols humides sont plus froids. Les baies arrivent donc à maturité tardivement. En climat frais, le choix d'un cépage *ad hoc* aidera à faire coïncider la période de croissance avec la période la plus chaude.

Les baies dont la vigne a été contrainte présentent une teneur en acide malique moindre (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008). Cet acide peut provoquer une seconde fermentation bactérienne non désirée, créant des vins instables. Les vins en Belgique ont générale-

ment une teneur en acide malique très importante. Pour la diminuer, les vignerons procèdent souvent à une fermentation malolactique, pratique habituelle pour les vins rouges (confère souplesse, rondeur et stabilité microbiologique) mais elle n'est pas automatique dans les vins blancs. Cependant, en climat froid, cela se pratique beaucoup sur vin blanc afin de limiter l'acidité du produit. Cela confère également des arômes lactés/beurrés au vin.

Sous contrainte hydrique, la concentration en sucres augmente, tout comme la teneur en polyphénols (anthocyanes et tanins majoritairement). L'évolution de ces concentrations avec le statut hydrique de la vigne est variable. Par exemple :

- l'augmentation de la teneur en sucres dans les baies augmente d'abord sous contrainte avant de chuter sous stress hydrique,
- la teneur en anthocyanes augmente linéairement.

Sachant que la teneur en sucres importe moins que la teneur en composés phénoliques pour la qualité du vin rouge, une contrainte hydrique forte permettra tout de même la production de vin de qualité. C'est ainsi que les cépages concernés admettent une large gamme de déficit hydrique sans diminution de la qualité du vin. Chez les vins blancs, une haute teneur en polyphénols implique de l'amertume et une couleur instable. Leur qualité dépend surtout de son potentiel aromatique. DES GACHONS *et al.*, [2005] ont étudié l'impact d'un déficit hydrique et azoté sur le potentiel aromatique du Sauvignon Blanc dans deux sols à réserves en eau utile (REU) contrastées pendant deux années très chaudes, la première avec de faibles précipitations durant la saison de croissance (1998), la seconde avec des précipitations élevées (1999). Les baies de plus haut potentiel aromatique (1998) provenaient des sols à REU élevée en 1998 et à REU faible en 1999. C'est le déficit hydrique modéré qui induit le potentiel aromatique le plus intéressant. Cela confirme le réputé déficit d'expression aromatique des vins blancs Bordelais des millésimes secs. Selon le climat ambiant un même sol aura donc un effet bénéfique ou non sur le potentiel qualitatif du vin. Cela confirme l'important de l'impact du climat sur le développement de la vigne et la composition des baies par rapport à celle du matériel végétal ou du sol (LEEUEWEN, FRIANT *et al.*, [2004]).

VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, [2008] soutiennent qu'il est fondamental en viticulture de déterminer l'étendue du déficit hydrique qui sera favorable à la qualité et le point où il deviendra délétère. Cela dépend du type de production, du rendement et des substances que l'on considère.

Le régime hydrique dépend des réserves en eau du sol, du climat et de l'architecture de la plante (DELOIRE, VAUDOUR, V. CAREY *et al.*, [2005]). L'alimentation hydrique de la vigne peut être étudiée au niveau du sol (établissement du bilan hydrique, détermination de la réserve en eau utile, ...) ou au niveau de la vigne (indicateurs physiologiques du statut hydrique de la plante). Le choix du matériel végétal (cépage et porte-greffe), des pratiques culturales et de l'entretien du sol permettent au viticulteur d'agir sur le régime hydrique de la plante. L'irrigation peut également être un facteur de qualité dans des conditions pédo-climatiques très sèches, mais constitue dans la plupart des situations, un facteur d'augmentation de rendement. L'offre hydrique naturelle (sans irrigation) est assurée par la REU calculée à partir de la courbe de rétention en eau du sol, la profondeur d'exploration racinaire et le mésoclimat (pluviométrie sur la parcelle) (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, [2008]). Cependant, la courbe de rétention ne permet pas de caractériser la temporalité du stock en eau utilisable par la plante, dont l'impact est majeur sur le statut hydrique de la vigne (KOUNDOURAS *et al.*, [1997], VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, [2008]). L'évaluation de la contrainte est alors passée par la détermination du statut hydrique de

la plante via la mesure d'"indicateurs physiologiques". La contrainte hydrique provoque des changements physiologiques chez la vigne, notamment des variations de la tension de la sève xylémienne, la fermeture stomatique et des modifications dans le déroulement de la photosynthèse (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008) et ceux-ci sont mesurables. Parmi les méthodes de détermination les plus répandues, on trouve :

- le potentiel foliaire, potentiel de base ou de tige
- les micro-variations de diamètre d'organes
- le débit de sève
- le débit de transpiration

Certaines de ces mesures mettent en évidence le statut hydrique instantané de la plante, mais l'extrapolation demande des mesures répétées. La discrimination isotopique du carbone 13 ($\delta^{13}\text{C}$) permet de contourner ce problème. Mesuré sur les sucres du moût, elle constitue un indicateur global de la contrainte subie par la vigne sur toute la période de maturation, ne nécessitant donc pas de mesures répétées sur le terrain (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008).

3.2.1 Les pratiques culturales influant sur le statut hydrique de la vigne

L'effet du déficit hydrique de la vigne sur le raisin sera dépendant du rendement (TREGOAT *et al.*, 2002). La limitation du rendement reste la protection la plus efficace contre les effets néfastes du stress hydrique. Cela permet d'avoir une surface foliaire assez faible sans altérer le ratio feuille/fruit. En effet, une grande surface foliaire augmente l'utilisation de l'eau du sol par la vigne. Par ailleurs, lorsqu'un stress hydrique sévère survient, une partie des feuilles peuvent tomber en réaction d'autopréservation pour la vigne (DES GACHONS *et al.*, 2005). Les viticulteurs observent très bien que les vignes éclaircies, c'est-à-dire pour lesquelles le viticulteur limite le nombre de grappes par pied, sont moins sensibles aux déficits hydriques sévères comparé à des pieds supportant un grand nombre de grappes. Cela peut aussi être anticipé, en plantant des porte-greffes résistants à la sécheresse (par exemple le 110 Richter) et/ou limitant le rendement du pied. Une faible alimentation en azote permet aussi une plus grande résistance au stress hydrique en réduisant la vigueur de la plante et donc ses besoins en eau via notamment la réduction de la surface foliaire (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008).

Dans le cas contraire, quand le sol et le climat ne permettent pas d'atteindre une contrainte hydrique, il faut augmenter la surface foliaire afin d'augmenter l'évapotranspiration réelle. Dans ce sens-là, l'enherbement est aussi une pratique courante, en prenant garde cependant de ne pas laisser les herbes montrer trop haut au niveau des plants car cela crée un microclimat plus humide plus propice aux maladies. Le choix du porte-greffe, lui, se portera vers un matériel qui valorise peu les réserves en eau du sol (par exemple : Riparia Gloire de Montpellier) (VAN LEEUWEN, VIVIN *et al.*, 2008).

3.2.2 L'impact du réchauffement climatique

L'effet le plus connu du changement climatique est l'augmentation de température globale et des périodes de sécheresse. La contrainte hydrique pourrait évoluer vers le stress hydrique récurrent. L'effet le plus manifeste sera la précocité phénologique de la vigne, déplaçant la phase de maturation vers les périodes estivales plus chaudes. Cela

affectera la composition des baies, surtout les composés aromatiques. Les conditions climatiques étant majeures dans le millésime (van LEEUWEN & DARRIET, 2016).

Les modèles prédisent une augmentation de la température entre 1°C et 3,7°C en 2050 selon la taux d'émission de gaz à effet de serre émis (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2014). Cette augmentation variera évidemment selon les régions. L'effet sur les précipitations et leur distribution est moins connu. Quoiqu'il en soit, le statut hydrique de la vigne dépend aussi de l'évapotranspiration, qui augmente avec la température. Le climat s'assèchera donc même si les précipitations ne diminuent pas. Le changement climatique augmenterait en outre le rayonnement et surtout les phénomènes climatiques extrêmes.

La précocité du cycle phénologique de la vigne n'aurait pas un impact négatif dans les climats plus frais. Débutant plus tôt dans la saison, la période de maturation s'allongerait et ce durant la période la plus chaude de l'année. Les raisins seraient plus mûrs et donc plus intéressants au niveau de leur composition. Ce scénario est déjà observé en Alsace et en Bordelais, où la date de vendanges a avancé de deux semaines depuis les années 1980. Par contre, la précocité du cycle phénologique aura un impact négatif dans les régions où l'augmentation de la période de maturation n'est pas nécessaire (régions méditerranéennes par exemple). Le raisin mûrit alors dans des conditions plus chaudes. La réduction de la teneur en anthocyanes due aux trop hautes températures aurait un effet négatif sur la qualité des vins rouges. En revanche, les hautes températures diminuent l'acidité (surtout la teneur en acide malique) et augmente la teneur en sucres des raisins. La température n'est certainement l'unique facteur, le rayonnement et la teneur en CO₂ peuvent également en être responsables (van LEEUWEN & DARRIET, 2016).

La modélisation du bilan hydrique pour un vignoble dans le Bordelais (van LEEUWEN & DARRIET, 2016) montre que, de 1952 à 2012, les années tendent à être de plus en plus sèches, pas en raison de la diminution des précipitations mais de l'augmentation de l'évapotranspiration. La qualité du millésime et le déficit hydrique sont très significativement corrélés entre eux pour ce vignoble. Dans le Bordelais, toutes les années sèches produisent de grands millésimes. Cependant, cette relation entre qualité et déficit hydrique ne peut être extrapolée à toutes les régions. Dans les régions très sèches, une augmentation du déficit hydrique induirait un stress hydrique important, néfaste pour la vigne.

Le rayonnement augmenterait également, particulièrement UV-B (280 à 320 nm). Celui-ci améliore la couleur et la production de flavonols et tannins dans les vins rouges. Dans les vins blancs, ils peuvent provoquer l'apparition de composés indésirables (van LEEUWEN & DARRIET, 2016).

Vraisemblablement, le réchauffement climatique aura un impact positif sur la viticulture belge, mais risque d'avoir des effets délétères à Terracuda. L'usage de certains porte-greffes et de cépages à maturité tardive peuvent retarder le cycle phénologique et accroître la tolérance à la sécheresse. Cela ne modifierait pas la typicité du vin. A long terme, la modification de l'encépagement et le choix des parcelles viticoles en fonction la REU du sol peuvent être des approches intéressantes. A court terme, une adaptation des pratiques culturales est souhaitable, en s'inspirant des régions méditerranéennes, qui depuis des siècles adoptent des pratiques promouvant la tolérance de la vigne à la sécheresse, en développant une stratégie. La diminution de la surface foliaire (diminution de l'évapotranspiration) et celle du rendement (photosynthèse moindre). Un système d'ir-

rigation peut également être mis en place prenant en compte l'impact environnemental, économique et social de cette pratique (van LEEUWEN & DARRIET, 2016).

3.3 L'eau dans le sol

Deux propriétés du sol sont primordiales pour le comportement de l'eau dans celui-ci : sa texture et sa structure, la première influençant grandement la deuxième.

La texture du sol

Elle se réfère à la taille des particules élémentaires, lesquelles sont réparties en trois fractions : la fraction argileuse (particules de diamètre équivalent à $< 2 \mu\text{m}$), limoneuse ($\varnothing = 2$ à $50 \mu\text{m}$) et sableuse ($\varnothing = 50$ à $2000 \mu\text{m}$). L'ensemble de ces fractions ($< 2 \text{ mm}$) est la terre fine. La distribution granulométrique influence la surface spécifique du sol, exprimée en unité de surface par unité de masse. Elle est d'autant plus élevée que la texture est fine. Ainsi un sol argileux développera une surface spécifique élevée, variant, pour une texture donnée, avec la nature de l'argile : $10\text{-}60 \text{ m}^2/\text{g}$ pour la kaolinite ; $750 \text{ m}^2/\text{g}$ pour la smectite (WHITE, 2003).

La structure du sol

Les particules élémentaires s'assemblent en agrégats de plus grande dimension (BIELDERS & JAVAUX, 2015). La constitution des agrégats ménage des vides ou pores permettant le stockage et le transfert des fluides (eau, gaz). Classiquement, on distingue : la macroporosité assurant la fonction de drainage (eau mobile dans le champ gravitaire), la mésoporosité assurant le stockage d'eau utile (EU), disponible pour la plante et la microporosité étant responsable de la rétention d'eau hygroscopique. L'importance relative de ces trois fractions répond globalement à celle des trois fractions texturales, respectivement : sable, limon, argile. D'autres facteurs interviennent, comme l'activité biologique, la teneur en matière organique... La rétention d'eau hygroscopique croît avec la surface spécifique : elle sera particulièrement importante dans les sols argileux à argile gonflante (smectite). Ces sols connaissent par ailleurs une dynamique de retrait-gonflement au cours de cycles dessiccation-humectation.

La dynamique de retrait/gonflement impacte énormément sur le comportement hydrodynamique du sol. Dans un sol non gonflant, la porosité est constante, seuls les volumes d'eau et d'air varient. Dans un sol gonflant, la porosité varie en fonction de la teneur en eau. L'importance de cette variation dépend de la teneur en argile gonflante. Ces sols sont difficiles à gérer sur le plan agronomique : très durs à sec et très plastiques en humide. Leur dynamique interne de retrait-gonflement influence par ailleurs le développement racinaire (sectionnement des racinelles au retrait ; anoxie au gonflement) et peut notamment favoriser la contrainte hydrique tant à la dessiccation qu'à l'humectation.

3.4 Caractériser l'eau du sol

La détermination de la courbe de rétention en eau du sol (CR) et de la conductivité hydraulique (CH) permettent d'évaluer quantitativement les fonctions de stockage de

l'eau et de drainage.

La mesure de la conductivité hydraulique est nécessaire pour solutionner l'équation de Richards (équation 4.8). On utilise des solutions numériques pour la déterminer, basées sur les caractéristiques de rétention en eau. Une ou plusieurs mesures de la conductivité hydraulique servent ensuite de "matching value" à cette prédiction. Des erreurs peuvent se glisser dans la fonction de conductivité hydraulique prédite, suite à des invalidités du modèle de prédiction ou souvent à une description erronée de la courbe de rétention. C'est pourquoi il est primordial de d'adopter le modèle adéquat pour caractériser la rétention.

3.4.1 Courbe de rétention en eau

L'application d'une charge matricielle (appelée ici succion ou tension) au sol saturé génère la vidange des pores, en commençant par les plus larges. L'augmentation progressive de la succion (h) induit de pores de plus en plus petits. A chaque valeur de h imposée la teneur en eau (θ) peut être mesurée. La courbe θ - h (teneur en eau-succion), appelée la courbe de rétention en eau du sol (HILLEL, 1971), est ainsi obtenue. Un des modèles les plus populaires de la relation θ - h est celui de van Genuchten-Mualem et c'est celui qui sera utilisé dans ce travail. Classiquement, h est exprimé en $\log_{10}$ de la hauteur d'eau en cm (pF). Deux valeurs de pF sont critiques :

- $pF=2.5-2.7$, associé à la capacité au champ CC (field capacity), ou θ_{CC} , teneur en eau d'un sol ressuyé après pluie saturante (θ_s);
- $pF=4.2$, point de fanaison permanent FP (wilting point), ou θ_{FP} , teneur en eau au point de fanaison.

On déduit, schématiquement :

- θ_s = porosité totale;
- $\theta_{CC} - \theta_{FP}$ = REU
- REU = réserve en eau utile pour la plante (mésoporosité);
- θ_{FP} = eau hygroscopique (microporosité);
- $\theta_s - \theta_{pF=1}$ = teneur en eau drainée par les macropores(indice macroporosité).

La limite de la macroporosité est sujet à discussion. Ici, nous avons opté pour la classification de taille des pores adoptée par la Soil Science Society qui prend comme référence celle proposée par BREWER, [1964]. Les macropores sont définis entre des diamètres de 5 mm à 0,075 mm (pour les macropores très fins). Nous nous sommes arrêtés à un pF de 1 pour caractériser cette macroporosité.

Le modèle de van Genuchten-Mualem

Il propose la formulation mathématique suivante :

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \times h)^n]^m} \quad (3.1)$$

avec θ_r la teneur en eau volumique résiduelle [%], θ_s la teneur en eau volumique à saturation [%], h la succion (qui est définie positive) [cm] et α , n et m des paramètres de forme. Le paramètre α indique la position du maximum de densité de pores. m et n déterminent la largeur des distribution de pores dans les pores fins et larges (DURNER, [1994]).

L'avantage du modèle de van Genuchten, par rapport à d'autres modèles (i.e. Brooks and Corey) que sa dérivée $d\theta/dpF$ soit continue et soit asymptotiquement égal à 0 vers les pores larges et très fin. Les extrêmes vers les pores étroits sont déterminés par le rapport

$m \times n$ et vers les pores larges par m/n . Cette équation de van Genuchten, comparée à différents modèles, offre un bon ajustement aux données expérimentales (DURNER, 1994).

A ce modèle de van Genuchten doit cependant être couplé le modèle de prédiction de Mualem pour estimer la conductivité. Ce dernier est défini par :

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3.2)$$

L'ensemble de l'équation de van Genuchten (3.1) et de la contrainte sur le couple m et n de Mualem (3.2) est appelé le modèle de van Genuchten-Mualem (vGM). La contrainte réduit la flexibilité du modèle de van Genuchten seul concernant la distribution des pores étroits et larges (par le rapport entre m et n fixé). Cela explique bien les données expérimentales pour de nombreux sols. Toutefois, pour certains sols à texture très fine, cela conduit à des tailles de pores exceptionnellement larges (DURNER, 1994).

La teneur en eau à saturation est mesurée expérimentalement. La teneur en eau résiduelle θ_r , est extrapolée à partir de la θ_{PF} déterminée expérimentalement. θ_r est très peu décisive quant aux applications pratiques, particulièrement lorsqu'on travaille sur la REU. Cependant, comme énoncé précédemment, c'est un paramètre important pour la modélisation de la courbe de conductivité.

L'hystérèse

La courbe de rétention en eau d'un sol diffère selon que l'on initie sa mesure sur un sol saturé (en dessiccation) ou sec (en humectation). A une succion donnée, la teneur en eau en est supérieure à celle mesurée en humectation (figure 3.2). L'hystérèse peut être due à (1) l'hétérogénéité géométrique des pores résultant sur l'effet "bouteille d'encre" (3.2), (2) la différence d'angle de contact, (3) l'air emprisonné dans les pores, le gonflement ou la rétraction du sol (HILLEL, 1971).

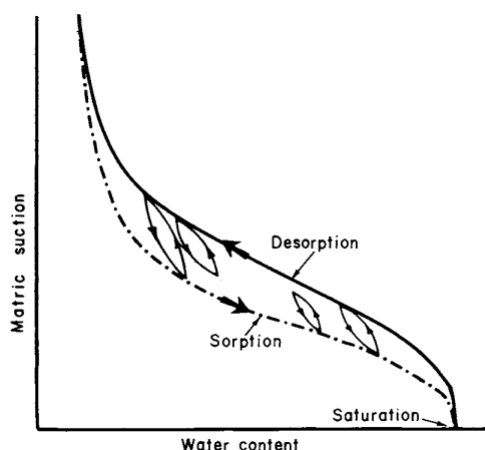


FIGURE 3.1 – Représentation du phénomène d'hystérèse sur une courbe de rétention théorique, obtenue soit en désorption (dessiccation) ou sorption (humectation). Succion matricielle en fonction de la teneur en eau. Les courbes intermédiaires entre les deux branches principales sont les "scanning curves". Source : HILLEL, 1971

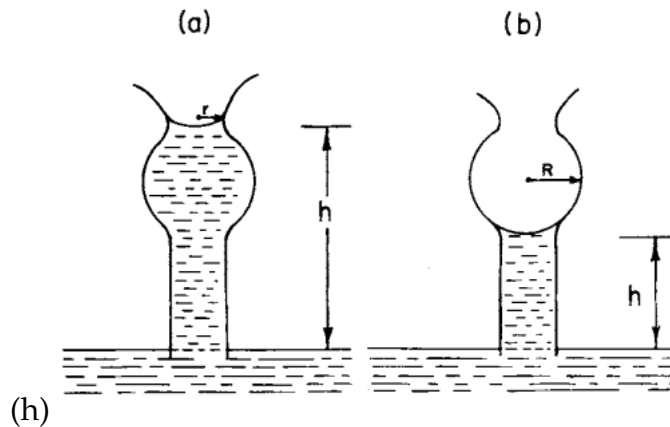


FIGURE 3.2 – Représentation théorique du phénomène de "bouteille d'encre". Il détermine la hauteur de l'eau à l'équilibre dans différentes tailles de pore en désorption (a) et sorption (b). Source : HILLEL, 1971

3.4.2 La conductivité hydraulique

La courbe de conductivité est estimée à partir des données de rétention en eau. DURNER, 1994 a montré que la formulation mathématique du modèle de rétention n'a pas d'influence sur la prédiction de la conductivité tant qu'il s'ajuste bien aux données.

Conductivité hydraulique dans un sol saturé en eau La conductivité hydraulique à saturation est directement dépendante de la macroporosité (pores visibles, anciens chemins racinaires, chenaux de ver de terre ou fentes). Au sein de celle-ci, l'eau est mobile dans le champ gravitaire.

Conductivité hydraulique dans un sol non saturé Le paradigme est très différent. Ce n'est plus la pression hydrostatique uniquement qui guide les mouvements de l'eau, mais la force matricielle également. En dessiccation, une partie des pores se remplissent d'air et ne peuvent plus conduire l'eau. Les pores les plus larges conduisent le mieux l'eau, mais ce sont aussi les premiers à se vider et à se remplir d'air. De ce fait, la conductivité hydraulique chute grandement de la saturation à l'insaturation. A saturation, les sols à porosité grossière conduisent mieux l'eau que ceux à porosité fine. Une fois que le sol se désature, les pores larges sont très vite vidés et deviennent non conducteurs. La conductivité peut chuter brutalement. Dans les sols à porosité plus fine, les pores ne se vident qu'à un état de succion plus élevé et peuvent continuer à conduire l'eau (HILLEL, 1971).

3.4.3 L'infiltration

L'infiltration de l'eau dans le sol influence l'importance du ruissellement.

La **vitesse d'infiltration** est le flux d'eau infiltrée dans le sol par unité de temps. Elle dépend du régime d'alimentation en eau, de l'humidité du sol et de ses propriétés. La **capacité d'infiltration** est le flux d'eau maximal que le profil de sol est capable d'absorber lorsque la surface est en contact avec de l'eau à pression atmosphérique (lors d'une pluie saturante p.ex.). L'eau s'infiltrera dans le sol tant que la capacité d'infiltration sera plus importante que l'apport d'eau à sa surface. L'**infiltration cumulée** correspond à l'intégrale en fonction du temps de la vitesse d'infiltration. La capacité d'infiltration du sol et

Type de sol	Infiltration à régime permanent (mm/h)
Sables	> 20
Sableux et limons grossiers	10-20
Limoneux	5 - 10
Argileux	1 - 5

TABLEAU 3.1 – Ordre de grandeurs de l'infiltration à régime permanent pour différents types de sol. Source : HILLEL, 1971

sa variation avec le temps dépendent de la teneur en eau initiale du sol et de la succion, mais également de la texture, structure, de sa conductivité hydraulique et l'uniformité du profil. Dans un premier temps, la capacité d'infiltration est grande, surtout lorsque le sol est sec, puis elle tend à diminuer et fini par tendre asymptotiquement vers un taux constant : *la capacité d'infiltration en régime permanent*. La diminution de la capacité d'infiltration peut provenir de la détérioration de la structure du sol : croûtes de battance, gonflement d'argiles ou piégeage de bulles d'air. Mais la raison première est la diminution du gradient matriciel, au fur et à mesure que le front d'humectation descend, jusqu'à ce que le gradient matriciel soit très faible et que le taux d'infiltration soit guidé par la gravité, devenant souvent presque égal à la conductivité hydraulique à saturation dans un profil homogène. Des ordres de grandeur de l'infiltration à régime permanent sont présentés au tableau 3.1 pour différents types de sol, mais ces chiffres peuvent grandement varier (HILLEL, 1971).

3.5 L'interaction sol-plante

Les racines des vignes peuvent descendre jusqu'à 6 m de profondeur, lorsque le sol est suffisamment profond et caillouteux. Le système racinaire se décline en deux types de racines : les racines "structurales", ligneuses, qui n'augmentent pas en nombre après la troisième année de plantation. Néanmoins, des racines de plus faible diamètre continuent à croître à l'horizontale et à la verticale à partir des racines structurales. Ces racines secondaires se situent entre 10 et 60 cm de profondeur et constituent la majeure surface d'absorption pour la vigne. L'environnement des racines doit présenter une disponibilité suffisante en eau et en oxygène, le sol doit être poreux et suffisamment meuble pour la pénétration des racines. En outre, un aspect important est de pouvoir travailler le sol dans différentes conditions de teneur en eau, avec des lourdes machines sans qu'ils ne subissent une compaction trop forte. Cela dépendra de la qualité de la structure du sol ainsi que de la gestion du vignoble (WHITE, 2003).

Chapitre 4

Matériel et méthode

4.1 Echantillonnage

4.1.1 Sélection des parcelles et des sites de mesure et d'échantillonnage

Les parcelles ont été sélectionnées selon le critère cépage pour vin blanc : d'une part, le Chardonnay pour les parcelles belges et, d'autre part le Bianchetto Del Metauro pour les parcelles italiennes. A Terracuda, la particularité des deux parcelles cultivées en Bianchetto est qu'elles sont vendangées et vinifiées séparément et qu'elles produisent des vins de qualités différentes. Les pratiques culturales étant équivalentes, comparer les deux parcelles du point de vue du sol a donc tout son sens. Concernant les parcelles belges, l'objectif était de trouver deux vignoble produisant du Chardonnay sur des terrains différents du point de vue du sol et de la contrainte hydrique.

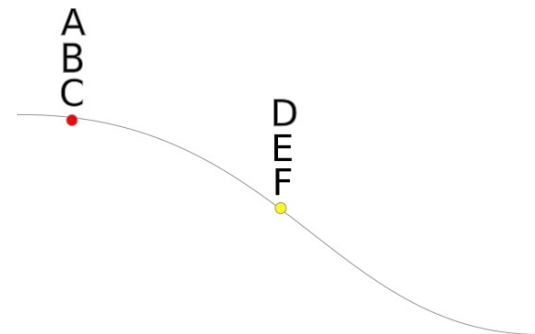
Un soin particulier a été pris afin de ne pas effectuer de mesures infiltrométriques ni d'échantillonner en bordure de parcelle et de répartir l'échantillonnage sur toute la zone d'intérêt, considérée comme homogène. L'échantillonnage de mottes, la prise d'échantillons en vrac et de cylindres Kopecki ont été effectués dans le rang, à proximité du site de mesure infiltrométrique.

Les parcelles Pianelli et Gilberto - Terracuda Pianelli présente une topographie plane et un profil très homogène (ENGELIN, 2016). Trois sites de sous-échantillons (A,B et C) ont été définis dans le sens de la largeur de la parcelle. Ils sont considérés comme des répétitions pour cette parcelle. Gilberto présentant une pente unidirectionnelle, l'échantillonnage a été fait selon une toposéquence : (1) sur le sommet convexe de la pente SC et (2) sur le versant plan P. Six sites d'échantillonnages sont définis, de A-C en SC et D-F en P. Ces trois sites par modalité de pente sont considérés comme des répétitions sur la zone d'intérêt (SC,P) considérée homogène.

Sites d'échantillonnage à Gilberto, Terracuda



(a)



(b) Description de la pente pour chaque site de Gilberto.

Sites d'échantillonnage à Pianelli, Terracuda



(c)

FIGURE 4.1 – Sites d'échantillonnages à Gilberto et Pianelli, Terracuda. Point rouge : sur le sommet convexe de la pente (SC). Point jaune : sur le versant plan (P). Point orange : sur la plaine alluviale.

Le vignoble X et le domaine des Marnières Le vignoble X présente une pente assez complexe, visible sur le schéma 4.2b. Le domaine des Marnières présente une pente unidirectionnelle. Pour ces deux parcelles, l'échantillonnage a été effectué selon une toposéquence SC-P. Quatre sites d'échantillonnages sont définis, de A à D, deux en SC (A,B) et deux en P (SC-P). Ces deux sites par modalité de pente constituent des répétitions pour chaque zone d'intérêt considérée homogène.



FIGURE 4.2 – Sites d'échantillonnages au Vignoble X. Point rouge : sur le sommet convexe de la pente (SC). Point jaune : sur le versant plan (P). Point vert : point supplémentaire uniquement pour le forage.

4.1.2 Les échantillons de sol

Trois types d'échantillons ont été prélevés : (1) des échantillons en vrac (déstructurés) (2) des cylindres kopecki de volume fixé (100cm^3) (voir figure 4.4) (3) des échantillons à structure conservée (motte). Pour chaque site, deux profondeurs ont été échantillonnées : entre 0 et 10 cm (en prenant garde de ne pas prendre les 2 premiers centimètres de sol) et entre 10 et 20 cm à partir de la surface. Les cylindres kopecki à raison de deux répétitions par profondeur, les mottes ont été prélevées en suffisance afin d'effectuer au moins trois répétitions par mesure, les échantillons en vrac en quantités suffisantes pour les analyses.

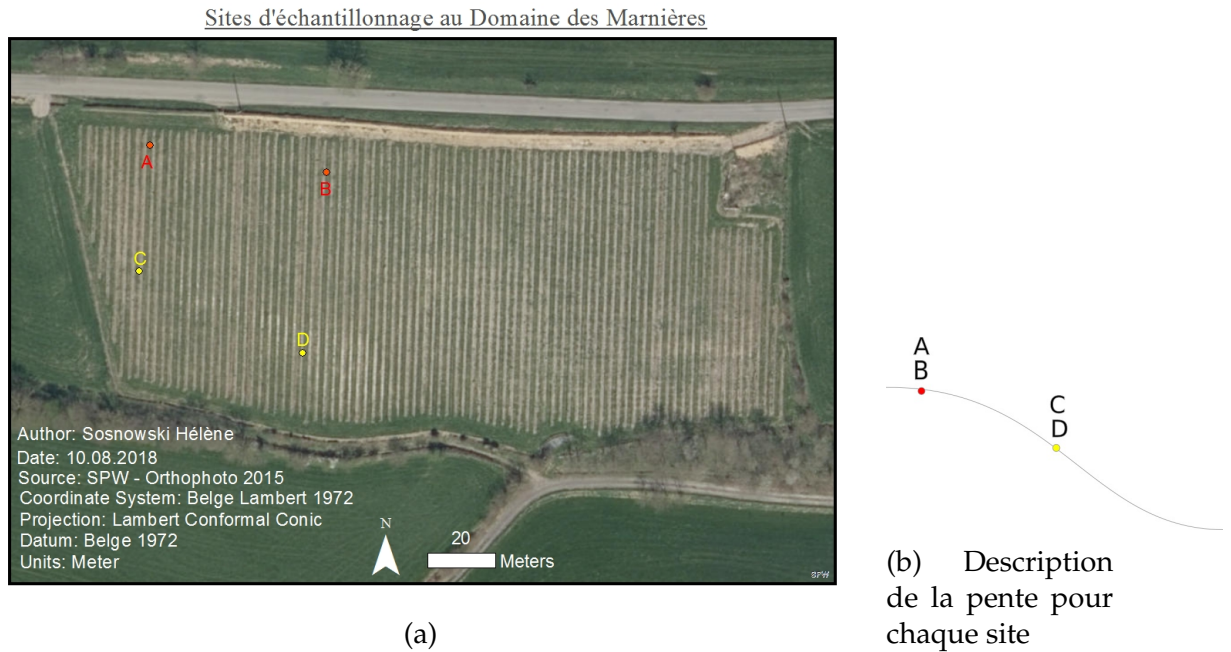


FIGURE 4.3 – Sites d'échantillonnages au Domaine des Marnières. Point rouge : sur le sommet convexe (SC) de la pente. Point jaune : sur le versant plan (P).

Les échantillons ont été prélevés dans le rang entre les pieds de vignes.



FIGURE 4.4 – Prise de cylindres kopeckis sur le terrain (il ne s'agit pas des sols étudiés dans ce mémoire).

Conservation des échantillons de sol Les cylindres kopecki et mottes ont été conservés en chambre froide. Les échantillons en vrac ont été séchés à l'air, broyés et tamisés à 2mm de manière à ne conserver que la terre fine. Ils sont ensuite conservés en chambre froide.

Code des échantillons Un code à 4 lettres a été donné aux échantillons. Les deux premières désignent la parcelle (X = Vignoble X, Ma = Domaine des Marnières, Pi = Pianelli, Gi = Gilberto). La troisième lettre est en majuscule et désigne le site d'échantillonnage (de A à F). La quatrième lettre est en minuscule et désigne la profondeur d'échantillonnage (a : entre 0 et 10 cm) et b : entre 10 et 20 cm)). Souvent dans ce document, le site d'échantillonnage ne sera pas mentionné, soit on passera directement à la profondeur d'échantillonnage, soit cette lettre sera remplacée par les acronymes de chaque modalité de pente : SC (sommet convexe) ou P (versant plan). Par exemple, Ma SC a est un échantillon pris aux Marnières, sur le sommet convexe de la pente à la profondeur a, Pi a correspond aux échantillons de Pianelli pris à la profondeur a.

4.1.3 Les forages

Les forages effectués en Belgique ont suivi la même logique que l'échantillonnage de sol initial, selon une toposéquence lorsque la parcelle présente une pente. La machine effectuant les forages rentre une gouge de 8 cm de diamètre par percussion. Une série d'observations sont effectuées in situ par les opérateurs présents [1](#). Des échantillons de terre en vrac ont été prélevés pour déterminer la teneur en eau des différents horizons de sol ainsi que la charge caillouteuse des horizons de surface dans le cas des Marnières. Les forages ont été réalisés en inter-rang.

4.2 Mesure des courbes de rétention

La courbe de rétention (CR) représente la teneur en eau du sol lorsque celui-ci est soumis à différentes succions. La succion est donnée en pF, défini par

$$pF = \log(-h) \quad (4.1)$$

avec h la tension en hauteur de colonne d'eau en cm (négative).

La teneur en eau est mesurée par gravimétrie. Pour la détermination de la courbe de rétention en désorption (ou dessiccation), les échantillons sont d'abord progressivement saturés. Ensuite, le sol est équilibré à différentes valeurs de pF. L'échantillon est alors pesé. Il est ensuite séché à l'étuve pendant 48h à 105°C. La durée de la mise en équilibre dépend du dispositif expérimental. Lorsque la courbe de rétention est réalisée en humectation, le sol sec est amené à l'équilibre pour chaque valeur de pF voulue. La teneur en eau massique du sol θ_m (%) est ensuite établie de la manière suivante :

$$\theta_m = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4.2)$$

avec M_h la masse humide et M_s la masse sèche de l'échantillon. La teneur en eau volumique θ_v (%) est usuellement utilisée car elle tient compte de l'éventuel changement de volume de l'échantillon (cas des sols gonflants).

Elle se calcule alors :

$$\theta_v = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times \rho_a \times 100 = \frac{M_h - M_s}{V_t} \times 100 \quad (4.3)$$

avec ρ_a la densité apparente du sol et V_t le volume total de l'échantillon.

1. le relevé des observations de terrain est disponible aux l'annexes [A.2](#) et [A.2](#)

Un graphe présentant la teneur en eau (volumique ou massique) en fonction du pF auquel le sol était soumis constitue la courbe de rétention du sol.

Deux dispositifs expérimentaux sont utilisés pour produire ces courbes de rétention (CR). Le premier utilise les cylindres kopecki et le second les mottes. Le tableau 4.1 récapitule les différents dispositifs utilisés pour les différents échantillons.

4.2.1 Détermination de la CR sur cylindres kopecki

Afin de couvrir l'ensemble des succions, trois dispositifs expérimentaux sont nécessaires : bac à sable (pF 0 à 1,84), casserole à basse pression (pF 2 à 3), casserole à haute pression (pF 3,5 et 4,2). On utilise les kopecki pour les deux premiers dispositifs ; des mottes et des "boues" pour le dernier.

Les échantillons sont saturés en eau avant d'être placés dans le premier dispositif. C'est donc une CR en désorption (dessiccation, drainage) qui est mesurée.

La saturation en eau des kopecki La base du cylindre est enrobée dans une toile afin d'éviter toute perte de terre. Le cylindre est placé dans le bac à saturation auquel est relié un vase de Mariotte (charge hydraulique constante). La saturation est effectuée avec une solution diluée CaSO_4 0,05M pour éviter la dispersion.

Le bac à sable Il est rempli d'une couche de sable surmontant une couche d'argile. Le tout est recouvert d'un tissu à maille serrée sur lequel sont placés les cylindres kopecki (2 répétitions). L'assemblage est relié à une colonne d'eau pour appliquer la succion voulue. L'ensemble sable + argile + tissu établit le lien entre le kopecki et la colonne d'eau.

La casserole basses pressions Au lieu d'appliquer une succion on exerce une pression. Les kopecki sont posés sur une plaque poreuse à travers laquelle s'écoule l'eau drainée. Une étamine et une couche de kaolin sont placés au bas du cylindre.

A l'équilibre, les cylindres sont pesés frais et ensuite, après séchage à 10°C pendant 48h. La teneur en eau volumique est calculée, le volume du kopecky étant connu.

La casserole hautes pressions Ce dispositif fonctionne exactement selon le même principe que le précédent. Pour les échantillons italiens, des mottes ont été utilisées pour mesurer la densité apparente en raison du caractère gonflant des sols.

Seule la porosité texturale étant concernée à ces valeurs de pF (3,5 et 4,2), L'utilisation d'échantillons déstructurés permet de gagner du temps d'équilibrage. Ces échantillons sont utilisés pour les sols belges.

Les mottes D'un volume proche de 8-10 cm³, elles sont placées sur la plaque poreuse sur un lit de kaolin pour assurer le contact. L'apport d'eau s'effectue progressivement à la base. A l'équilibre, l'échantillon est pesé. La densité apparente est mesurée par poussée d'Archimède dans le pétrole (voir section 4.3.1), puis l'échantillon est pesé après séchage à 105°C pendant 48h.

Les échantillons déstructurés (vrac) Préalablement séché, broyé et tamisé à 2mm, ils sont ensuite mélangés à la solution CaSO_4 0,05M jusqu'à l'obtention d'une boue, placée sur la plaque poreuse entourée d'un anneau. A l'équilibre, poids "frais" et sec sont mesurés comme précédemment. La teneur en eau volumique est calculée avec la densité apparente mesurée sur kopecki ou mottes selon les sols.

	pF	pF	Temps d'équilibrage (jours)		
	théorique	pratique	Terra Cruda	Vignoble X	Marnières
Saturation	/	/	14	7	/
Bac à sable	0	0	7	8	/
	1	1	7	7	/
	1,5	1,49	7	7	/
	2	1,84	7	7	/
Casserole BP	2	2	12	12	/
	2,5	2,477	11	10	/
	3	3	10	12	/
Casserole HP	3,5	3,49	20	20	20
	4,2	4,2	20	20	20

TABLEAU 4.1 – Valeurs de pF et temps d'équilibrage par dispositif pour les CR en dessiccation. BP = basses pressions, HP = hautes pressions

4.2.2 Détermination de la CR sur mottes

Le dispositif permet d'exercer une pression via une différence de hauteur d'eau. Pour chaque succion, neuf cylindres contenant chacun une motte sont mis en place selon les modalités visibles sur le schéma (figures 4.5 et 4.6). De la base du cylindre vers la motte, on observe :

1. une **plaque poreuse** préalablement saturée en eau,
2. un **filtre millipore**, préalablement saturé en eau ,
3. une couche de **kaolin** saturée sur laquelle sera placée la **motte** afin d'assurer le continuum motte-eau,
4. un **joint** en caoutchouc permettant une bonne étanchéité à l'eau et à l'air du système.

L'ensemble des cylindres contenant les mottes est placé dans un bac contenant de l'eau libre. Les mottes sont équilibrées durant minimum 5 jours.

Ce dispositif permet de mesurer la CR en dessiccation ou en humectation.

Préparation des mottes conservées en chambre froide, des mottes d'environ 5 à 15 cm^3 sont prélevées en prenant garde d'enlever la terre lissée ou déstructurée sur les bords. Pour les mottes en quantités plus faibles, des agrégats plus petits ont été choisis (exceptionnellement jusqu'à 2 cm^3)

Mesures Après cinq jours d'équilibrage, les mottes sont retirées du dispositif. Le kaolin évacué. Après mesure du poids frais, la motte est saturée dans du pétrole durant 24h

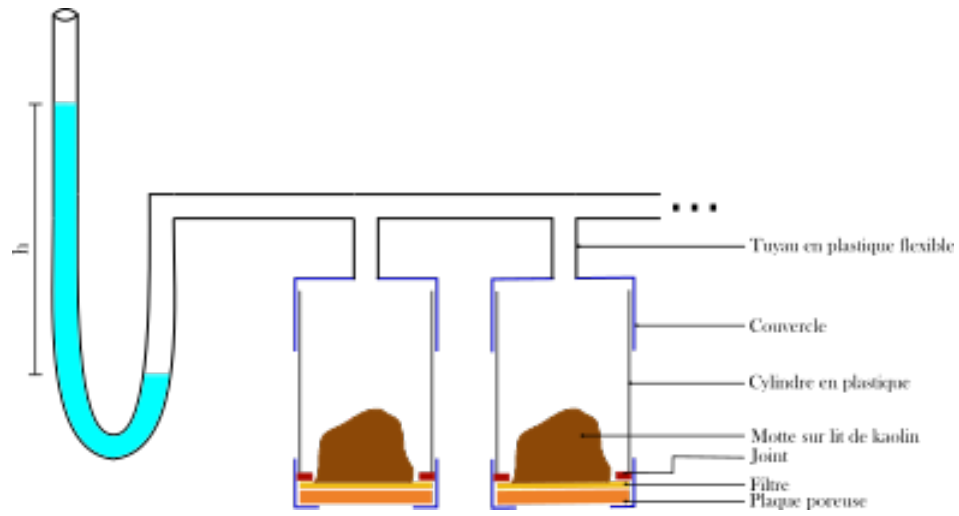


FIGURE 4.5 – Schéma d'une coupe longitudinale du dispositif mottes (cellule pF)



FIGURE 4.6 – Illustration du dispositif au laboratoire SOLS

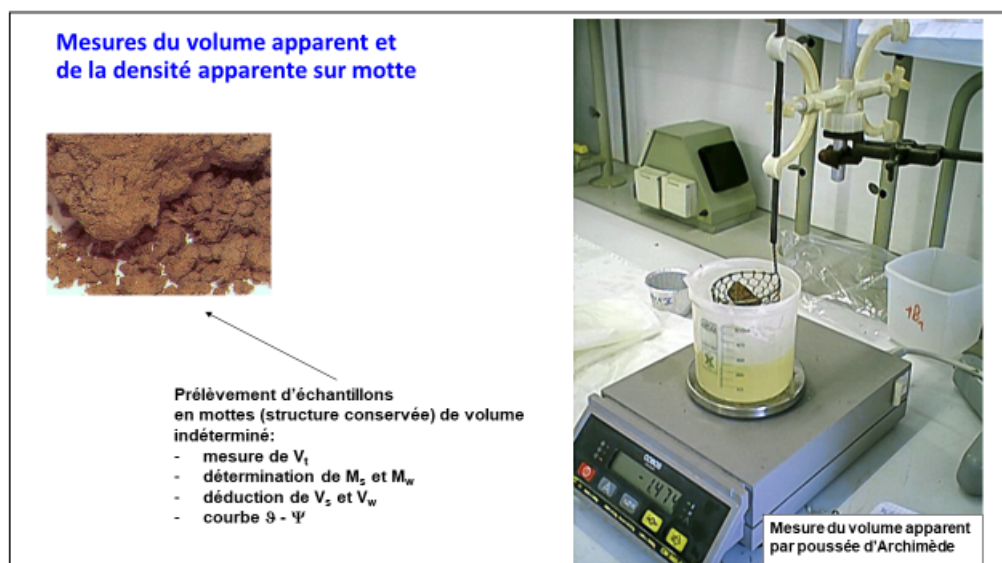


FIGURE 4.7 – Prélèvement d'agrégats et mesure du volume de mottes individualisées par poussée d'Archimède dans le pétrole

minimum. Une mesure du volume de la motte dans le pétrole est effectuée par poussée d'Archimède (figure 4.7). Les mottes sont ensuite séchées à 105°C pendant 48h puis pesées.

4.2.3 Récapitulatif des expériences faites pour chaque sol

Les sols de Terracruda

Les propriétés de gonflement-retrait des sols argileux smectitiques de Terracruda requièrent la mesure du volume apparent en fonction du potentiel hydrique h sur des mottes prélevées en structure conservée. La CR a été déterminée sur mottes en humectation et sur kopeckis en dessiccation. Ces derniers avaient été prélevés frais mais non saturés. La densité apparente des kopekhi à saturation a été mesurée. Nous avons ensuite déterminé l'augmentation de la densité apparente des mottes selon le pF via une tendance linéaire (5.1) et appliqué cette augmentation à la mesure de densité apparente des kopeckis à saturation, sous l'hypothèse que l'augmentation de la densité apparente est égale en proportion quelle que soit le type de courbe (motte ou kopecki). Cela est sujet à discussion, compte tenu des effets de l'hystérèse.

Les mesures en casserole haute pression ont été effectuées sur motte afin de suivre l'évolution de la densité apparente aux valeurs de pF les plus élevées. Les mesures en casserole haute pression sont toujours faites en dessiccation.

Les sols du vignoble des Marnières

Ces sols ont une charge caillouteuse très élevée par endroits (1 à 42 %). Cela rend le prélèvement de kopeckis impossible et peu pertinent (présence de graviers au sein du volume de sol prélevé). La méthode mottes a donc été appliquée pour ces sols. Les échantillons prélevés étant saturés, la CR est mesurée en dessiccation. Pour la casserole haute pression, les échantillons en boues ont été utilisés.

Détermination de la charge caillouteuse Les forages ont permis de prélever l'ensemble du matériau entre 0 et 10 cm et 10 et 20 cm. La connaissance de la masse de sol prélevée (frais et sec) rapportée au volume de la gouge de section (= 80 mm) et hauteur connus permet de déterminer la valeur de la densité apparente par une troisième méthode. Après tamisage à 2mm et mesure du refus (% d'éléments grossiers), la charge caillouteuse a pu être déterminée.

$$M_{\text{terre}} = M_{\text{total}} - M_{\text{refus}}$$

$$V_{\text{terre}} = M_{\text{terre}} \times M_{\text{terre}}$$

$$V_{\text{refus}} = V_{\text{total}} - V_{\text{sol}}$$

$$\text{ChargeCaillouteuse} = \frac{V_{\text{refus}}}{V_{\text{total}}}$$

On peut ensuite tenir compte de celle-ci pour calculer la teneur en eau volumique :

$$\theta_v = \theta_m \times \rho_a \times (100 - \text{ChargeCaillouteuse}) \quad (4.4)$$

Les sols du vignobles X

La CR est mesurée sur kopecki. Pour la casserole haute pression, les échantillons en boues ont été utilisés.

4.3 Mesure de la densité apparente

La densité apparente se calcule comme suit :

$$\rho_a = M_s / V_t \quad (4.5)$$

avec V_t le volume total de sol [cm^3]. Les kopeckis ont un volume total connu de 100 cm^3 . Le volume total des mottes n'est pas connu, il est mesuré par poussée d'Archimède dans le pétrole (cf 4.3.1).

4.3.1 Mesure du volume total des mottes

Il est mesuré par poussée d'Archimède dans le pétrole (4.7) d'une motte de θ_v fixée par équilibration préalable équilibrée à une valeur donnée de pF (??) :

$$V_t = P_a / \rho_p \quad (4.6)$$

où V_t est le volume total de la motte (volume apparent), avec P_a la poussée d'Archimède [N] et ρ_p la densité du pétrole ($0,782 \text{ g/cm}^3$).

4.4 Infiltrométrie à succion contrôlée

Un infiltromètre à disque déporté (figures 4.8 et 4.9a) permet de mesurer le volume d'eau infiltrée dans un sol non saturé par unité de temps. La succion est appliquée à la surface du sol via le disque déporté. L'appareil est muni de deux colonnes : un réservoir d'eau et un vase de Mariotte. Celui-ci crée la succion h imposée grâce au tube d'entrée ajustable via la hauteur h_M (figure 4.8). La succion est transmise au disque grâce au tuyau qui relie le vase de Mariotte à la base du réservoir d'eau. Elle se calcule comme suit :

$$h = h_M + h_D \quad (4.7)$$

avec $h_M < 0$ (tension). $h_D > 0$ (pression) lorsque la base du disque se situe plus bas que l'arrivée du tuyau de transmission de succion dans le réservoir d'eau, $h_D < 0$ (tension) si la base du disque est plus haute que l'arrivée dudit tuyau.

La préparation requiert une saturation du dispositif : toute éventuelle bulle d'air doit être évacuée. Le disque est recouvert d'une membrane poreuse de nylon ($= 20\ \mu\text{m}$, la rendant imperméable à l'air. L'unique entrée d'air se situe donc au niveau du tube de Mariotte. Le site de mesure est préparé soigneusement (figure 4.9a). Le sol est mis à nu en prenant garde de ne pas arracher mais couper les racines. L'espace est soigneusement aplani afin d'obtenir un contact optimal entre le disque et le sol, une couche de sable de maximum 5 mm est ajoutée afin d'améliorer encore ce contact.

Le dispositif étant en fonction, l'eau s'écoulera du réservoir gradué au sol via le disque, à la succion choisie. Selon celle-ci, l'eau ne s'écoule que dans les pores de diamètre inférieur à celui défini par la loi de Jurin. Les opérateurs relèvent les centimètres d'eau écoulés du réservoir gradué au sol en fonction du temps (figure 4.9b). Pour une succion donnée, la mesure est accomplie lorsque la hauteur d'eau écoulée est constante pour un intervalle de temps fixe. L'infiltration de l'eau dans le sol est mesurée à plusieurs valeurs de succion.

Plusieurs mesures ont été effectuées sur chaque site de mesure, à chaque fois, entre 2 et 4 succions ont été appliquées permettant une comparaison des résultats, ces succions sont reprises à l'annexe A.1

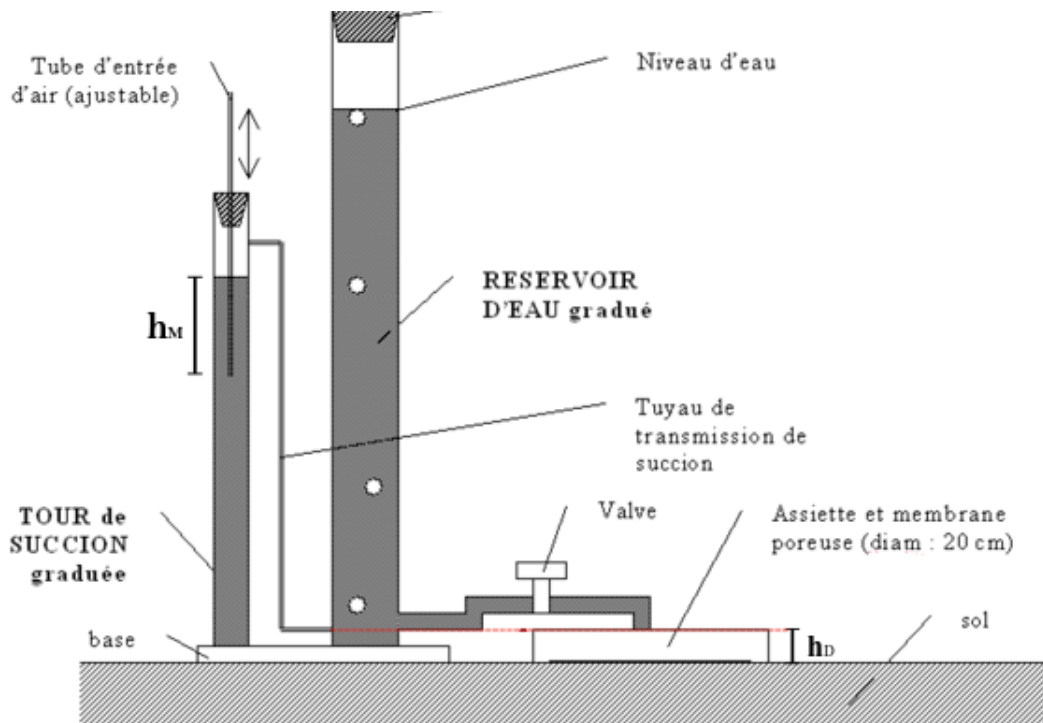


FIGURE 4.8 – Schéma du dispositif d'un infiltromètre à succion à disque déporté. Adapté à partir des notes de TP6 du cours LBRES2102 (LAMBOT & VANCLOOSTER, 2012)



(a) Illustration du dispositif infiltrométrique au champ : (1) nivellement de la surface, (2) installation du lit de sable, (3) dispositif installé pour la mesure.



(b) Installation du dispositif et mesure par les opérateurs.

FIGURE 4.9

4.4.1 Traitement des données

Les courbes de volume cumulé d'infiltration en fonction du temps (infiltration cumulée) pour chaque sol ont été établies. Les données sélectionnées sont traitées grâce au programme DISC, logiciel spécialement créé pour le traitement des mesures prises par infiltromètre à disque. L'output sera les courbes de conductivité hydraulique des sols. Les paramètres à entrer dans ce logiciel sont les suivants :

- rayon du disque de l'infiltromètre (10 cm)
- teneur en eau volumique du sol avant les mesures θ_i [%]
- teneur en eau volumique du sol après les mesures θ_f [%]

θ_i est déterminée expérimentalement. θ_f est connue grâce à la CR modélisée (avec le logiciel RETC) via le modèle de vGM ajusté aux courbes expérimentales. La succion appliquée lors de la mesure finale d'infiltrométrie étant fixée, la teneur en eau volumique

correspondante est utilisée.

Les données d'entrée sont d'une part l'infiltration cumulée et, d'autre part les valeurs de la succion appliquée. Le volume d'infiltration cumulé correspond au volume d'eau infiltré lorsque le réservoir d'eau perd une certaine hauteur d'eau x : $\pi \times \text{rayon du réservoir}^2 \times \text{hauteur d'eau écoulee du réservoir}$. Les derniers paramètres requis sont ceux du modèle de vGM (courbes modélisées via le programme RETC).

RETC Ce logiciel permet d'ajuster des courbes de rétentions selon différents modèles à des données expérimentales. Dans ce travail, seul le modèle de vGM sera utilisé.

DISC L'analyse des données de l'infiltromètre à disque est effectuée sur le logiciel DISC (suite PC-Progress) en solutionnant numériquement une version modifiée de l'équation de Richards :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{r} \times \frac{d}{dr} \left(r \times K(h) \times \frac{dh}{dr} \right) + \frac{d}{dz} \left(K(h) \times \frac{dh}{dz} \right) - \frac{dK}{dz} \quad (4.8)$$

avec $K(h)$ la conductivité hydraulique [cm/s], r la coordonnée radiale [cm], z la coordonnée verticale [cm] et t est le temps [s].

Les propriétés hydrauliques du sol sont calculées avant l'application de la solution numérique de Richards, via les fonctions de van Genuchten :

$$S_e(h) = \frac{\theta_h - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + |\alpha \times h|^n]^m} \quad (4.9)$$

$$K(\theta) = K_s \times S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (4.10)$$

S_e est la saturation effective du fluide (-), l est le paramètre de tortuosité ou de connectivité des pores (-). Il a été montré que $l = 0,5$ se trouve être optimal pour une grande gamme de sols (MUALEM, 1976).

Ensuite, DISC, muni des données de paramètres de rétention et de la conductivité hydraulique, ajuste une courbe d'infiltration cumulée à celle donnée en input.

4.5 Analyses statistiques

Des analyses de la variance sont réalisées sur les données de densité apparente, REU et autres indicateurs liés à la courbe de rétention. Elles sont effectuées à l'aide du logiciel SAS University Edition au moyen de la procédure GLM (préférée à la procédure ANOVA lorsque les données ne sont pas balancées, c'est-à-dire qu'elle ne présentent pas le même nombre de données par combinaison de facteurs). L'étude concerne l'influence, sur la densité apparente, REU ou différents teneurs en eau ou indicateurs liés, des paramètres suivants : parcelle, pente, profondeur d'échantillonnage, méthode détermination de la CR et pF. L'hypothèse nulle de chaque test sera rejetée lorsque la p-valeur est inférieure à 0,05. L'effet sera considéré comme très hautement significatif lorsque la p-valeur est inférieure 0,001. Un ajustement de Tukey est ensuite réalisé pour déterminer les différences de valeurs moyennes entre les diverses modalités des facteurs.

Les différentes procédures GLM analysées sont listées ci-dessous :

1. **GLM1 - Densité apparente** : Pour les différentes parcelles (X/Ma/Pi/Gi) on étudie les effets des paramètres suivants : parcelle, profondeur d'échantillonnage, l'interaction entre les deux, la pente et la méthode.
2. **GLM 2- Densité apparente** : Pour Pianelli, une analyse est réalisée en reprenant uniquement les valeurs de densité apparente mesurées sur mottes. Les effets de la profondeur, du pF et de l'interaction entre les deux est étudié.
3. **GLM 3- Densité apparente** : Pour Pianelli, une analyse est réalisée sur les valeurs de densité apparente mesurées sur kopecki et mottes à un pF donné. Les effets de la méthode de mesure, de la profondeur et de l'interaction entre eux sont étudiés.
4. **GLM 4- Densité apparente** : Pour Gilberto, une analyse est réalisée en reprenant uniquement les valeurs de densité apparente mesurées sur mottes. Les effets de la pente, de la profondeur, du pF et de l'interaction entre les deux sont étudiés.
5. **GLM 5- Densité apparente** : Pour Gilberto, une analyse est réalisée sur les valeurs de densité apparente mesurées sur kopecki et mottes à un pF donné. Les effets de la pente, de la méthode de mesure, de la profondeur et de l'interaction entre ces deux derniers sont étudiés.
6. **GLM 6 - Densité apparente** : Pour les Marnières, on analyse la densité apparente selon les facteurs pF, profondeur, l'interaction entre les deux et la pente.
7. **GLM 7 - REU** : Pour l'ensemble des parcelles, la REU a été analysée. Les facteurs analysés sont : la parcelle, la profondeur, l'interaction entre les deux, la pente selon la parcelle et la méthode selon la parcelle.
8. **GLM 8 - REU** : Pour l'ensemble des parcelles, la REU a été analysée. Les facteurs analysés sont : la parcelle, la profondeur d'échantillonnage, l'interaction entre les deux, la pente selon la parcelle et la méthode selon la parcelle et la profondeur.
9. **GLM 9 - Porosité X** : étude de la porosité totale, de l'indice de macroporosité (défini à la section 6.6) et des θ_v aux pF 1, 2,5 et 4,2 selon la profondeur, la pente et l'interaction entre les deux pour le Vignoble X.
10. **GLM 10 - Porosité Marnières** : étude de la porosité totale, de l'indice de macroporosité et des θ_v aux pF 1, 2,5 et 4,2 selon la profondeur, la pente et l'interaction entre les deux pour le Vignoble Ma. Les données utilisées sont celles auxquelles n'a pas été ajoutée la charge caillouteuse.
11. **GLM 11 - Porosité Italie kopecki** : étude de la porosité totale, de l'indice de macroporosité et des θ_v aux pF 1 et 2,5 pour les données mesurées sur les kopecki pour les parcelles italiennes. Ces variables sont étudiées selon la profondeur, la parcelle, l'interaction entre les deux et la pente selon le vignoble.
12. **GLM 12 - Porosité Italie mottes** : étude de l'indice de macroporosité et des θ_v aux pF 1, 2,5 et 4,2 pour les données mesurées sur les mottes pour les parcelles Italiennes. Ces variables sont étudiées selon la profondeur, la parcelle, l'interaction entre les deux et la pente selon le vignoble.

Des régressions ont également été réalisées et sont listées ci-dessous :

1. REG 1 : Régression linéaire entre la REU des Marnières et la charge caillouteuse des sols.

Les codes des différentes procédures GLM et des régressions sont visibles à l'annexe B 14. Tous les résultats seront systématiquement repris à l'annexe B. Comme les données ne sont pas balancées, c'est-à-dire que chaque combinaison de modalité ne présente pas un même nombre de mesures, l'analyse de la procédure GLM s'effectue via le "sums of squares" de type III.

Chapitre 4. Matériel et méthode

Les corrélations étudiées entre facteurs le sont via le procédure REG (régression linéaire) du logiciel SAS University Edition.

Chapitre 5

La densité apparente (ρ_a)

Les résultats des analyses statistiques SAS sont repris aux annexes B (codes listés à l'annexe B14).

5.1 Valeurs de ρ_a des sols italiens

Les valeurs moyennes de ρ_a sont présentées au tableau 5.1. Globalement, elles sont comprises entre 1,29 et 1,65 g/cm³. L'examen du tableau montre que, pour chaque site échantillonné, la densité apparente augmente avec le pF. En effet, de pF=1 à pF=4,2, on observe la variation suivante :

- Pianelli-a : de 1.29 à 1.44 g/cm³;
- Pianelli-b : de 1.41 à 1.50 g/cm³;
- Gilberto-SC-a : de 1.40 à 1.53 g/cm³;
- Gilberto-SC-b : de 1.56 à 1.59 g/cm³ (1.64 et 1.63 à pF=2.5 et 3);
- Gilberto-P-a : de 1.40 à 1.53 g/cm³;
- Gilberto-P-b : de 1.54 à 1.61 g/cm³ (1.65 à pF=3)

La diminution du volume apparent en dessiccation révèle une dynamique de retrait liée à la texture de ces sols argileux et à la dominance de smectite dans la fraction argileuse. Pour certains échantillons, la diminution de la densité apparente à partir de pF = 3,5 peut s'expliquer par le changement de dispositif expérimental (casserole haute pression). Les teneurs en eau à pF 3,5 et 4,2 sont déterminées en dessiccation et celles pour les autres valeurs de pF en humectation. La teneur en eau en dessiccation est systématiquement plus importante qu'en humectation, il est donc logique d'observer une rétraction moins importante.

Parcelle	Pente	Profondeur	pF	ρ_a (g/cm ³)	Ecart-type
Pianelli	PL	a	1	1,29	0,094
			1,5	1,37	0,116
			2	1,40	0,214
			2,5	1,42	0,069
			3	1,47	0,121
			3,5	1,40	0,067
			4,2	1,44	0,056
		b	1	1,41	0,076
			1,5	1,42	0,076
			2	1,42	0,100
			2,5	1,43	0,015
			3	1,47	0,101
			3,5	1,48	0,049
			4,2	1,50	0,046
Gilberto	SC	a	1	1.40	0,138
			1,5	1.44	0,148
			2	1.38	0,165
			2,5	1.36	0,123
			3	1.58	0,033
			3,5	1.44	0,162
			4,2	1.53	0,152
		b	1	1.56	0,038
			1,5	1.57	0,044
			2	1.58	0,041
			2,5	1.62	0,078
			3	1.63	0,078
			3,5	1.58	0,126
			4,2	1.59	0,087
	P	a	1	1.43	0,088
			1,5	1.45	0,078
			2	1.47	0,125
			2,5	1.53	0,069
			3	1.48	0,143
			3,5	1.55	0,062
			4,2	1.53	0,073
		b	1	1.54	0,048
			1,5	1.57	0,033
			2	1.60	0,049
			2,5	1.59	0,047
			3	1.65	0,054
			3,5	1.59	0,035
			4,2	1.61	0,052

TABLEAU 5.1 – Valeurs moyennes de la densité apparente des sols italiens, mesurée sur mottes, selon la position dans la pente (PL = plaine, P = versant plan, SC = sommet convexe) et la profondeur d'échantillonnage (a = entre 0 et 10 cm et b = entre 10 et 20 cm). Mesures sur les mottes.

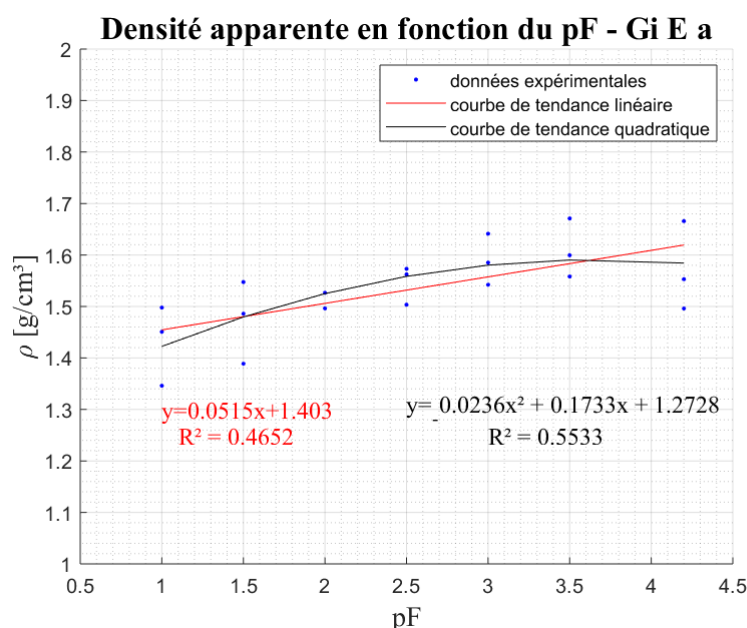


FIGURE 5.1 – Comparaison des tendances quadratique et linéaire représentant la variation de la densité apparente des mottes selon le pF pour le sol GiEa.

La variation de la densité apparente n'a pas été caractérisée sur les kopeckis. Pour pallier ce manque d'information, il a été décidé d'extrapoler la valeur de la densités apparentes mesurées sur mottes et d'utiliser les valeurs extrapolées aux mesures réalisées sur kopecki. Plusieurs modèles ont été testés (exponentiel, linéaire, logarithmique, polynomial et puissance) : le modèle quadratique est associé aux valeurs des R^2 les plus élevés¹. Vu le changement de dispositif, nous avons pourtant opté pour le modèle linéaire même si les R^2 sont moins élevés². Une comparaison des deux modèles est illustrée à la figure 5.1 pour Gilberto-E (position topographique P). Nous avons procédé de même pour tous les sites : les densités apparentes corrigées sont alors utilisées pour élaborer les courbes de rétention des sols italiens mesurées kopecki.

On observe pour certains sols une diminution de la densité apparente entre pF 1 et 4,2. Outre le changement de dispositif expérimental, il est possible que la mesure sur mottes sous-estime la macroporosité des mottes. En effet, lors de la préparation des mottes, elles cassent selon les fractures naturelles du sol, la macroporosité constitue un point sensible à la brisure des mottes et peu ainsi être réduite sur ces échantillons. Cette sous-estimation de la macroporosité aura un impact plus important à pF 1 qu'à pF 4,2 comme le gonflement augmente la macroporosité et la rétraction la diminue.

5.2 Analyses statistiques

Explication des facteurs étudiés

- *Parcelle* : Marnières (Ma), Vignoble X (X), Pianelli (Pi), Gilberto (Gi)
- *Profondeur* de prélèvement des échantillons (kopecki/motte) (a : entre 0 et 10 cm et b : entre 10 et 20 cm)
- *Profil de la Pente* : SC (sommet convexe), P (versant plan) ou PL (plaine).

1. Visibles, de même que les équations quadratiques correspondantes, à l'annexe A.3

2. Equations et R^2 repris à l'annexe A.2

- *Méthode* de mesure de la densité apparente. K est la méthode de détermination sur kopecki, M est la méthode de mesure sur mottes avec le dispositif au pétrole.
- pF auquel la densité apparente a été mesurée.

Vérification des hypothèses de travail La normalité et l'homoscédasticité des résidus sont des hypothèses de travail pour les procédures. La commande `plot = diagnostics` permet de les vérifier³.

Les graphiques 1 et 2 permettent de confirmer l'homogénéité des variances. Sur le graphique 1, l'ensemble des points doit être réparti de manière homogène de part et d'autre de la droite $y = 0$. Sur le graphique 2, 95% des points doivent être compris entre -2 et +2 (résidu de Student, c'est-à-dire le résidu divisé par son erreur standard).

Les graphiques 4 et 7 permettent de vérifier la normalité de la distribution. Sur le graphique 4, les points doivent suivre au mieux la droite représentée en ligne continue. Enfin, sur le graphique 7, l'histogramme doit avoir une allure de courbe normale (représentée en ligne continue sur le graphique) ou du moins avoir une allure symétrique.

Dans la suite du travail, lorsque les hypothèses sont vérifiées, une brève phrase en fera état, mais l'analyse de tous les graphiques en détail ne sera pas conduite, par soucis de concision. Ici, les hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance des résidus sont vérifiées pour l'ensemble des procédures GLM. La normalité des résidus est un peu moins prononcée pour la procédure "GLM5 - Densité apparente".

Représentativité du modèle de la variabilité des données Pour chaque procédure GLM, la premier tableau présente une p-valeur⁴, si elle est inférieure à 5%, alors le modèle représente significativement la variabilité des données. C'est le cas ici pour l'ensemble des procédures GLM, hormis la "GLM 6 - Densité apparente". Cela signifie qu'aucune variabilité analysable n'est observée dans le modèle, aucun des paramètres introduits n'expliquant les données.

5.2.1 L'ensemble des parcelles

Le tableau 5.2 présente les valeurs moyennes de ρ_a calculées pour chaque parcelle selon la méthode des moindres carrés par SAS (il s'agit en fait des moyennes marginales), quelle que soit la profondeur d'échantillonnage ou la méthode employée. Toutes les moyennes sont significativement différentes, à l'exception du couple Marnières-Pianelli.

Parcelle	ρ_a moyenne (g/cm ³)
Vignoble X	1.55
Gilberto	1.46
Pianelli	1.28
Les Marnières	1.26

TABLEAU 5.2 – Valeurs moyennes marginales des ρ_a pour chaque parcelle, calculées par SAS.

3. Ces graphiques sont repris à l'annexe B pour chaque procédure GLM, dans l'encadré titré "Fit Diagnostics for *nom de la variable*"

4. voir annexes B. La p-valeur concernée est celle de la ligne intitulée "model".

La procédure "GLM1 - Densité apparente" montre également que globalement, la valeur moyenne de la densité apparente est hautement et significativement plus faible pour la profondeur a que b ($p < 0,001$).

Il faut noter que la moyenne marginale, lorsque le jeu de données n'est pas balancé, peut être différente de la moyenne arithmétique. Les moyennes présentées au tableau 5.2 font donc office de "moyennes de comparaison" pour SAS, mais les moyennes arithmétiques de la densité apparente selon les différents vignobles sont différentes et présentées au tableau 5.3.

Parcelle	ρ_a moyenne (g/cm ³)	Ecart-type
Vignoble X	1.55	0,089
Gilberto	1.51	0,132
Pianelli	1.39	0,136
Les Marnières	1.26	0,141

TABLEAU 5.3 – Moyenne arithmétique des densités apparentes pour chaque parcelle.

Comme les différentes parcelles présentent des textures différentes et des types de minéraux argileux distincts, la densité apparente ne peut pas être considérée comme un indicateur de la macroporosité. D'ailleurs, dans le cas des sols gonflants, une valeur unique de densité apparente ne peut caractériser la parcelle, comme ρ_a change en fonction du pF.

5.2.2 Les sols belges

Vignoble X En analysant les résultats de la procédure "GLM 1 - Densité apparente" on voit que les expériences n'ont pas pu démontrer de différences significatives entre les valeurs de la densité apparente selon la profondeur d'échantillonnage ni la pente pour cette parcelle. La densité apparente est donc homogène sur l'ensemble du terrain et dans les vingt premiers centimètres de sol.

De plus, la méthode de détermination de la densité apparente (sur kopecki ou sur motte) ne montre pas non plus d'effet sur la mesure. La tendance à la sous-estimation de la macroporosité des mottes n'affecterait pas les mesures sur ce sol. Une analyse de l'erreur commise via la "méthode motte" permet de l'observer. Si on considère, par pure hypothèse, que la méthode sur motte induit une erreur par rapport à la "méthode kopecki", on peut calculer le pourcentage d'erreur l'expression suivante :

$$\frac{\text{ValeurMesureeSurKopecki} - \text{ValeurMesureeSurMotte}}{\text{ValeurMesureeSurKopecki}} \times 100. \quad (5.1)$$

La figure 5.2 illustre ces résultats. Très variable d'un site à l'autre, le pourcentage d'erreur peut s'élever à 10 %. Dans la plupart des cas, la densité apparente est plus élevée lorsqu'elle mesurée sur mottes par rapport à celle mesurée sur kopecki. Cela corrobore l'idée que la "méthode motte" sous-estime la macroporosité. Pour certains sols, cependant, le contraire est observé. Dans ces cas (en considérant les erreurs > 1%), il s'agit de sols de surface (profondeur a : 0 à 10 cm), signifiant que la macroporosité aurait été sur-estimée par la "méthode motte". C'est étonnant, d'autant plus qu'on s'attend à une macroporosité plus élevée dans les horizons de surface. Finalement, vu que l'analyse de la variance ne démontre pas de différence significative, il est probable que les erreurs sont simplement

Code	Kopeckys			Mottes		Différence entre les deux densités % d'erreur	
	pa (g/cm³)	Densité apparente moyenne Mpa (g/cm³)	Ecart-type densité apparente Epa (g/cm³)	Densité apparente moyenne Mpa (g/cm³)	Ecart-type densité apparente Epa (g/cm³)		
						pa mottes - pa kopéckys	
X A . 1 a		1.497				0.148660	9.930528
X A . 2 a		1.615	1.556	0.001743	1.64566	0.030660	1.898452
X A . 1 b		1.563	1.603	0.000779	1.63109	0.068090	4.356366
X A . 2 b		1.642				-0.010910	0.664434
X B . 1 a		1.501	1.502	0.000000	1.46331	-0.037690	2.510993
X B . 2 a		1.502				-0.038690	2.575899
X B . 1 b		1.472	1.493	0.000224	1.61814	0.146140	9.927989
X B . 2 b		1.514				0.104140	6.878468
X C . 1 a		1.537	1.531	0.000016	1.37473	-0.162270	10.557580
X C . 2 a		1.525				-0.150270	9.853770
X C . 1 b		1.560	1.517	0.000893	1.57747	0.017470	1.119872
X C . 2 b		1.475				0.102470	6.947119
X D . 1 a		1.514	1.547	0.000548	1.55657	0.042570	2.811757
X D . 2 a		1.580				-0.023430	1.482911
X D . 1 b		1.547	1.573	0.000350	1.58734	0.040340	2.607628
X D . 2 b		1.600				-0.012660	0.791250
						MIN	0.664434
						MAX	10.557580

FIGURE 5.2 – Valeurs du pourcentage d'erreur de la densité apparente mesurée par la "méthode motte" au Vignoble X.

dues à la variabilité du sol et des échantillons, la notion de volume élémentaire représentatif étant vraisemblablement au centre de la question.

Le Vignoble X présente la valeur de densité apparente la plus haute parmi toutes les parcelles.

Domaine des Marnières La procédure "GLM 1 - Densité apparente" ne montre pas non plus de différence significative de densité apparente selon la pente ni selon la profondeur d'échantillonnage, révélant une densité apparente homogène sur le site. La procédure "GLM 6 - Densité apparente" étant non représentative, le pF n'explique pas non plus la variabilité des données, ce qui confirme l'hypothèse de sols non gonflants.

Comparaison des deux sites Le Vignoble X présente des valeurs de la densité apparente très significativement supérieures à celles mesurées au Domaine des Marnières. La texture limoneuse du sol l'explique. De plus, le passé de couvert sous maïs du vignoble X pourrait expliquer une diminution du volume apparent suite aux passages d'engins (travail du sol, semis...) et à la minéralisation de la matière organique induite par l'itinéraire technique (travail du sol, chaulage, fertilisation...). En revanche, le passé de prairie aux Marnières a favorisé le maintien d'une structure du sol macroporeuse, comme cela a été démontré sur des sols limoneux de type Aba (effet "mémoire" de l'usage passé du sol, CALAY, 2017). Toutefois, vu que les textures de ces sols sont différentes, la densité apparente seule ne permet pas de trancher si c'est la texture ou la structure qui induit cette différence de densité. En effet l'importance relative de l'argile peut aussi être déterminante en matière d'agrégation des particules élémentaires et donc d'édification des agrégats.

5.2.3 Les sols italiens

Pianelli

GLM 2 - Densité apparente La valeur moyenne de ρ_a à la profondeur a (0 à 10cm) est significativement inférieure ($p = 0,0169$) à celle à la profondeur b. Le pF exerce également un effet significatif, la densité apparente à pF 4,2 étant significativement plus grande qu'à pF 1 ($p=0,077$).

Sol	ρ_a (g/cm ³)	Ecart-type
Pi a	1,39	0,056
Pi b	1,44	0,036

TABLEAU 5.4 – Valeurs de densité apparente moyenne pour Pianelli selon la profondeur, mesures sur mottes. Les valeurs moyennes de densité apparente reprennent les mesures sur l'ensemble des pF.

GLM 3 - Densité apparente La valeur moyenne de ρ_a à la profondeur a est significativement inférieure à celle mesurée à la profondeur b ($p < 0,001$), quelle que soit la méthode de détermination. De plus, les valeurs de ρ_a mesurées par la "méthode kopecki" sont en moyenne significativement inférieures ($p < 0,001$) à celles mesurées par la "méthode motte". L'interaction entre la profondeur et la méthode est significative (mais le niveau de significativité est faible : $p = 0,049$).

Sol	Méthode	ρ_a (g/cm ³)	Ecart-type
Pi a	Mottes	1,29	0,094
Pi b	Mottes	1,41	0,076
Pi a	Kopecki	1,06	0,104
Pi b	Kopecki	1,28	0,075

TABLEAU 5.5 – Valeurs de densité apparente moyenne pour Pianelli selon la profondeur et la méthode de mesure, pour pF = 1.

GLM 1 - Densité apparente La valeur moyenne de ρ_a à Pianelli est significativement inférieure ($p < 0,001$) qu'à celle de Gilberto.

Gilberto

GLM 3 - Densité apparente La pente n'influence pas la valeur moyenne de valeur de ρ_a . En revanche, la profondeur exerce un effet hautement significatif ($p < 0,001$), $\rho_a(a)$ étant inférieure à $\rho_a(b)$. L'effet du pF est également significatif ($p = 0,0047$), les valeurs de ρ_a mesurée à pF 3 et 4,2 étant significativement supérieures à celles mesurée à pF 1.

Sol	ρ_a (g/cm ³)	Ecart-type
Gi a	1,47	0,067
Gi b	1,60	0,030

TABLEAU 5.6 – Valeurs de densité apparente moyenne pour Gilberto selon la profondeur, mesures sur mottes. Les valeurs moyennes de densité apparente reprennent les mesures sur l'ensemble des pF.

GLM 4 - Densité apparente L'effet de la pente est encore une fois non significatif. La valeur moyenne de ρ_a est significativement inférieure à la profondeur a par rapport à b. Comme pour Pianelli, les valeurs de ρ_a mesurées sur kopecki sont significativement inférieures à celles mesurées sur mottes. Ici, l'interaction entre la profondeur et la méthode est significative ($p = 0,0009$), suggérant que l'influence de la méthode différerait selon la profondeur d'échantillonnage. En effet, ρ_a est systématiquement et significativement inférieure à la $\rho_a(b)$ ($p = 0,0001$), quelle que soit la méthode. En revanche, pour la profondeur b, on constate que les deux méthodes ne présentent pas de valeurs de moyennes significativement différentes ($p = 0,9817$), alors que c'est le cas pour a.

Sol	Méthode	ρ_a (g/cm ³)	Ecart-type
Gi a	Mottes	1,42	0,113
Gi b	Mottes	1,55	0,044
Gi a	Kopecki	1,27	0,079
Gi b	Kopecki	1,56	0,076

TABLEAU 5.7 – Valeurs de densité apparente moyenne pour Gilberto selon la profondeur et la méthode de mesure, pour pF = 1.

Interprétation des résultats $\rho_a(a) < \rho_a(b)$: l'horizon de surface présente une densité apparente plus faible. Le sol étant de texture homogène sur les vingt premiers centimètres, on peut déduire une macroporosité plus importante en surface. Celle-ci est à priori associée à l'enherbement permanent dans l'inter-rang et le rang et à une teneur en matière organique plus élevée. L'effet est seulement significatif sur Pianelli, mais hautement significatif sur Gilberto. Une compaction importante a été décelée à la profondeur b lors de l'échantillonnage en novembre 2017. Cette observation est corroborée par les mesures de ρ_a . Dans ce niveau compacté, seules les plus grosses racines arrivent à se frayer un chemin (constaté lors de l'échantillonnage). L'enracinement de la végétation naturelle a pu s'en trouver modifié et la densité racinaire a pu augmenter dans les dix premiers centimètres de sol. Cela et la diminution de la porosité par la compaction peuvent expliquer la différence hautement significative de ρ_a entre les deux horizons sur Gilberto.

L'effet significatif du pF sur ρ_a corrobore la dynamique de gonflement-retrait des sols et l'observation, en été, de fentes de retrait larges (> 2 cm) et profondes. A la fois la teneur en argile et la nature des minéraux argileux l'expliquent, ceux-ci étant largement dominés par la smectite. L'effet est plus important à Gilberto qu'à Pianelli, malgré une teneur en argile supérieure dans la seconde parcelle. PENG *et al.*, 2012 ont démontré que la compaction ne joue aucun rôle dans la dynamique de gonflement-retrait du sol. Sans doute une teneur en smectite plus importante à Gilberto pourrait l'expliquer. Cette teneur n'a pas été mesurée.

Chapitre 5. La densité apparente (ρ_a)

Contrairement au vignoble X, la méthode de détermination de ρ_a a un effet sur la moyenne de celle-ci. La méthode motte sous-estimerait la macroporosité. Cela est confirmé par les résultats pour Gilberto. L'effet de la "méthode" est observé à la profondeur a, mais pas b. Ce second niveau b étant compacté, sa macroporosité "initiale" est faible et il est donc moins impacté par l'effet de la méthode. Cette sous-estimation de la macroporosité devra être prise en compte à l'avenir. Cependant, cela n'aura pas d'incidence sur la REU qui n'est pas influencée par les pores de grand diamètre. En plus de la sous-estimation de la macroporosité, la densité des mottes est mesurée en humectation, donc à une teneur en eau plus faible que les kopeckis, pour une succion donnée (hystérèse). La rétraction peut donc être plus importante sur mottes.

Chapitre 6

Les courbes de rétention (θ -h ou θ - ψ)

Les courbes θ -h permettent notamment l'étude :

- la réserve en eau utile : $REU = REU = (\theta_{2,5} - \theta_{4,2}) \times 1$ (1m de profondeur de sol)
- La distribution de la taille des pores selon la loi de Jurin-Laplace

Ces deux paramètres seront étudiés dans ce chapitre.

Les figures 6.1 à 6.10 présentent les courbes θ -h pour chaque parcelle. Pour les parcelles belges, compte tenu de l'homogénéité du matériau, les CR ne sont pas discrétisées selon la profondeur. En revanche, elles présentent une certaine variabilité selon la pente. Pour les sols italiens, le contraire est observé, les CR sont donc présentées selon le critère de profondeur d'échantillonnage.

6.1 Le Vignoble X

Pour la gamme de valeurs de la teneur en eau entre la saturation et pF 3, la valeur moyenne est mesurée sur 8 répétitions. Aux valeurs de pF 3,5 et 4,2, elle l'est sur 12 répétitions.

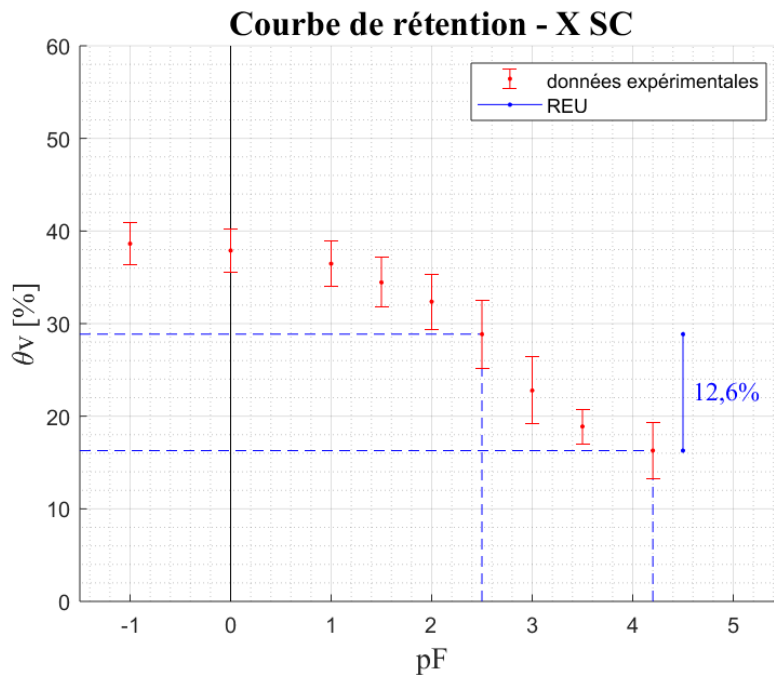


FIGURE 6.1 – Courbe θ -h pour le Vignoble X sur le sommet convexe (SC) de la pente

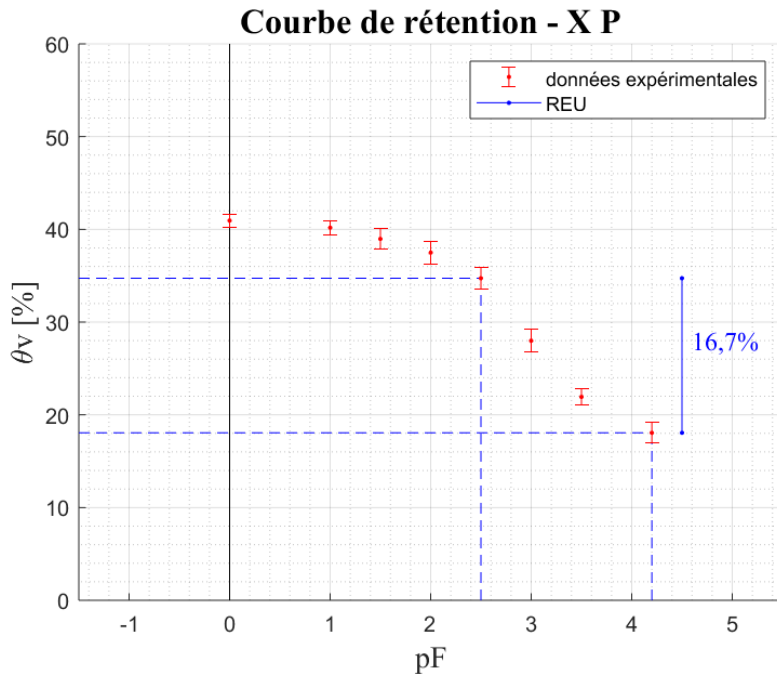


FIGURE 6.2 – Courbe θ -h pour le Vignoble X sur le versant plan (P) de la pente

6.2 Le Domaine des Marnières

La valeur moyenne de la teneur en eau est mesurée sur environ 12 répétitions pour chaque pF. Malgré un nombre de répétitions important, la variabilité est énorme.

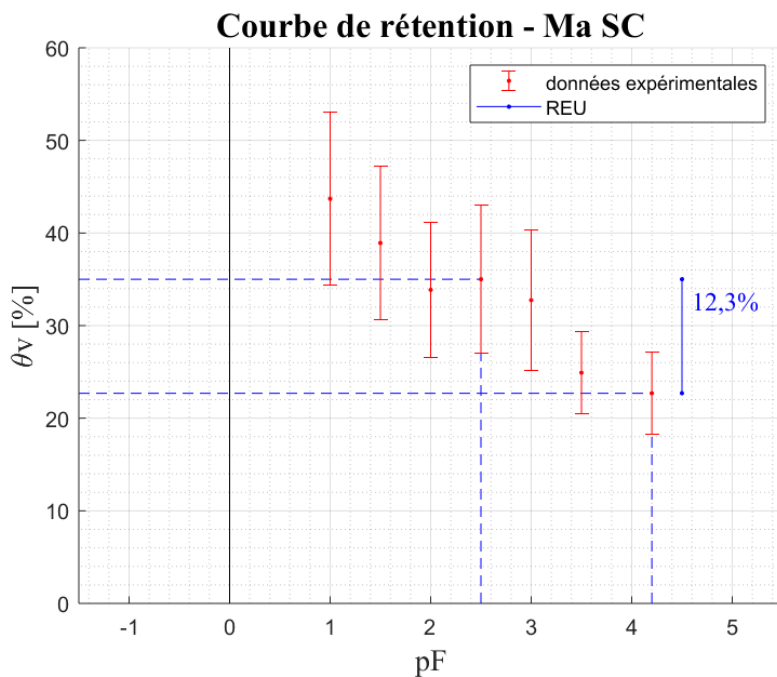


FIGURE 6.3 – Courbe θ -h pour le Domaine des Marnières sur le sommet convexe (SC) de la pente avec prise en compte de la charge caillouteuse.

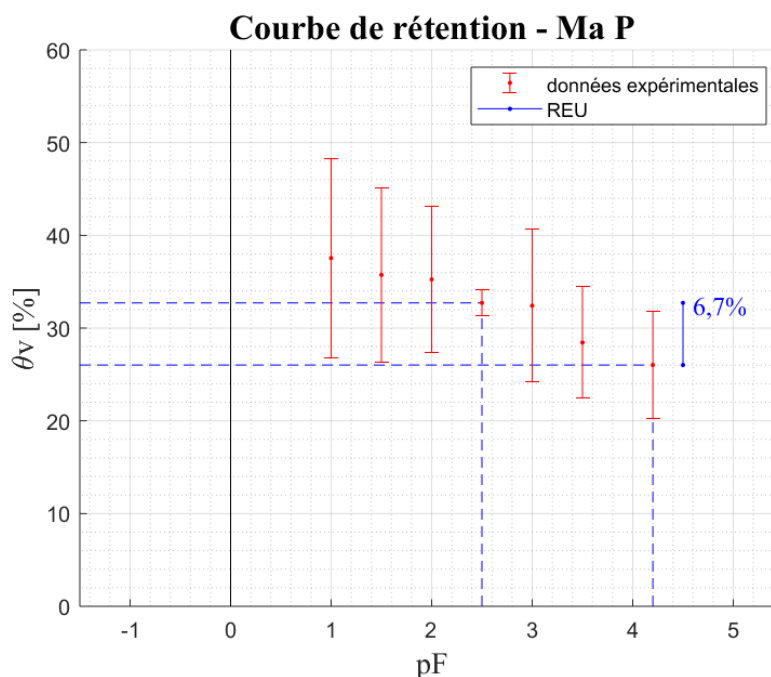


FIGURE 6.4 – Courbe θ -h pour le Domaine des Marnières sur le versant plan (P) de la pente avec prise en compte de la charge caillouteuse.

Cette variabilité peut être due à deux raisons. (1) Les échantillons des Marnières furent les premiers traités dans le dispositif mottes, commises un manque d'expérience opérationnelle pouvant être en cause. (2) Le sol peut être très hétérogène. L'analyse de la charge caillouteuse sur chaque site de mesure montre en effet une grande variabilité (voir tableau 6.1). La variabilité est très importante, même à très petite échelle (même site d'échantillonnage, mais dix centimètres plus bas, on peut mesurer une charge caillouteuse 30 fois supérieure). Cela peut considérablement perturber les résultats présentés aux figures 6.3 et 6.4. En effet, si on représente la courbe de rétention sans prise en compte de la charge caillouteuse, on constate que l'écart-type diminue considérablement (voir figures 6.5 et 6.6).

Site d'échantillonnage	Pente	Profondeur	Charge caillouteuse (%)
A	SC	a	16,65
A	SC	b	12,37
B	SC	a	42,23
B	SC	b	2,97
C	P	a	32,54
C	P	b	23,76
D	P	a	1,05
D	P	b	29,35

TABLEAU 6.1 – Charge caillouteuse mesurée pour chaque point de mesure au Domaine des Marnières. SC = sommet convexe, P = versant plane

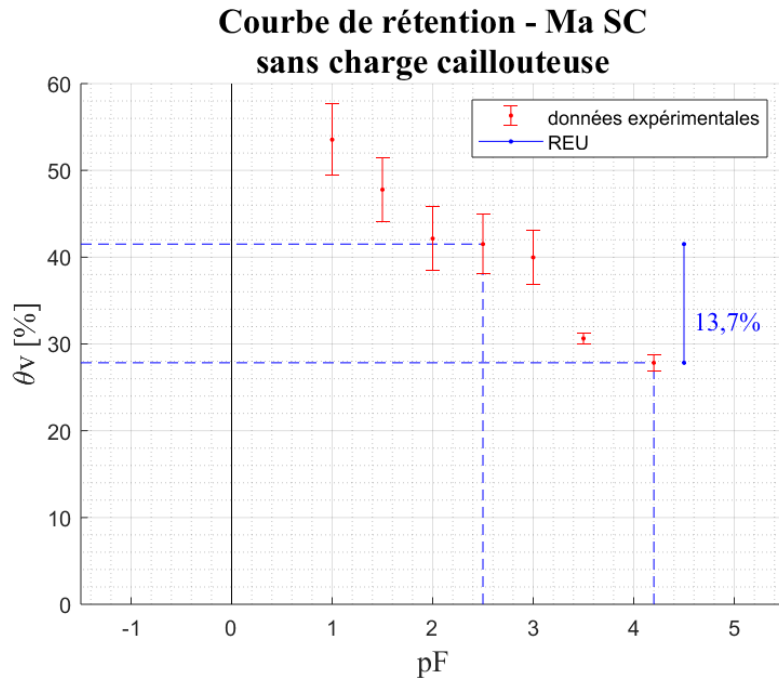


FIGURE 6.5 – Courbe θ -h pour le Domaine des Marnières sur le sommet convexe (SC) de la pente sans prise en compte de la charge caillouteuse.

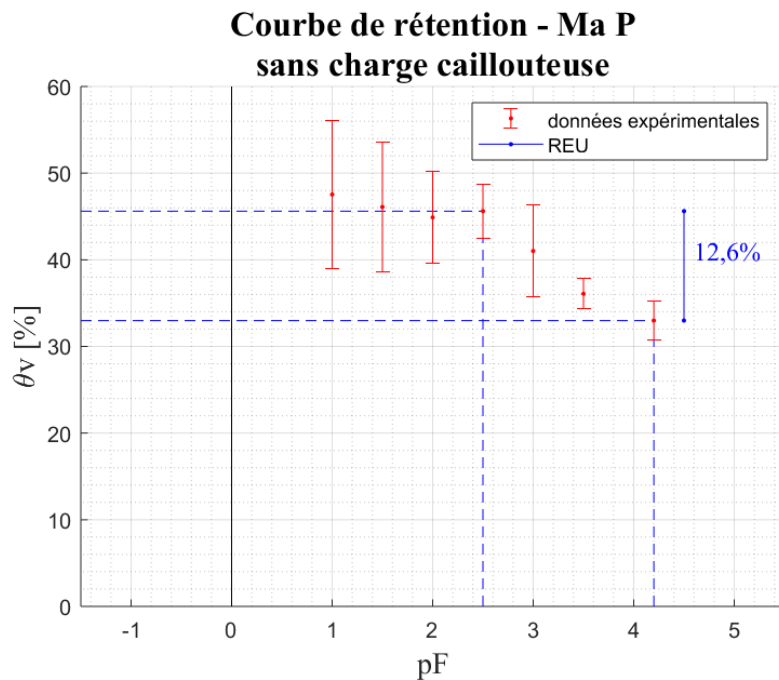


FIGURE 6.6 – Courbe θ -h pour le Domaine des Marnières sur le versant plan (P) de la pente sans prise en compte de la charge caillouteuse.

Une partie de la variabilité observée sur les courbes θ -h avec prise en compte de la charge caillouteuse découle de cette dernière. Les écarts-types demeurent importants, surtout aux plus faibles succions. L'expérimentation peut être mise en cause : les teneurs en eau aux pF 3,5 et 4,2 étaient mesurées en casserole haute pression et celles aux pF plus faibles via le dispositif motte. Il est très probable que la mise en place de celui-ci ait pu

affecter les mesures. Comme la REU est fortement dépendante de la charge caillouteuse, elle sera étudiée sur les données de θ corrigées par la charge caillouteuse. Cependant, l'étude de la porosité le sera sans prise en compte de cette charge caillouteuse.

6.3 Pianelli

Comme les deux méthodes de détermination des courbes θ -h ont été appliquées, on obtient deux courbes de rétention différentes. La courbe de rétention (CR) sur mottes est réalisée en humectation et celle sur kopecki en dessiccation. Le sol échantillonné en Italie en automne était frais, la courbe en humectation n'est donc pas initié à sec. La teneur en eau massique initiale a été déterminée, afin d'évaluer le potentiel hydrique initial. Ces teneurs en eau initiales et les valeurs de pF correspondantes sont présentées à la table 6.2. Pour la parcelle Gilberto on constate une certaine constance dans la teneur en eau (fonction de la profondeur). C'est moins le cas pour à Pianelli, qui présente une plus grande variabilité. Tout point de la courbe de rétention déterminé par la méthode motte aux valeurs de pF inférieures à celle du pF initial du sol est donc déterminée en humectation. Toutes les mesures en casserole haute pression (pF 3,5 et 4,2) sont déterminées en désorption.

Sol	θ_m initiale [%]	écart-type	pF correspondant
Pi A a	23,8	1,21	2,5
Pi A b	17	0,13	4,2
Pi B a	27,6	1,65	2
Gi A a	21,1	2,78	3
Gi A b	11,7	0,004	> 4,2
Gi B a	28,1	3,01	2
Gi B b	10,3	0,13	> 4,2
Gi C a	20,03	0,077	2
Gi C b	9,7	0,53	> 4,2
Gi D a	21,8	-	2
Gi D b	9,6	0,078	> 4,2
Gi E a	18,3	1,28	2,5
Gi E b	6,45	2,99	1,5
Gi F a	21,9	3,52	1,5
Gi F b	11,7	0,53	> 4,2

TABLEAU 6.2 – Teneurs en eau massiques lors de l'échantillonnage des sols italiens et valeur correspondante du pF.

La valeur moyenne de la teneur en eau en humectation est mesurée sur 2 à 12 répétitions pour chaque valeur de pF. En dessiccation, elle l'est sur 6 répétitions.

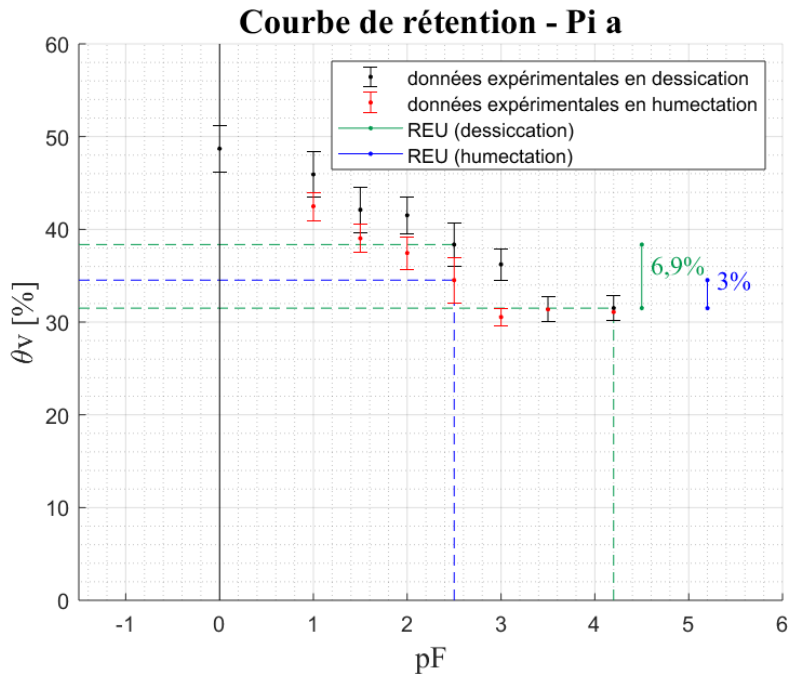


FIGURE 6.7 – Courbe θ -h pour Pianelli à la profondeur a (0 à 10 cm)

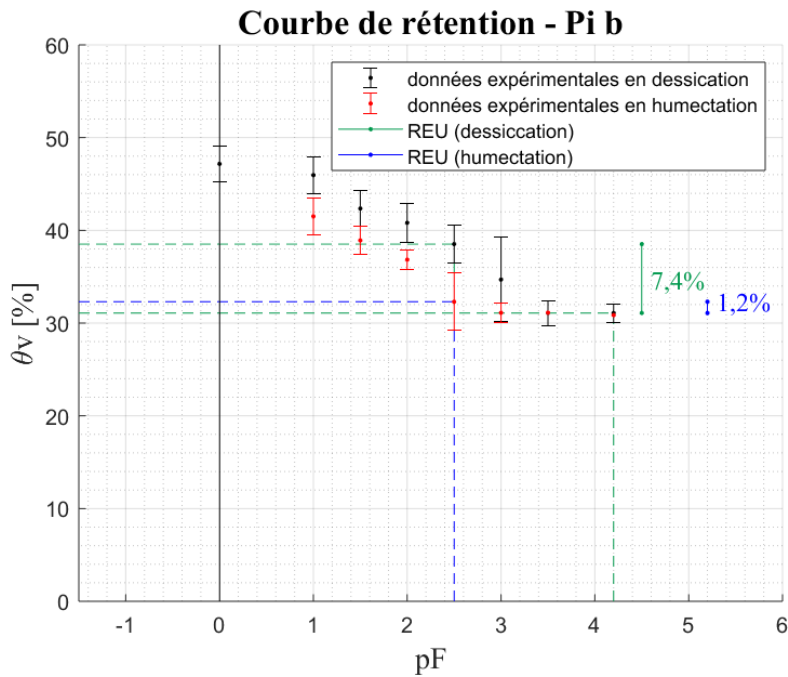


FIGURE 6.8 – Courbe θ -h pour Pianelli à la profondeur b (10 à 20 cm)

6.4 Gilberto

La valeur moyenne de la teneur en eau en humectation est mesurée sur 12 à 18 répétitions pour chaque valeur de pF. En dessiccation, elle l'est sur 12 répétitions.

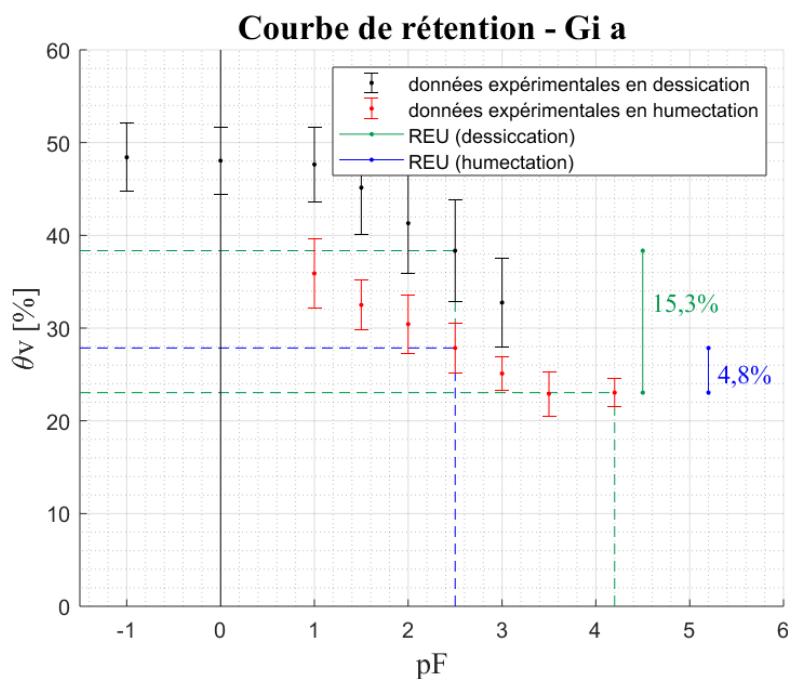


FIGURE 6.9 – Courbe θ -h pour Gilberto à la profondeur a (0 à 10 cm)

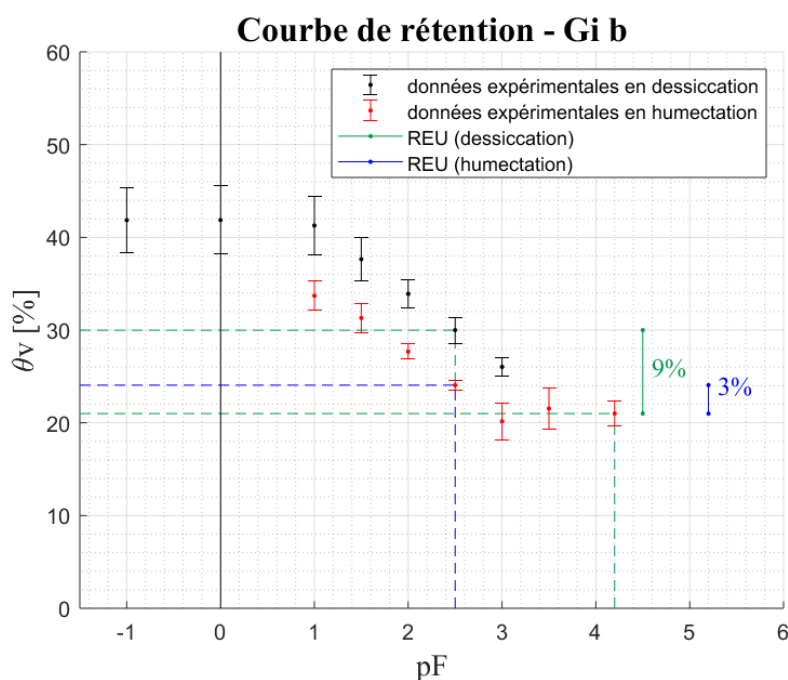


FIGURE 6.10 – Courbe θ -h pour Gilberto à la profondeur b (10 à 20 cm)

On observe une plus grande variabilité des résultats pour la profondeur a que pour b (quels que soient les échantillons étudiés), avant le passage en casserole haute pression (à partir de pF 3,5). Il semblerait que le niveau a ait une porosité plus variable que celle du niveau b, possiblement du fait de la compaction de ce dernier.

6.5 La réserve en eau utile

Les valeurs de θ sont des valeurs moyennes pour chaque site d'échantillonnage et la REU est donc une REU moyenne par site. Sur ces valeurs moyennes ont été conduites les analyses statistiques, via les procédures "GLM 7 - REU" et "GLM 8 - REU" expliquées dans la section 4.5. Tous les résultats bruts de SAS sont repris à aux annexes B. Les codes sont lisibles à l'annexe B 14.

6.5.1 Résultats et interprétation des résultats statistiques

La variable analysée est la réserve en eau des sols. Dans le modèle, on espère l'expliquer par les facteurs suivants :

- *Parcelle* : Marnières (Ma), Vignoble X (X), Pianelli (Pi), Gilberto (Gi)
- *Profondeur* du prélèvement kopecki/de la motte (a : 0 à 10 cm et b : 10 à 20 cm)
- Profil de la *Pente* : SC (sommet convexe), P (versant plan) ou PL (plateau).
- *Méthode* de mesure de la courbe de rétention d'où découle la REU. K est la méthode de détermination avec kopecki, M est la méthode de mesure sur mottes.

L'homogénéité des variances des résidus est respectée. La normalité de la distribution des résidus l'est légèrement moins, comme la distribution présente une légère asymétrie. Le modèle représente la variabilité des données de manière hautement significative.

L'ensemble des parcelles

L'interaction des facteurs parcelle et profondeur est significative ($p = 0,0041$), révélant que l'effet de la profondeur différera selon les parcelles étudiées. La méthode présente un effet hautement significatif sur la REU.

Parcelle	REU moyenne (%)
Vignoble X	14,62
Les Marnières	9,46
Gilberto	7,95
Pianelli	4,47

TABLEAU 6.3 – Moyenne des valeurs de REU pour chaque parcelle.

La REU du vignoble X est significativement plus élevée que toutes celles des autres parcelles ($p =$ entre $< 0,001$ et $0,0055$). Gilberto présente une REU significativement plus grande que Pianelli ($p = 0,0085$), mais pas des Marnières. La REU de la parcelle des Marnières est significativement plus élevée ($p = 0,0055$) que celle déterminée pour Pianelli (voir table 6.3). Ici, comme les données sont balancées, la moyenne marginale est égale à la moyenne arithmétique.

Sur l'ensemble des parcelles et pour toutes les méthodes utilisées, la REU moyenne n'est pas significativement différente entre les profondeurs a et en fonction de la pente.

Les sols belges

L'effet de la pente n'est jamais significatif. L'effet du facteur profondeur n'est pas significatif non plus. La REU des deux parcelles s'avère donc homogène sur les vingt

premiers centimètres de sol. Cependant, lorsqu'on compare les deux parcelles, la REU dans les 10 premiers centimètres aux Marnières est significativement inférieure à la REU du Vignoble X, alors que ce n'est pas le cas pour le niveau b. Il y a donc une légère augmentation de la REU en profondeur aux Marnières.

Sol	REU (%)	Ecart-type
X a	15,48	2,16
X b	13,76	3,3
Ma a	6,77	3,73
Ma b	12,15	4,16

TABEAU 6.4 – Valeurs de REU moyenne pour les sols belges selon la profondeur.

La charge caillouteuse pourrait également être responsable de la différence de REU entre les profondeurs a et b aux Marnières. En tenant compte de cette charge très variable dans les 20 premiers cm de sol, il est difficile d'observer une tendance selon la profondeur^[1]. Une régression linéaire entre les facteurs REU et charge caillouteuse ne donne pas de résultats probants, le modèle n'étant pas représentatif de la variabilité des données^[2].

La variabilité de la REU ne résulte pas de l'influence de la charge caillouteuse. Celle-ci peut être attribuée à d'autres phénomènes (variabilité intrinsèque du sol sur le plan de sa composition, son activité biologique, sa teneur en matière organique,...). Des indicateurs de la macro et microporosité seront étudiés dans la prochaine section.

N'oublions pas de plus que les données collectées aux Marnières sont très variables, les conclusions sont donc à prendre avec précaution.

En conclusion, les valeurs de la REU sont très uniformes sur l'ensemble des parcelles belges. Le Vignoble X présente une REU plus importante que le Domaine des Marnières, cela semble être dû majoritairement à une REU plus faible dans le premier horizon au Domaine des Marnières. La haute REU au Vignoble X est une conséquence de la nature très limoneuse du sol.

Les sols italiens

La parcelle Gilberto présente globalement une REU plus élevée que Pianelli. L'observation des courbes θ -h montre une porosité totale comparable pour les deux sites, par contre, la teneur en eau à pF 4,2 (représentant la microporosité du sol) est bien plus élevée sur Pianelli. En effet, la granulométrie présentée aux tableaux 2.3 et 2.4 montre que le sol de Gilberto est moins argileux (33 et 46% d'argile) que celui de Pianelli (61% d'argile). Selon toute vraisemblance, la haute teneur en micropores à Pianelli limiterait sa REU. Par ailleurs, la teneur en eau à pF 2,5 est comparable voire inférieure à Gilberto par rapport

1. Malgré le peu de données disponibles, une procédure GLM a été réalisée afin de voir si une différence significative de la charge caillouteuse en fonction de la profondeur pouvait être mise en évidence. Le modèle ne s'avère pas représentatif des données, la variabilité n'était pas expliquée par le facteurs prise en compte.

2. Résultats visibles aux annexes B

à Pianelli.

Les mesures expérimentales n'ont pas pu montrer une différence significative de REU selon la position dans la pente.

La profondeur d'échantillonnage n'influence que peu la REU pour les deux parcelles. Gilberto, comme Pianelli, ne présente pas de différence significative de REU entre les profondeurs a et b, elles sont donc relativement homogènes sur les 20 premiers centimètres de sol. Cependant, l'étude des parcelles l'une par rapport à l'autre montre un certain effet de la profondeur. En effet, la REU de Pianelli à la profondeur a est significativement inférieure à celle de Gilberto à la profondeur a ($p=0,0092$), mais pas à la profondeur b ($p=0,8733$). Rappelons que le niveau b de cette parcelle est compacté. L'observation des courbes de rétention révèle que la teneur en eau à saturation (donc la porosité totale) est plus faible à la profondeur b que a et que la pente de la CR est plus importante aux profondeurs b également. La compaction a donc induit une diminution importante de la taille des pores. Les valeurs moyennes de REU pour chaque profondeur pour Pi et Gi sont reprises au tableau 6.5, les écarts-types sont particulièrement importants car la moyenne est calculée sur les mesures en humectation et en dessiccation, nous verrons que l'hystérèse tient un rôle déterminant dans la valeur de la REU.

Sol	REU (%)	Ecart-type
Pi a	4,16	4,12
Pi b	4,76	3,88
Gi a	9,77	6,53
Gi b	6,13	3,29

TABLEAU 6.5 – Valeurs de REU moyenne pour les sols italiens selon la profondeur.

Le dernier facteur important à considérer est l'effet de la méthode de mesure et donc de l'hystérèse sur la REU, qui s'avère significatif. Les REU en dessiccation étant significativement plus élevées qu'en humectation, pour les deux parcelles. L'effet est plus important à Gilberto qu'à Pianelli ($p=0,0082$ pour Pi et $p<0,001$ pour Gi). L'analyse de la procédure "GLM 6 - REU" montre aussi que les valeurs de la REU à Pianelli et Gilberto ne sont pas significativement différentes en dessiccation et en humectation. Par contre, Gilberto présente une REU plus élevée en dessiccation que Pianelli en humectation.

Sol	Méthode	REU (%)	Ecart-type
Pi a	Mottes	0,99	1,90
Pi b	Mottes	1,74	2,52
Pi a	Kopecki	7,34	2,93
Pi b	Kopecki	7,79	1,97
Gi a	Mottes	4,92	3,31
Gi b	Mottes	3,08	0,84
Gi a	Kopecki	14,61	5,16
Gi b	Kopecki	9,17	1,01

TABLEAU 6.6 – Valeurs de REU moyenne pour les sols italiens selon la méthode de détermination : humectation (mottes) ou dessiccation (kopecki).

La compacité du niveau b de Gilberto aurait-elle un effet sur l'hystérèse ? La teneur en eau initiale mesurée pour le niveau b à Gilberto correspond pour chaque site à une valeur pF supérieure à 4,2, donc tous les points mesurés de la CR seraient théoriquement déterminés en humectation. L'effet pourrait donc être très important. La procédure "GLM 7 - REU" permet d'étudier le facteur méthode selon l'interaction des facteurs parcelle et pente. Cette analyse nous montre que la différence de REU du niveau a selon la méthode est très significative. Elle est également significative à la profondeur b, mais dans une moindre mesure (p -valeurs respectives : $< 0,001$ et $0,0347$). Par une diminution de la taille des pores (compacité), l'effet d'hystérèse est moindre, cela confirme que le phénomène de bouteille d'encre est une cause de l'effet de l'hystérèse. Cela est confirmé aussi par l'effet moindre de l'hystérèse sur Pianelli par rapport à Gilberto. En effet, la porosité est majoritairement très fine sur Pianelli, réduisant l'effet bouteille d'encre et de plus, Gilberto présente une macroporosité importante (la teneur en sable est relativement élevée et on observe une diminution importante de la teneur en eau aux valeurs de pF les plus basses). Or, le phénomène de bouteille d'encre est d'autant plus important que le diamètre des pores est large.

En conclusion, la REU de Pianelli est inférieure à celle de Gilberto, la texture argileuse du sol étant vraisemblablement en cause. La compacité du niveau b à Gilberto réduit la REU, de manière non significative par rapport au niveau a, mais significative par rapport à la parcelle Pianelli, la compacité du niveau b à Gilberto limitant cet effet. Cela signifie que selon l'état hydrique initial du sol, Gilberto et Pianelli peuvent présenter des REU très similaires ou dissimilaires.

6.6 La porosité du sol

Plusieurs indicateurs permettant d'appréhender la porosité du sol seront étudiés : (1) la porosité totale (2) l'indice de macroporosité (3) la teneur en eau à pF 1 (4) la teneur en eau à pF 2,5 et (5) la teneur en eau à pF 4,2. Appréhender la porosité du sol permet d'expliquer les facteurs influençant la REU. Plusieurs analyses de la variance ont été conduites sur les indicateurs cités plus haut, pour chacune des parcelles séparément.

La porosité totale est définie par :

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (6.1)$$

avec ρ_s la densité réelle du sol (2,65 g/cm³). L'indice de macroporosité est défini par :

$$IMacro = \epsilon - \theta_{pF1} \quad (6.2)$$

avec θ_{pF1} la teneur en eau volumique à pF 1. Cet indice représente la quantité d'eau perdue par le sol entre la saturation et une tension de 10 cm (pF 1). Il estime la macroporosité du sol en la limitant, par convention, aux pores de rayon supérieur à 150 μ m (pF=1).

6.6.1 Analyses statistiques

On recherche à expliquer les cinq variables citées précédemment par les facteurs suivants :

- *Parcelle* : Marnières (Ma), Vignoble X (X), Pianelli (Pi), Gilberto (Gi)
- *Profondeur* d'extraction du kopecki/de la motte (a : entre 0 et 10 cm et b : entre 10 et 20 cm)
- *Profil de la Pente* : SC (sommet convexe), P (versant plane) ou PL (plaine).

Pour la procédure "GLM 9 - Porosité X", l'homogénéité des variances des résidus est respectée. La normalité de la distribution des résidus l'est également, sauf pour les variables $\theta_{pF2,5}$ et l'indice de macroporosité où la distribution présente une certaine asymétrie. Tous les modèles représentent significativement la variabilité des données sauf pour la teneur en eau à pF 4,2 et la porosité totale. La variabilité de ces paramètres ne peut donc pas être expliquée par les facteurs étudiés.

Pour la procédure "GLM 10 - Porosité Ma" Les modèles pour les quatre premières variables ne sont pas représentatifs de la variabilité de celles-ci : les facteurs étudiés n'expliquent donc pas les données. Pour $\theta_{pF4,2}$ cependant, le modèle est représentatif et l'hypothèse d'homoscédasticité des résidus est vérifiée. Leur distribution, cependant, n'est pas normale.

Pour les procédures "GLM 11 - Italie kopecki" et "GLM 12 - Italie mottes", toutes les hypothèses sont vérifiées et tous les modèles sont représentatifs des données.

Les sols belges

Pour le Vignoble X, la porosité totale n'est pas expliquée par les facteurs étudiés. On remarque que cette variable est très constante sur l'ensemble des sites d'échantillonnage. L'indice de macroporosité présente une moyenne significativement plus faible sur le versant plan que sur le sommet convexe de la pente. C'est le contraire pour θ_{pF1} . $\theta_{pF2,5}$ présente également une moyenne plus importante sur le versant plan de la pente. La $\theta_{pF4,2}$ n'est pas expliquée par les facteurs étudiés. L'effet de la profondeur n'est jamais significatif.

Indicateur	Moyenne	Ecart-type
X SC		
Porosité totale (%)	41,95	2,33
IMacro (%)	5,48	1,83
θ_{pF1} (%)	36,47	2,43
$\theta_{pF2.5}$ (%)	28,86	3,69
$\theta_{pF4.2}$ (%)	16,29	3,06
X P		
Porosité totale (%)	41,80	1,48
IMacro (%)	1,62	1,35
θ_{pF1} (%)	40,18	1,35
$\theta_{pF2.5}$ (%)	34,73	1,13
$\theta_{pF4.2}$ (%)	18,06	1,12

TABLEAU 6.7 – Valeurs des indicateurs de porosité pour le Vignoble X.

Pour le Domaine des Marnières, les analyses ont été conduites sur les données sans ajustement de la teneur en eau par la charge caillouteuse. L'unique effet significatif mis en avant est la pente pour la teneur en eau à pF 4,2, qui est supérieure sur le versant plan de la pente de manière hautement significative. La porosité totale est élevée et assez constante sur tous les échantillons. Si l'analyse SAS n'a pas pu mettre en avant des effets, c'est certainement dû à la variabilité des données. On voit que la macroporosité semble être très faible, pourtant, cela sera infirmé dans lors de l'étude de la conductivité hydraulique.

Indicateur	Moyenne	Ecart-type
Ma SC		
Porosité totale (%)	54,24	4,50
IMacro (%)	0,704	6,84
θ_{pF1} (%)	53,56	4,10
$\theta_{pF2.5}$ (%)	41,51	3,41
$\theta_{pF4.2}$ (%)	27,83	0,96
Ma P		
Porosité totale (%)	56,35	6,09
IMacro (%)	6,91	3,95
θ_{pF1} (%)	49,43	5,70
$\theta_{pF2.5}$ (%)	43,75	9,80
$\theta_{pF4.2}$ (%)	32,79	2,28

TABLEAU 6.8 – Valeurs des indicateurs de porosité pour le Domaine des Marnières.

Ces analyses confirment l'homogénéité des parcelles sur les vingt premiers centimètres de sol, tant pour la densité apparente et que pour la REU. Le vignoble X présente une macroporosité plus élevée sur le sommet convexe de la parcelle (IMacro) ainsi que la teneur en eau plus faible à pF 1 alors que ϵ est constant. Aucune conclusion statistique n'a

pu être avancée quant à la microporosité (teneur en eau à pF 4,2), mais la moyenne révèle tout de même une légère diminution selon la pente. Le même phénomène est observable aux Marnières. Ces variations dans la porosité selon la pente dénotent sans doute d'une dynamique d'érosion mais nous ne disposons pas de mesures sur ce processus. Les deux grands processus érosifs sont l'effet "splash" et le ruissellement.

Les sols italiens

La procédure "GLM 11 - Porosité kopecki" considère les données mesurées sur kopecki uniquement (CR en dessiccation). La valeur moyenne de l'IMacro est significativement plus élevée en profondeur a que b. Elle est significativement plus élevée à Pianelli par rapport à Gilberto. On observe un effet plus marqué à Gilberto, où la valeur de l'IMacro diminue de 12 fois entre a et b alors qu'elle ne diminue que de 2 fois à Pianelli. La pente ne joue pas de rôle significatif.

Les θ_{pF1} et $\theta_{pF2,5}$ sont plus hautes à la profondeur a que b. La première ne présente pas de différence significative entre Pianelli et Gilberto, mais la seconde bien, avec une $\theta_{pF2,5}$ plus importante sur Pianelli que Gilberto. La pente n'a encore une fois pas d'effet significatif.

La porosité totale est significativement plus importante à la profondeur a que b et cela pour les deux parcelles, sachant que ϵ est également plus importante sur Pianelli que Gilberto.

Passons ensuite aux données mesurées sur mottes (CR en sorption) avec la procédure "GLM 12 - Porosité mottes". Encore une fois, la valeur de l'IMacro est significativement plus élevée à la profondeur a que b et chez Pianelli que Gilberto. L'effet observé n'est pas aussi marqué qu'en dessiccation, avec une diminution de 1,5 fois sur Pianelli et de deux fois sur Gilberto. Les θ_{pF1} , $\theta_{pF2,5}$ et $\theta_{pF4,2}$ sont plus hautes à la profondeur a que b et plus hautes sur Pianelli que Gilberto.

La porosité totale varie d'abord selon les parcelles, celle de Pianelli étant plus importante que celle de Gilberto, vu la teneur en argile très élevée à la première. Pianelli présente de plus une teneur en eau à pF 4,2 très élevée (et très significativement supérieure à celle mesurée à Gilberto). Donc, même si sa teneur en eau à pF 2,5 est plus élevée que sur Gilberto, l'importance de la microporosité suffit à réduire considérablement sa REU, malgré sa porosité totale importante.

Une observation intéressante est l'importance de la phase d'humectation ou de dessiccation du sol sur la macroporosité à Gilberto. Qu'il s'agisse des données mesurées en dessiccation ou en humectation, l'indice de macroporosité est plus élevé à en a qu'en b et sur Gilberto, la diminution est beaucoup plus importante en dessiccation qu'en humectation (facteur 12 à facteur 2).

La valeurs de l'IMacro présente de plus des moyennes bien plus élevées en humectation qu'en dessiccation

Indicateur	Moyenne	Ecart-type
Pi a		
Porosité totale (%)	61.51	4.49
IMacro (%)	15.60	6.00
θ_{pF1} (%)	45.91	2.44
$\theta_{pF2.5}$ (%)	38.56	2.06
Pi b		
Porosité totale (%)	52.77	3.10
IMacro (%)	6.82	3.75
θ_{pF1} (%)	45.95	2.01
$\theta_{pF2.5}$ (%)	38.51	2.01
Gi a		
Porosité totale (%)	53.69	2.69
IMacro (%)	5.59	3.49
θ_{pF1} (%)	47.65	4.02
$\theta_{pF2.5}$ (%)	38.34	5.53
Gi b		
Porosité totale (%)	41.74	2.64
IMacro (%)	0.46	1.38
θ_{pF1} (%)	41.28	3.15
$\theta_{pF2.5}$ (%)	30.00	1.40

TABLEAU 6.9 – Valeurs des indicateurs de porosité pour les parcelles Pianelli et Giblerto, mesures sur kopecki.

Indicateur	Moyenne	Ecart-type
Pi a		
IMacro (%)	19.02	4.37
θ_{pF1} (%)	42.49	1.61
$\theta_{pF2.5}$ (%)	33.14	1.44
$\theta_{pF2.5}$ (%)	31.50	1.44
Pi b		
IMacro (%)	13.01	1.70
θ_{pF1} (%)	39.76	1.80
$\theta_{pF2.5}$ (%)	32.86	3.30
$\theta_{pF2.5}$ (%)	31.08	1.04
Gi a		
IMacro (%)	17.16	3.45
θ_{pF1} (%)	35.89	3.71
$\theta_{pF2.5}$ (%)	27.85	2.71
$\theta_{pF2.5}$ (%)	23.04	1.56
Gi b		
IMacro (%)	8.045	2.64
θ_{pF1} (%)	33.70	1.58
$\theta_{pF2.5}$ (%)	24.06	0.55
$\theta_{pF2.5}$ (%)	21,00	1.37

TABLEAU 6.10 – Valeurs des indicateurs de porosité pour les parcelles Pianelli et Giblerto, mesures sur mottes.

Chapitre 7

La conductivité hydraulique

Sur chaque parcelle, l'infiltration cumulée $I(t)$ [cm^3/s] a été mesurée via un infiltromètre à succion contrôlée sur les différents sites de mesure et d'échantillonnage. Le logiciel DISC a permis d'obtenir la courbe de conductivité hydraulique (CH) à partir de ces données et des paramètres de la courbe de vGM (obtenus via le logiciel RETC à partir des données expérimentales de rétention).

Les courbes de rétention expérimentales présentent une certaine variabilité, pouvant être importante dans certains cas (p.ex. au Domaine des Marnières). Cette variabilité a été définie par l'indicateur RMSE-CR (root mean square error, RMSE), calculé comme suit :

$$RMSE(\theta(pF)) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^i (\theta_{mesure} - \theta_{moyenne})^2}}{n} \quad (7.1)$$

Cet indicateur représente la variabilité autour de la moyenne pour chaque teneur en eau à un pF donné. L'ajustement des données modélisées aux données expérimentales est donné par SSQ-CR (residual sum of squares, SSQ, donné par le logiciel RETC). DURNER, 1994 met l'accent sur l'importance de l'exactitude de la CR pour la modélisation de la CH, sous peine d'avoir des erreurs importantes dans la conductivité hydraulique.

Le SSQ donné par DISC (SSQ $I(t)$), représente l'ajustement entre les données simulées et expérimentales d'infiltration cumulée $I(t)$. Ces données sont mesurées sur une gamme de suctions très faibles : au maximum $h = -20$ cm (pF = 1,3), c'est donc dans cette gamme de suctions qu'il faut prendre en compte les CH présentées plus bas.

7.1 Le vignoble X

Les courbes de rétention expérimentales présentent peu de variabilité, à noter, toutefois il n'y a que 2 répétitions par valeur de pF. La modélisation présente un ajustement correct aux données expérimentales (Tableau 7.1).

Site	RMSE CR	SSQ CR
X A	0.00242	0.00092
X B	0.00201	0.00103
X C	0.00421	0.00147
X D	0.00186	0.00063

TABEAU 7.1 – Ajustement des CR pour les sites du Vignoble X.

Les CR et CH obtenues sont présentées aux figures 7.1. Les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation (K_s [cm/s]), du coefficient de tortuosité des pores (λ [-]) (paramètres ajustés dans le modèle), de même que le SSQ $I(t)$ sont données au tableau 7.2

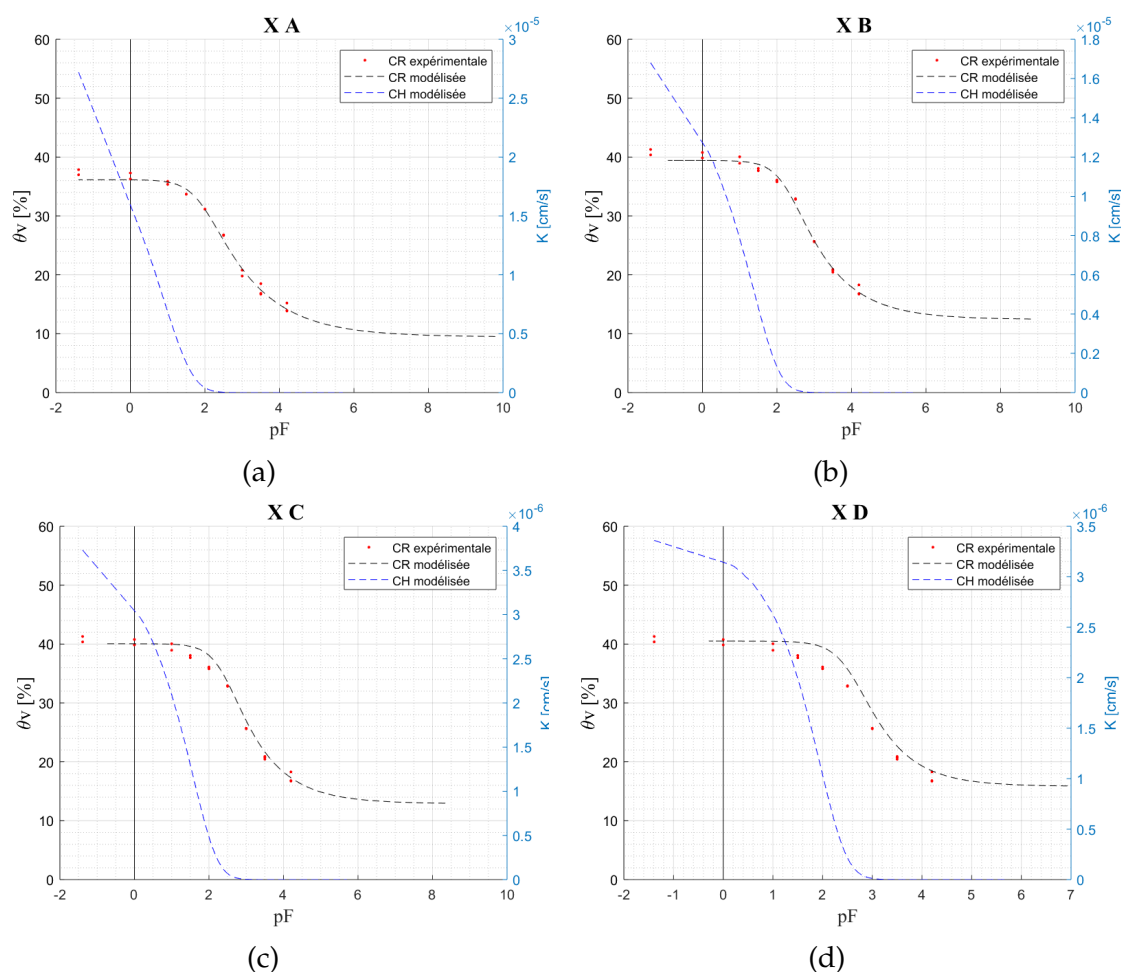


FIGURE 7.1 – Courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque site d'échantillonnage au Vignoble X. A et B sont situés en position topographique SC. C et D sont situés en P.

Site	K_s [cm/s]	λ [-]	SSQ $I(t)$
X A	$2,7 \cdot 10^{-5}$	0,002138	0.103
X B	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,010573	0.02803
X C	$4 \cdot 10^{-6}$	0,003234	0.09324
X D	$3 \cdot 10^{-6}$	0,018018	0.07235

TABLEAU 7.2 – Valeurs de K_s , λ modélisés et SSQ $I(t)$ pour les sites d'échantillonnages du Vignoble X.

Pour obtenir ces CH, il a fallu adapter légèrement les données $I(t)$ mesurées sur le terrain. En effet, pour chaque site d'échantillonnage, l'infiltration est mesurée à plusieurs succions. Sur cette parcelle, à la première succion, la CH présentait systématiquement

une forme de droite croissante monotone, signifiant que le sol était directement à l'équilibre à la succion appliquée (cela a été infirmé comme la teneur en eau initiale du sol est connue). A la deuxième succion appliquée, la CH présentait la forme attendue : une courbe convexe avec diminution progressive de la pente jusqu'à atteindre un pallier (sol à l'équilibre avec la succion choisie). La raison probable est un artefact du dispositif expérimental : les premiers cm^3 d'eau déversés ont humecté le sable étalé sous le disque avant la mesure (voir section 4.4) mais n'ont pas atteint le sol. Le premier jeu de données a donc été systématiquement supprimé pour permettre une meilleure représentation des données¹.

On observe sur les courbes à la figure 7.1 une diminution de la conductivité hydraulique entre la position topographique SC et P. On a effectivement remarqué une diminution de la macroporosité (IMacro) en position P. On constate également une diminution moins rapide de la conductivité hydraulique avec le pF en position P, pouvant provenir d'une mésoporosité plus importante par rapport à la position SC. Effectivement, la REU sur le versant est légèrement plus importante qu'au sommet de la pente.

7.2 Le Domaine des Marnières

Plusieurs précautions sont à prendre avant d'interpréter les mesures qui suivent. D'abord, la variabilité des mesures de rétention sur ce domaine est grande. La modélisation par une seule CR est nécessaire mais il faut garder en tête qu'un grand nombre de CR différentes représentent peut-être aussi bien le sol. Cette incertitude sur les paramètres de CR apportent une incertitude sur les CH modélisées. De plus, le jour des mesures, le contenu en eau du sol était élevé. On voit sur les figures 7.2 que souvent, l'infiltration à la première succion semble être directement à l'équilibre (pente constante), sauf pour le sol Ma C. Cela est particulièrement étonnant, comme la teneur en eau initiale mesurée est justement plus importante que celle attendue à la première succion. Cela porte à douter de la précision de la détermination des teneurs en eau initiales. Afin d'améliorer l'ajustement du modèle CH, plusieurs valeurs de θ_i seront testées (jusque $\pm 3\%$ par rapport à celle mesurée).

Le tableau 7.3 révèle que la SSQ CR des sites C et D est importante.

Site	RMSE CR	SSQ CR
Ma A	0,00601	0,00844
Ma B	0,00599	0,00472
Ma C	0,00983	0,01575
Ma D	0,01447	0,05046

TABLEAU 7.3 – Ajustement des CR pour les sites du Domaine des Marnières.

1. Les données d'infiltration cumulée mesurées sur le terrain sont reprises à l'annexe A.1

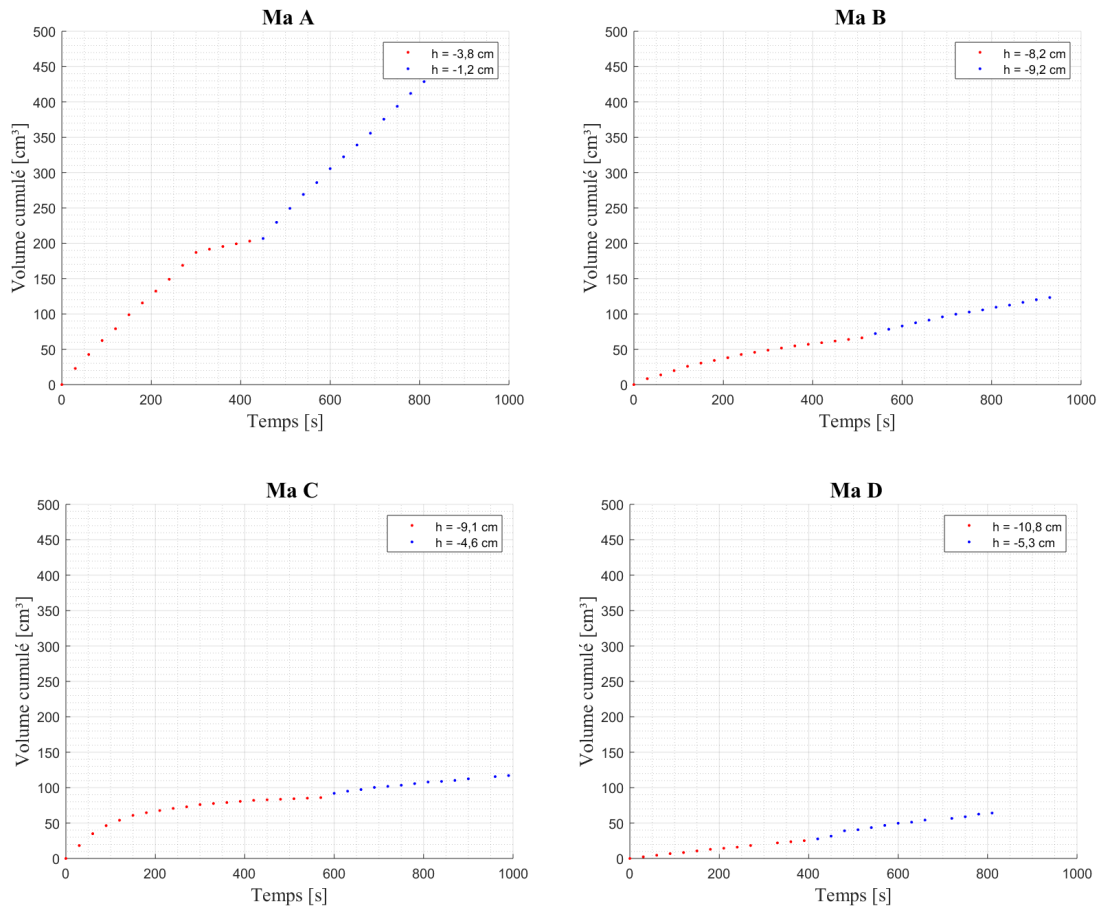


FIGURE 7.2 – Infiltration cumulée mesurée pour les différents sites d’échantillonnages au Domaine des Marnières. A et B sont situés en position topographique SC. C et D sont situés en P.

Site	Ks [cm/s]	λ [-]	SSQ I(t)
Ma A	0,060763	0,002293	0.3694
Ma B	0,01629	5,360027	0.0363
Ma C	-	-	-
Ma D	-	-	-

TABLEAU 7.4 – Valeurs de Ks, λ modélisés et SSQ I(t) pour les sites d’échantillonnages au Domaine des Marnières.

L’étude des figures 7.3 révèle une très haute conductivité hydraulique à saturation par rapport au Vignoble X. Cela dénote d’une macroporosité élevée. L’IMacro aux Marnières n’est pourtant pas très élevé (6,9% en P et 0,71% en SC), mais cela peut être dû à la variabilité des données de rétention. On observe ensuite une diminution très brutale de la conductivité avec l’augmentation de la succion, due à la microporosité élevée du sol. La charge caillouteuse du sol peut également augmenter la vitesse d’infiltration de manière générale. DISC n’a pas permis la modélisation de la CH pour les sites C et D. Une raison probable est le manque de cohérence des paramètres de rétention avec les données entrées (I(t), teneur en eau initiale,...).

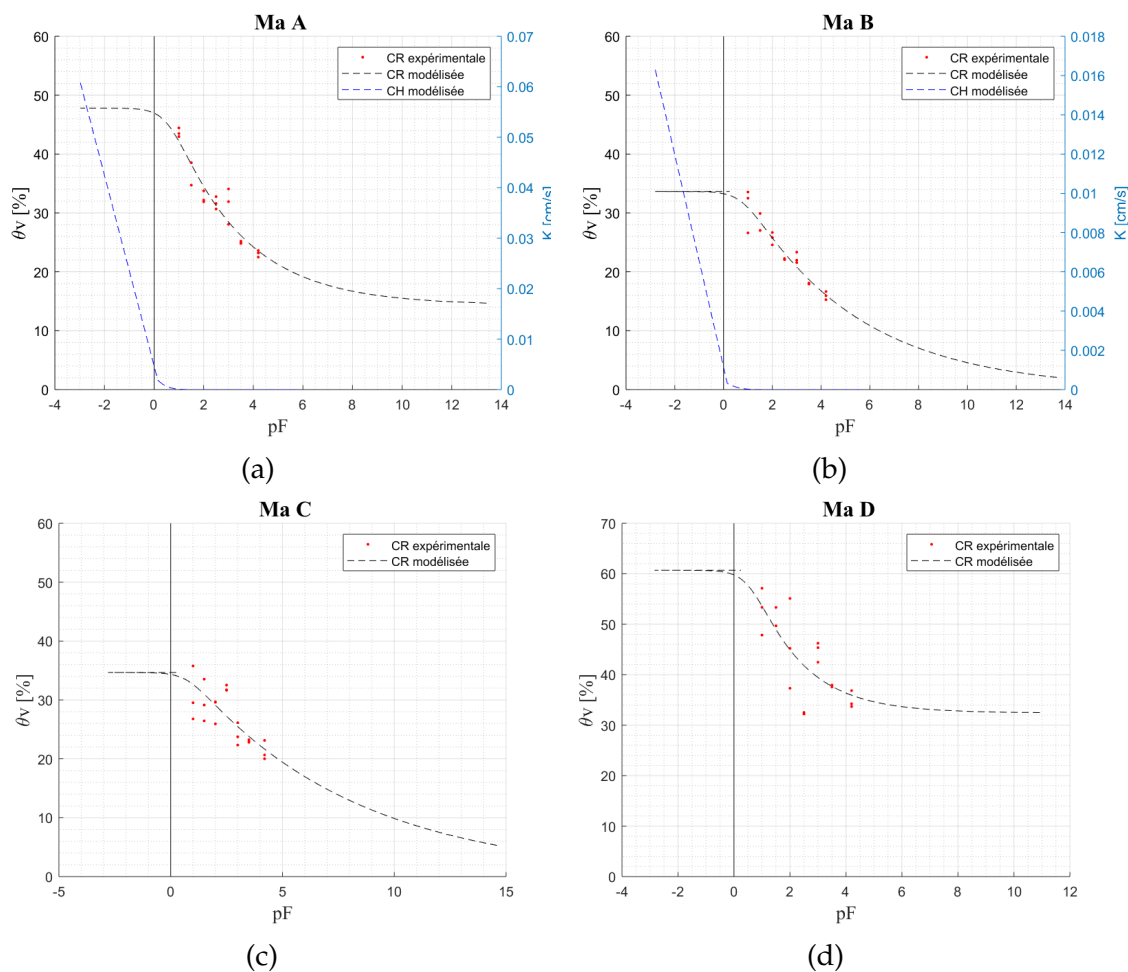


FIGURE 7.3 – Courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque site d'échantillonnage au Domaine des Marnières. A et B sont situés en position topographique SC. C et D sont situés en P.

7.3 Pianelli

Les mesures de CR sont assez peu variables et la modélisation s'ajuste assez bien aux données.

Site	RMSE CR	SSQ CR
Pi A	0.00726	0.00227
Pi B	0.00815	0.00643
Pi C	0.00729	0.00327

TABLEAU 7.5 – Ajustement des CR pour les sites de Pianelli.

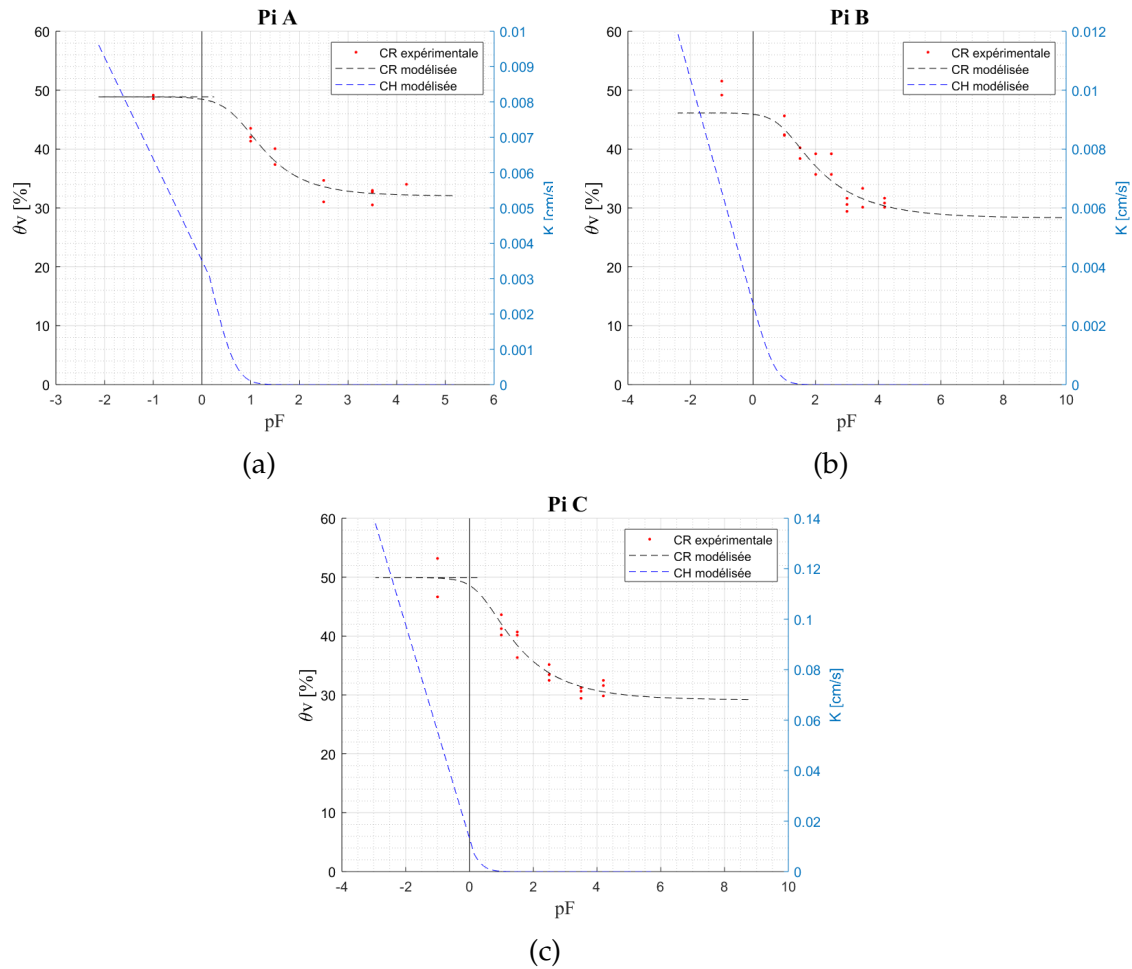


FIGURE 7.4 – Courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque site d'échantillonnage sur Pianelli.

Site	K_s [cm/s]	λ [-]	SSQ I(t)
Pi A	0,009612	1,876711	0.3486
Pi B	0,011929	8,235338	0.00741
Pi C	0,138792	5,128263	0.9476

TABLEAU 7.6 – Valeurs K_s , λ modélisés et SSQ I(t) pour les sites d'échantillonnages pour Pianelli.

Comme aux Marnières, la conductivité à saturation est très élevée : Pianelli présente effectivement une porosité totale et une macroporosité très élevées. Ensuite la diminution brutale de la conductivité est vraisemblablement due à une mésoporosité faible et une microporosité élevée. Une certaine variabilité est visible sur la parcelle, avec une conductivité globalement 10 fois plus grande au site C par rapport aux deux autres².

2. Les données d'infiltration cumulée mesurées sur le terrain sont reprises à l'annexe A.2

7.4 Gilberto

La variabilité des données de CR est réduite et l'ajustement des CR modélisées est bon.

Site	RMSE CR	SSQ CR
Gi A	0.00837	0.00876
Gi B	0.01367	0.01311
Gi C	0.01129	0.01613
Gi D	0.00809	0.00635
Gi E	0.0071	0.0057
Gi F	0.0024	0.0051

TABLEAU 7.7 – Ajustement des CR pour les sites de Gilberto.

Site	Ks [cm/s]	λ [-]	SSQ I(t)
Gi A	4,17	0,033838	0.8947
Gi B	-	-	-
Gi C	-	-	-
Gi D	0,000051	8,37219	0.4698
Gi E	0,014133	0,003077	1.573
Gi F	0,3284	2,678906	0.008713

TABLEAU 7.8 – Valeurs de Ks, λ modélisés et SSQ I(t) pour les sites d'échantillonnages pour Gilberto.

Les courbes de conductivité obtenues sont très variables : Ks variant de 4,17 à 5.10^{-5} . On observe par ailleurs que les SSQ sont élevées, sauf pour le site F. Les données d'entrée d'infiltration cumulée (figures 7.5) révèlent que les données mesurées sont très différentes d'un site à l'autre alors que pour les autres parcelles, les comportements étaient équivalents sur toute la parcelle. Sur cette parcelle, soit le problème vient de la prise de données, soit de la nature gonflante du sol (effet plus important à Gilberto qu'à Pianelli), qui apporte une très grande variabilité sur la parcelle. De plus, le modèle employé dans le logiciel DISC n'est pas adapté à des sols gonflants.

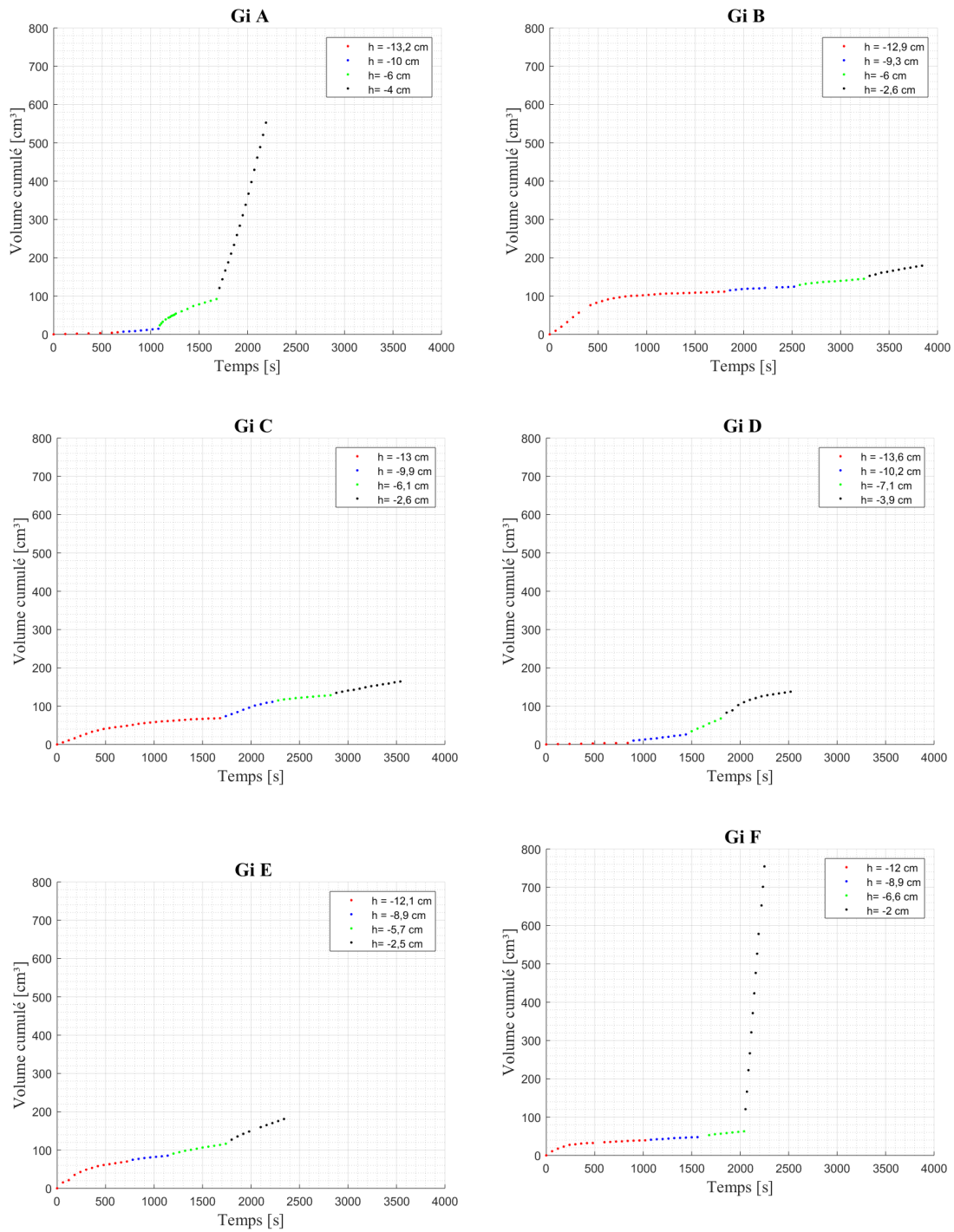


FIGURE 7.5 – Infiltration cumulée mesurée pour les différents sites d'échantillonnages sur Gilberto. A,B et C sont situés en position topographique SC. D,E et F sont situés en P.

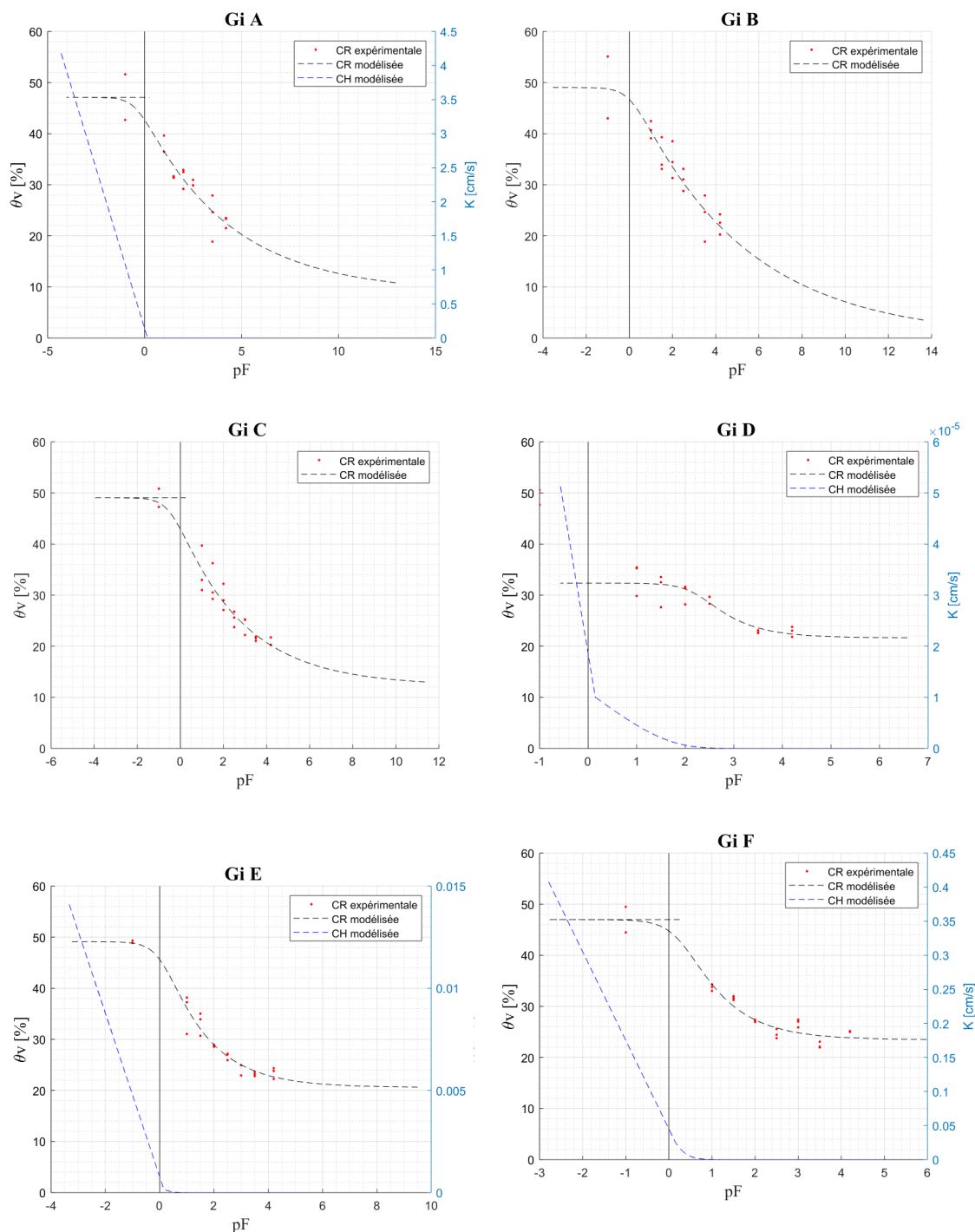


FIGURE 7.6 – Courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque site d'échantillonnage sur Gilberto. A,B et C sont situé en position topographique SC. D,E et F sont situés en P.

Chapitre 8

Conclusions pour chaque parcelle

8.1 Les parcelles belges

Le Vignoble X

La valeur moyenne de la densité apparente, de $1,55 \text{ g/cm}^3$, est en bon accord avec la texture limoneuse du sol et son passé cultural (maïs). La porosité (41%) relativement dominée par la mésoporosité, associée à la réserve en eau utile ($\text{REU} = 14,62\%$). La macroporosité est réduite (5% en SC et 2% en P). Cela se confirme par une conductivité hydraulique à saturation faible (de l'ordre de 10^{-5} cm/s en SC et 10^{-6} cm/s en P). L'infiltration restant faible lorsque la succion augmente, le risque de ruissellement important pourrait être élevé lors de fortes pluies. Cela favoriserait l'érosion hydrique, d'autant que la texture du sol est largement dominée par la fraction limoneuse. La microporosité, associée à la fraction argileuse, est moindre en SC qu'en P, dénotant une dynamique d'érosion. Ces observations justifient le recours à l'enherbement afin de protéger le sol.

La valeur de REU de la parcelle X est significativement plus élevée que la REU des autres parcelles étudiées. L'importance relative du réservoir hydrique est une caractéristique des sols dérivés de loess de la région limoneuse, qui limitera la contrainte hydrique sauf en année sèche. Il conviendra donc d'adopter des techniques optimisant cette contrainte, notamment la densité de plantation élevée, la taille, l'effeuillage, l'enherbement permanent et sa gestion. Adopter une densité de plantation élevée et un enherbement permanent prend en effet tout son sens pour augmenter l'évapotranspiration et la compétition pour l'alimentation hydrique. L'effet de cette compétition se fait également ressentir sur le système racinaire, particulièrement lorsque les vignes vieillissent (CASTERAN *et al.*, 1980). MORLAT, REMOUÉ *et al.*, 1984 ont testé différentes modalités d'écartement (inter-rang), d'espacement (intercep, entre les pieds de vignes sur une même ligne) et d'entretien du sol sur un terroir argilo-limoneux orienté Nord-Sud, présentant des réserves hydriques élevées, comme au Vignoble X. Le sol ne présente en outre aucune contrainte mécanique à l'enracinement. Selon le diamètre des racines ($< 1 \text{ mm}$, entre 1 mm et 2 mm , $> 2 \text{ mm}$ de diamètre et les racines plongeantes), les effets seront différents. Les racines de diamètre $< 1 \text{ mm}$ interviennent dans une large part de l'alimentation hydrique et minérale de la vigne. Un espacement faible a tendance à augmenter leur présence, alors que l'enherbement la diminue, particulièrement dans les horizons de surface et en interligne. Concernant les racines de diamètre compris entre 1 et 2 mm , les vignes plantées à densité élevée présentent en surface une densité élevée de racines mais cela s'inverse en profondeur. Pour les racines de diamètres $> 2 \text{ mm}$, les espacements faibles en intercep ont tendance à augmenter le nombre de racines, tout comme l'enherbement. Concernant les racines plongeantes, les petits espacements ont tendance à diminuer leur

nombre (MORLAT, REMOUÉ *et al.*, 1984) et l'enherbement aurait un effet inverse. Un espacement intercep aussi faible qu'au Vignoble X, pourrait donc augmenter la densité racinaire pour les racines de faible diamètre, qui sont justement celles qui conditionnent l'alimentation hydrique. En revanche, l'espacement faible diminue l'ancrage profond dans le sol. L'enherbement contrebalance cet effet. Il semble que la compétition en intercep soit plus significative que celle en interrang (CASTERAN *et al.*, 1980), même lorsque l'écartement est faible. En outre, une densité importante de plantation apporte aux vignes des conditions uniformes de concurrence alors que le même espacement couplé à un interligne important (p.ex. 2,6m) induit une différenciation dans la croissance des différents plants (MORLAT, REMOUÉ *et al.*, 1984).

Un autre effet de l'espacement faible est la modification du microclimat de la canopée de la vigne, avec la proximité, les sarments s'entrelacent et la densité foliaire proche des grappes peut devenir abondante. Une réduction de l'exposition à la lumière et à la chaleur peut s'en suivre, un effeuillage s'avère donc judicieux, d'autant plus que le climat au vignoble est frais.

Le porte-greffe choisi, le 3309C, adapté aux sols limono-argileux (PL@NTGRAPE, 2018 et VANDERLINDEN, 2015) et ne tolérant pas le stress hydrique paraît bien adapté au terroir. Le confort hydrique de la vigne pouvant réduire la qualité du vin produit, un soin particulier doit donc être pris pour favoriser la contrainte hydrique via les techniques évoquées plus haut. Le développement et la mise en fruits relativement lente dans un contexte aussi frais n'est pas idéale, il s'agit donc de favoriser la maturation.

Le Domaine des Marnières

La valeur moyenne de la densité apparente est relativement faible ($1,26 \text{ g/cm}^3$), dénotant à priori une macroporosité, confirmée par les mesures d'infiltrométrie : la conductivité hydraulique à saturation est plus élevée (de l'ordre de 10^{-2} cm/s). Cela est à mettre en lien avec l'usage passé du sol sous prairie et des pratiques culturales promouvant l'activité biologique du sol (bois non exporté à la taille). Une importante microporosité est ensuite visible à la diminution abrupte de la conductivité hydraulique dès que la succion augmente légèrement, ainsi qu'à la haute teneur en eau à pF 4,2, due à une teneur en argile élevée. Cette microporosité augmente en position P, traduisant vraisemblablement une dynamique d'érosion en SC sur la parcelle et d'apport colluviaux en P. Le ruissellement pourrait donc être conséquent lors de fortes pluies. Cela justifie aussi un enherbement permanent entre rangs.

La REU moyenne (9,46%) est inférieure à celle mesurée au Vignoble X. Par ailleurs, la haute teneur en azote (dûe au passé cultural) favorisera la vigueur de la vigne, d'autant plus que les porte-greffes choisis (5BB et SO4) sont hautement productifs. La mise en place de pratiques culturales limitant le rendement végétatif est nécessaire afin de contrebalancer ces effets.

La présence de calcaire convient bien au Chardonnay planté sur cette parcelle. Le porte-greffe 5BB est bien adapté aux sols calcaires et aux conditions humides, mais le SO4, lui, est moins bien adapté à l'humidité et aux conditions fertiles.

Comparaison des deux parcelles

Ces deux terroirs, tous deux affectés à la production du Chardonnay, sont très distincts. La qualité du vin blanc, directement fonction de son potentiel aromatique, est limitée par un déficit hydrique trop important, comme l'illustre l'exemple bien connu des millésimes secs pour les vins blancs bordelais. Vu la REU disponible sur les parcelles étudiées, cela n'est pas un risque, sauf bien sûr en années exceptionnellement sèches. Le risque est plutôt celui de vignes trop vigoureuses. Les pratiques culturales suivies par les viticulteurs sont d'ores et déjà dirigées vers la diminution du rendement. Les pratiques favorisant une structure aérée du sol peuvent également favoriser l'évaporation et l'infiltration de l'eau.

Le Domaine des Marnières semble offrir un potentiel supérieur à celui du Vignoble X pour la production de Chardonnay. La réserve en eau utile moindre couplée à un climat plus chaud (indice de Huglin plus élevé) sont deux facteurs prépondérants. Ensuite, le caractère calcaire et argileux du sol aux Marnières convient particulièrement bien au Chardonnay.

Dans l'avenir, le réchauffement climatique pourrait améliorer le potentiel viticole de ces deux parcelles par l'augmentation de la température et ainsi, l'augmentation de l'évapotranspiration.

8.2 Les parcelles italiennes

Pianelli

La valeur de la densité apparente moyenne ($1,24 \text{ g/cm}^3$ à la profondeur a, $1,31 \text{ g/cm}^3$ à la profondeur b) est la conséquence d'une macroporosité élevée (respectivement 16 à 7 %). Celle-ci se traduit par une conductivité hydraulique à saturation élevée (de l'ordre de 10^{-1} à 10^{-2} cm/s). La densité apparente est fonction de la teneur en eau du sol à cause de la présence de smectites, argiles gonflantes. L'effet de l'hystérèse sur la valeur de densité apparente confirme cette hypothèse. Cet effet est cependant accentué par la sous-estimation de la macroporosité lorsque la densité apparente est mesurée sur mottes. Pianelli présente une REU très faible, particulièrement en humectation (1,4% pour 7,6% en dessiccation), malgré une porosité totale élevée (61% en a et 53% en b). La raison est une microporosité élevée (31% en a et en b) vu les teneurs en argiles importantes (61%). De ce fait, la conductivité hydraulique chute brutalement dès que la succion augmente.

Gilberto

La valeur de la densité apparente moyenne est relativement élevée ($1,46 \text{ g/cm}^3$), et est en partie due à une couche de sol compactée (à partir de 10 cm de profondeur) où la densité apparente atteint $1,55 \text{ g/cm}^3$ pour $1,34$ à la profondeur a. La macroporosité est très faible dans cette couche (0,46%) alors que, à la profondeur a, elle est comparable à celle mesurée à Pianelli (6%). De ce fait, l'hystérèse joue un rôle moins important à Gilberto qu'à Pianelli. La dynamique de gonflement-retrait est plus intense à Gilberto qu'à Pianelli.

Gilberto présente une REU de 8% en moyenne (10% en a et 6% en b). L'impact de la compaction n'est pas aussi important que pour la macroporosité, car les mésopores sont

moins "touchés". Cependant, cette couche compacte influera la disponibilité en eau pour la vigne. Nous avons observé sur le terrain que seules de rares racines de diamètre élevé parvenaient à traverser cette couche indurée, limitant ainsi la densité racinaire pour les racines de faible diamètre et donc à grande surface d'absorption. Deuxièmement, le passage de l'eau à travers cette couche indurée peut être limitée, les horizons plus profonds moins approvisionnés en eau.

Comparaison des deux parcelles

Rappelons que Pianelli et Gilberto sont vendangées et vinifiées séparément, produisant des vins de qualité différente : respectivement le Bocalino et le Campodarchi, considéré de qualité nettement supérieure. Nous savons que la disponibilité en eau influe sur la qualité du vin. Gilberto présente une valeur de REU globalement supérieure à Pianelli, mais il est vraisemblable que cette couche indurée joue un rôle primordial dans l'alimentation hydrique de la vigne, la diminuant significativement. En outre, l'exposition de Gilberto (versant sud-ouest alors que Pianelli est situé en plaine exposée sud-est) est plus favorable à l'exposition à la lumière et à la chaleur.

A Pianelli, la REU est plus faible, mais la structure du sol étant bien conservée, les racines n'ont aucune difficulté à se développer.

Avec le réchauffement climatique, ce qui aujourd'hui est un déficit hydrique favorable pourrait devenir un stress hydrique défavorable pour la qualité du vin. A ce moment-là, il sera peut-être judicieux de diminuer l'enherbement et mettre en place une stratégie d'économie d'eau pour les vignes.

Chapitre 9

Conclusion générale

La caractérisation des propriétés hydriques et hydrodynamiques du sol permettent d'appréhender l'alimentation hydrique potentielle de la vigne. C'est un facteur primordial dans la gestion d'une exploitation viticole dont l'objectif est la production de vin à haut potentiel qualitatif. Pour l'améliorer, il s'agit de réduire la vigueur de la vigne, possible via deux leviers : la contrainte azotée et la contrainte hydrique. L'alimentation hydrique de la vigne est fonction du climat (température et précipitations) et des propriétés physiques du sol. Sur une parcelle donnée, la méthode d'entretien du sol et les pratiques culturales permettent d'améliorer la disponibilité en eau et son utilisation par la plante.

Les quatre parcelles viticoles étudiées présentent des caractéristiques diverses. Toutes sont destinées à la production de vin blanc (*Chardonnay* en Belgique et *Bianchello Del Metauro* en Italie). Le Vignoble X (Brabant Wallon, Belgique) présente un sol typique de la région limoneuse belge ; limoneux non caillouteux, avec une REU élevée (14,62%) et une conductivité hydraulique à saturation faible, de l'ordre de 10^{-5} cm/s. Le sable bruxellois n'affleure pas mais il est superficiel (à partir de 50 cm). L'indice de Huglin (IH) définit le climat comme frais. Dans ce cas, une densité de plantation élevée couplée à l'enherbement du sol et à des pratiques culturales limitant le rendement permettent de contrebalancer un apport d'eau important et donc une vigueur importante de la plante. Le Domaine des Marnières (Dahlem, Belgique) présente un sol argileux à haute charge caillouteuse, calcarifère, ayant conservé une macroporosité importante, ainsi qu'une microporosité élevée vu la teneur en argile. La valeur de la REU à ce vignoble est moindre qu'au Vignoble X (9,46%), tout comme sa densité de plantation. Les pratiques culturales sont également orientées vers la réduction de la production. L'IH définit le climat comme frais à tempéré. Entre ces deux terroirs, le Domaine semble présenter le meilleur potentiel viticole pour la production de vin de Chardonnay, grâce au climat plus chaud, une REU plus faible et la nature calcaire du sol.

Les sols calcarifères des deux parcelles italiennes (Pianelli et Gilberto, Terracuda) présentent des teneurs en argiles élevées, couplées à des teneurs en sable non négligeables à Gilberto. La présence de smectites confère au sol une dynamique de gonflement-retrait, plus prononcée à Gilberto. Ces sols présentent des valeurs de REU plus faibles qu'en Belgique (4% à Pianelli, 8% à Gilberto). L'hystérèse tient un rôle important, la REU des deux parcelles pouvant être très similaire ou dissimilaire selon l'état hydrique initial du sol. Les deux différences majeures entre ces parcelles sont l'exposition solaire (versant sud-ouest à Gilberto et plaine à Pianelli) et la présence d'une couche de sol compactée à Gilberto à partir d'une dizaine de cm de profondeur, réduisant le développement des racines de la vigne, le passage de l'eau en profondeur et la REU du sol. En outre, la dynamique de gonflement-retrait plus prononcée à Gilberto est propice au maintien d'une

contrainte hydrique favorable. Ces propriétés confèrent aux vins produits à Gilberto un potentiel qualitatif plus élevé.

Le présent travail ne se concentre que sur un nombre limité de facettes de ce que constitue un *terroir*. Il fait suite à l'étude d'ENGELEN, 2016, caractérisant plus largement le terroir du vignoble Terracuda. Il s'agit de faire de même pour les deux terroirs belges. Une fois les terroirs caractérisés, il serait intéressant d'étudier plus précisément la vigne sur plusieurs années et suivre son statut hydrique. L'étude du moût et du vin sur plusieurs années peut aussi apporter des éclairages intéressants quant à l'influence du terroir sur les qualités organoleptiques du produit fini. Ces études seraient d'autant plus intéressantes, que les articles publiés portant sur l'influence de la disponibilité en eau sur la qualité du vin concernent des vins rouges, pour lesquels les composés d'intérêt sont très différents de ceux des vins blancs.

Toutes destinées à la production de vin blanc de qualité, ces quatre parcelles sont très différentes sur les plans climatique, géologique et pédologique (propriétés physiques et chimiques). Ces terroirs très différents offrent des potentiels variés. Pour valoriser ceux-ci au mieux, il s'agit de connaître les spécificités de chacun et d'y adapter le choix du matériel végétal, de l'entretien du sol et des pratiques culturales pour en tirer parti. La viticulture wallonne n'est qu'à ses prémices, mais une bonne connaissance des propriétés des terroirs ainsi qu'une prise de décision informée permettra sans doute de voir fleurir des vignobles dans nos campagnes et des étals de vins belges dans nos magasins dans les années à venir.

Bibliographie

1. ABATE, G. L., LORENZETTI, R. & MAGINI, S. *The Soils of Italy* **December 2015**. ISBN : 978-94-007-5641-0. doi :[10.1007/978-94-007-5642-7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5642-7) (2013).
2. ALVES, F., EDLMANN, M., COSTA, J., COSTA, P., MACEDO, P., LEAL DA COSTA, P. & SYMINGTON, C. Heat requirements and length of phenological stages. Effects of rootstock on red grape varieties at Douro region. 2013.
3. BAIZE, D., JAMAGNE, M., AUBERT, G. & DOSSO, M. *PÉDOLOGIE* <https://www.universalis.fr/encyclopedie/pedologie/> (2018).
4. BIELDERS, C. *LBRES2105 - Soil erosion and conservation - Detachment, transport and sedimentation* in (2016).
5. BIELDERS, C. & JAVAUX, M. *LBRES2103 - Cours de physique du sol* 2015.
6. BLAVET, D. & FARDOUX, J. *Méthode densimétrique simplifiée pour l'estimation sur mottes de terre de la porosité totale et de caractéristiques associées (masse volumique apparente, masse volumique pseudo réelle sèche) : protocole : evaluation des biais et des incertitudes* 1993.
7. BOULVAIN, F. & PINGOT, J.-L. *Une introduction à la géologie de la Wallonie* 2018. <http://www.geolsed.ulg.ac.be/geolwal/geolwal.htm> (2018).
8. BOUR, I. *Thèse de Doctorat* thèse de doct. (Université Paris-Sud, Orsay, 2010). <http://geologie-et-alpes.pagesperso-orange.fr/tfa/texte/ardenne.html>.
9. BREWER, R. *Fabric and mineral analysis of soils*. <http://www.worldcat.org/title/fabric-and-mineral-analysis-of-soils/oclc/769107> (Wiley, New York, 1964).
10. CALAY, V. *Transition prairie-culture : un essai sur la mémoire du sol en région limoneuse brabançonne* rapp. tech. (Université catholique de Louvain, 2017).
11. CASTERAN, P., CARBONNEAU, A. & LECLAIRE, P. Structure de populations de vigne : Analyse des phénomènes de compétition entre plantes. *Vitis* **19**, 121-133 (1980).
12. CHRISTENSEN, L. P. *Grapevine nutrition and fertilization : in the San Joaquin Valley* (erkeley, CA. : University of California, Division of Agricultural Sciences, 1978).
13. COSTANTINI, E., URBANO, F. & L'ABATE, G. Soil regions of Italy. *CRA-ISSDS, Firenze* (2004).
14. CRENN, C. & TECHOUEYRES, I. *Anthropology of food : AOF*. (Anthropology of food, 2001).

15. DE VUYST, O. *Inventaire des agents pathogènes et des ravageurs de la vigne en Wallonie dans le cadre de l'implantation d'un vignoble didactique au centre Alphonse de Marbaix à Corroy-le-Grand* rapp. tech. (Université catholique de Louvain, 2016).
16. De LIEDEKERKE, G. *Etude du terroir et de la relation sol-plante sur la nutrition de la vigne et son impact sur la qualité potentielle des vins de la Région wallonne* thèse de doct. (Université catholique de Louvain, 2017).
17. DELOIRE, A. Unravelling the terroir mystique - an agro-socio-economic perspective. *CAB Rev. Perspect. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Resour.* **3**. ISSN : 17498848. doi :10.1079/PAVSNR20083032 (juin 2008).
18. DELOIRE, A., VAUDOUR, E., CAREY, V., BONNARDOT, V. & LEEUWEN, C. V. Grapevine responses to terroir : a global approach. *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin* **39**, 149-162 (2005).
19. DELOIRE, A., VAUDOUR, E., CAREY, V. A., BONNARDOT, V. & VAN LEEUWEN, C. Grapevine responses to terroir : a global approach. *OENO One* **39**, 149. ISSN : 2494-1271 (déc. 2005).
20. DELVAUX, B. *LBRES2203 - Gestion et aménagement des sols en région chaude* 2018.
21. DEMANGEOT, J. & AUBOUIN, J. APENNIN - *Encyclopædia Universalis* https://www.universalis.fr/encyclopedie/apennin/%7B%5C#%7Di%7B%5C_%7D35940 (2018).
22. DES GACHONS, C. P., VAN LEEUWEN, C., TOMINAGA, T., SOYER, J. P., GAUDILLÈRE, J. P. & DUBOURDIEU, D. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L cv Sauvignon blanc in field conditions. *J. Sci. Food Agric.* **85**, 73-85. ISSN : 00225142 (2005).
23. DIENST, V. *Le potentiel viticole wallon : Approche cartographique et étude terroir* (2015).
24. DURIEUX, G. & VANEL, M. *Vignobles de la Sambre et de Meuse, 12 siècle d'histoire* (2013).
25. DURNER, W. Hydraulic Conductivity Estimation for Soils with Heterogeneous pore Structure. *Water Resour. Res.* **30**, 211, 223. ISSN : 00431397 (1994).
26. ENGELÉN, C. *Contribution à l'étude des terroirs de l'exploitation viticole Terra Cruda (Les Marches , Italie)* rapp. tech. (Université catholique de Louvain, 2016).
27. FARQUHAR, G., EHRLINGER, J. & HUBICK, K. in *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **40** :503-37 (1989). doi :1040-2519/89/0601-503.
28. FREDLUND, D., XING, A. & HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.* **31**, 533-546. ISSN : 0008-3674 (août 1994).
29. GADE, D. W. Tradition, Territory, and Terroir in French Viniculture : Cassis, France, and Appellation Contrôlée. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* **94**, 848-867. ISSN : 1467-8306 (déc. 2004).
30. GALET, P. *Dictionnaire Encyclopédique des Cépages* (éd. HACHETTE) 105 (2000).

31. HALKIN, J. *Etude historique sur la culture de la vigne en Belgique* ISBN : 2-9600558-0-2 (1895).
32. HARDIE, W. J. & CONSIDINE, J. a. Response of Grapes To Water-Deficit Stress in Particular Stages of Development. *Am. J. Enol. Vitic.* **27**, 55-61. ISSN : 0002-9254 (1976).
33. HASELGROVE, L., BOTTING, D., HEESWIJCK, R., HØJ, P., DRY, P., FORD, C. & LAND, P. I. Canopy microclimate and berry composition : The effect of bunch exposure on the phenolic composition of *Vitis vinifera* L cv. Shiraz grape berries. *Aust. J. Grape Wine Res.* **6**, 141-149. ISSN : 1322-7130 (juil. 2000).
34. HILLEL, D. *Soil and Water - Physical Principles and Processes* (éd. ACADEMIC PRESS, I.) (Harcourt Brace Jovanovich, Rehovot, Isreal, 1971).
35. HUGLIN, P. in *Comptes rendus des Scéances l'Académie d'Agriculture Fr.* **64** 1117-1126 (1978).
36. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2014 : Synthesis Report.* 2-26. ISBN : 9789291691432. doi : [10.1017/CB09781107415324](https://doi.org/10.1017/CB09781107415324) (2014).
37. JACKSON, D. & LOMBARD, P. Environmental and Management Practices Affecting Grapes COMposition and Wine Quality - A review. *Am. J. Enol. Vitic.* **44**, 55-61. ISSN : 0002-9254 (jan. 1993).
38. JONES, G. V. & DAVIS, R. E. Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *Am. J. Enol. Vitic.* **51**, 249-261. ISSN : 00029254 (2000).
39. KOUNDOURAS, S., VAN LEEUWEN, C., SEGUIN, G. & GLORIES, Y. Influence De L'Alimentation En Eau Sur La Croissance De La Vigne , La Maturation Des Raisins Et Les Caractéristiques Des Vins En Zone Méditerranéenne (Exemple De Némée , Grèce , Cépage Saint-Georges , 1997) Influence of Water Status on Vine Vegetative, 149-160 (1997).
40. LA REVUE DU VIN DE FRANCE. *Vin italien : un classement en quatre catégories - La Revue du vin de France* 2008. <http://www.larvf.com/,vins-italie-doc-igt-vins-etrange-s-oenologie-crus-cepages-marche-des-vins-italiens-classification-a,10339,4026259.asp> (2018).
41. LAMBOT, S. & VANCLOOSTER, M. *LBRES2102 : Hydrodynamique des sols TP6 - Le perméamètre à succion* 2012.
42. LEBRUN, R. *Typicité du vin et réponses de la vigne aux contraintes du terroir* thèse de doct. (AgroParisTech, 2016).
43. LEEUWEN, C. V., TREGOAT, O., CHONE, X., BOIS, B., PERNET, D. & GAUDILLER, J. P. 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. des Sci. la Vigne du Vin* **43**, 121-134. ISSN : 11510285 (2009).
44. LEEUWEN, C. V., FRIANT, P., CHONÉ, X., TREGOAT, O., KOUNDOURAS, S. & DUBOURDIEU, D. Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir.pdf. *Am. J. Enol. Vitic.* **3**, 207-217. ISSN : 00029254 (2004).

45. LEONG, E. & WIJAYA, M. Universal soil shrinkage curve equation. *Geoderma* **237-238**, 78-87. ISSN : 0016-7061 (jan. 2015).
46. MA CAVE À VIN. *Les régions viticoles d'Italie : les Marches* <https://www.ma-cave-a-vin.fr/blog/2014/12/les-regions-viticoles-ditalie-les-marches/> (2018).
47. MABY, J. Paysage et imaginaire : l'exploitation de nouvelles valeurs ajoutées dans les terroirs viticoles / Landscape and Imagination : the Exploitation of New Added Values in the Wine-Growing Countries. *Ann. Geogr.* **111**, 198-211. ISSN : 0003-4010 (2002).
48. MATTHEWS, M. A., ANDERSON, M. M. & SCHULTZ, H. R. Phenologic and growth responses to early and late season water deficits in Cabernet franc. *Vitis* **26**, 147-160. ISSN : 0042-7500 (1987).
49. MORLAT, R., BARBEAU, G. & ASSELIN, C. Facteurs naturels et humains des terroirs viticoles français : méthode d'étude et valorisation. *Études Rech. sur les Systèmes Agraires le Développement*, 111-127 (2001).
50. MORLAT, R. 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. <http://www.theses.fr>. <http://www.theses.fr/1989BOR22019> (jan. 1989).
51. MORLAT, R., REMOUÉ, M. & PINET, P. Influence de la densité de plantation et du mode d'entretien du sol sur l'enracinement d'un peuplement de vigne planté en sol favorable. *Agronomie* **4**, 485-491 (1984).
52. MORTLAT, R. *The relationships between "terroir", vine and wine* rapp. tech. (1998). <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR1998003773>.
53. MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* **12**, 513-522. ISSN : 00431397 (juin 1976).
54. NICOD, J. Vaudour E., Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation et protection. *Ann. Geogr.* **113**, 336-336 (2004).
55. OJEDA, H., DELOIRE, A. & CARBONNEAU, A. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* **40**, 141-145. ISSN : 00427500 (2001).
56. OPUSVINS. *Le cycle de la vigne* <http://www.opusvins.com/cycle-vigne.html> (2018).
57. PARKER, A. K., DE CORTÁZAR-ATAURI, I. G., VAN LEEUWEN, C. & CHUINE, I. General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Aust. J. Grape Wine Res.* **17**, 206-216. ISSN : 13227130 (2011).
58. PARKER, A., DE CORTÁZAR-ATAURI, I., VAN LEEUWEN, C. & CHUINE, I. General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Aust. J. Grape Wine Res.* **17**, 206-216. ISSN : 13227130 (juin 2011).

59. PASTOR DEL RIO, J. L. & KENNEDY, J. a. Development of procyanidins in *Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir grapes and extraction into wine. *Am. J. Enol. Vitic.* **57**, 125-132 (2006).
60. PENG, X., ZHANG, Z., WANG, L. & GAN, L. Does soil compaction change soil shrinkage behaviour? *Soil Tillage Res.* **125**, 89-95. ISSN : 0167-1987 (sept. 2012).
61. PEREIRA, G. E., GAUDILLERE, J.-P., van LEEUWEN, C., HILBERT, G., MAUCOURT, M., DEBORDE, C., MOING, A. & ROLIN, D. 1H NMR metabolite fingerprints of grape berry : Comparison of vintage and soil effects in Bordeaux grapevine growing areas. *Anal. Chim. Acta* **563**, 346-352. ISSN : 0003-2670 (mar. 2006).
62. PIALLI, G., PLESI, G., DAMIANI, A. & BROZETTI, F. in *Note Illus. della Cart. Geol. d'Italia alla scala 150.000 foglio 289* (1960).
63. PL@NTGRAPE. *Pl@ntGrape, le catalogue des vignes cultivées en France* <http://plantgrape.plantnet-project.org/fr> (2018).
64. QUENOL, H. (-. . & SEGUIN, B. *Changements climatiques et terroirs viticoles* 460. ISBN : 9782743015756. <https://hal.univ-brest.fr/hal-00992444/> (Tec & Doc, 2014).
65. QUÉNOL, H., PLANCHON, O. & WAHL, L. Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bull. la Société géographique Liège* **51**, 127-137 (2008).
66. RICHARDS, L. A. CAPILLARY CONDUCTION OF LIQUIDS THROUGH POROUS MEDIUMS. *Physics (College. Park. Md).* **1**, 318-333. ISSN : 0148-6349 (nov. 1931).
67. ROBERTO, B. *et al.* CARTA DEI SUOLI D ' ITALIA. **000**, 16-17 (2015).
68. ROUX, M. MARCHES, *Italie - Encyclopædia Universalis* <https://www.universalis.fr/encyclopedie/marches-italie/> (2018).
69. RUTHY, I., van ELLEN, T. & DASSARGUES, A. Crétacé du Pays de Herve. *Watervoerende lagen en Grondwater België / Aquifères Eaux Souterr. en Belgique*, 191-203 (2014).
70. SCHIRMER, R. Les vins du Nouveau Monde sont-ils a-géographiques ? (Are the wines of the New World a-geographics?) *Bull. Assoc. Geogr. Fr.* **84**, 65-80. ISSN : 0004-5322 (2007).
71. SCIENZA, A., GIOTGIANNI, A., TOMASI, D., GAIOTTI, F., GRAZIANI, F., MARIANI, L. & CARNEVALI, P. *ATLANTE geologico dei VINI d'ITALIA* (éd. S.P.A, G. E.) (Firenze, Italia, 2015).
72. SEGION, G. 'Terroirs' and pedology of vinegrowing. *Experientia* **42**, 861-873 (1986).
73. SEGUIN, G. Alimentation en eau de la vigne dans des sols du Haut-Médoc. *Connaiss. la Vigne du Vin* **2**, 93-141 (1969).
74. SEGUIN, G. Influence des terroirs viticoles sur la constitution et la qualité des vendanges. *Bull. de l'O.I.V.* **56**, 3-18 (1983).

75. SEGUINOT, D. *Les vins : Petit Chablis, Chablis, Chablis Vieilles Vignes, Chablis 1er Cru Fourchaume, Chablis 1er Cru Homme Mort du Domaine* http://chablis-daniel-seguinot.com/fr%7B%5C_%7Dseguinot/vins-chablis-seguinot.php (2018).
76. SELTENSPERGER, C. *Dictionnaire d'Agriculture et de Viticulture* 1911.
77. ŠIMŮNEK, J., van GENUCHTEN, M. & SEJNA, M. The DISC computer software for analyzing tension disc infiltrometer data by parameter estimation. Version 1.0. *US Salin. Lab. USDA, ARS, ...* 1-24 (2000).
78. SON, H.-S., HWANG, G.-S., KIM, K. M., AHN, H.-J., PARK, W.-M., VAN DEN BERG, F., HONG, Y.-S. & LEE, C.-H. Metabolomic Studies on Geographical Grapes and Their Wines Using ¹H NMR Analysis Coupled with Multivariate Statistics. *J. Agric. Food Chem.* **57**, 1481-1490. ISSN : 0021-8561 (fév. 2009).
79. SPAYD, S., TARARA, J., MEE, D. & FERGUSON, J. *American journal of enology and viticulture*. **3**, 171-182 (American Society of Enologists, jan. 2002).
80. STIPO, N. Characterization and modeling of water infiltration in a swelling soil in the Palo Verde National Park , Costa Rica (2015).
81. STOLL, M. Effects of partial rootzone drying on grapevine physiology and fruit quality. *October* (2000).
82. TEIL, G. No Such Thing as Terroir? *Sci. Technol. Hum. Values* **37**, 478-505. ISSN : 0162-2439 (sept. 2012).
83. TERRACRUDA. *Terracruda Winery in Fratterosa - Fine wines IGT and DOC from the Marches* <http://www.terracruda.it/en/> (2018).
84. THERIN, F. Pernod Ricard développe ses activités viticoles en Australie. *Le Monde*. http://www.lemonde.fr/archives/article/2002/02/08/pernod-ricard-developpe-ses-activites-viticoles-en-australie%7B%5C_%7D261980%7B%5C_%7D1819218.html?xtmc=jacob%7B%5C_%7Ds%7B%5C_%7Dcreek%7B%5C_%7Dxtcr=2 (2002).
85. TONIETTO JORGE. *Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France* thèse de doct. (Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 1999). <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/538750/1/tonietto1999.pdf>.
86. TONIETTO, J. & CARBONNEAU, A. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agric. For. Meteorol.* **124**, 81-97. ISSN : 0168-1923 (juil. 2004).
87. TREGOAT, O., VAN LEEUWEN, C., CHONÉ, X. & GAUDILLÈRE, J.-P. Etude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. Influence sur le comportement de la vigne et maturation du raisin (*Vitis Vinifera* L., CV Merlot, 2000, Bordeaux). *J. Int. Sci. Vigne Vin* **36**, 133-142 (2002).
88. VAN LEEUWEN, C., GOUTOULY, J., COSTA-FERREIRA, A., AZAÏS, C., MARGUERIT, E., ROBY, J., CHONÉ, X., GERMAIN, C. & HOMAYOUNI, S. GAUDILLERE, J. Intra-block variations of vine water status in time and space. *Proc. VIth Int. Terroir Congr.* 64-69 (2006).

89. VAN LEEUWEN, C., LERICH, O., RENARD, R., TREGOAT, O. & ALLA, P. L. Micromorphometric changes in trunk diameter in relation to mild water stress in field grown vines. *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin* **34**, 41-47. ISSN : 11510285 (2000).
90. VAN LEEUWEN, C. & SEGUIN, G. The concept of terroir in viticulture. *J. Wine Res.* **17**, 1-10. ISSN : 09571264 (2006).
91. VAN LEEUWEN, C., VIVIN, P., CHONÉ, X., TREGOAT, O., JAECK, M.-E., RABUSSEAU, S. & GAUDILLÈRE, J.-P. Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins. *Innov. Agron.* **2**, 159-167 (2008).
92. VAN LEEUWEN, C., TRÉGOAT, O., CHONÉ, X., BOIS, B., PERNET, D. & GAUDILLÈRE, J.-P. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One* **43**, 121. ISSN : 2494-1271 (sept. 2009).
93. Van GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**, 892. ISSN : 0361-5995 (jan. 1980).
94. Van LEEUWEN, C., SCHULTZ, H. R., GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI, I., DUCHENE, E., OLLAT, N., PIERI, P., BOIS, B., GOUTOULY, J.-P., QUENOL, H., TOUZARD, J.-M., MALHEIRO, A. C., BAVARESCO, L. & DELROT, S. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **110**, E3051-E3052. ISSN : 0027-8424 (août 2013).
95. Van LEEUWEN, C. in *Soil Cult.* E.R. Landa, 453-465 (Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht, 2010). doi : [10.1007/978-90-481-2960-7_28](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2960-7_28).
96. Van LEEUWEN, C. & CHÉRY, P. Quelle méthodes pour caractériser et étudier le terroir viticole : analyses de sols, cartographie pédologique, ou étude écophysiological? *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin* **hors série** (2001).
97. Van LEEUWEN, C. & DARRIET, P. The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *J. Wine Econ.* **11**, 150-167. ISSN : 1931-4361 (mai 2016).
98. VANDERLINDEN, C. *Étude et définition du terroir d ' une zone potentielle pour la mise en place d ' un vignoble didactique au centre Alphonse de Marbaix (Louvain-la-Neuve) et sélection de cépages et portes greffes adaptés* rapp. tech. (Université catholique de Louvain, 2015).
99. VAUDOUR, E. Les terroirs viticoles. Définitions, caractérisation et protection. 312 (2003).
100. WEYNANTS, M. *Linking soil hydraulic properties to structure indicators - Experiments and modelling* thèse de doct. (Université catholique de Louvain, 2011).
101. WHITE, R. *Soils for fine wines* (Oxford University Press, 2003).

Propriétés hydriques et hydrodynamiques de quatre parcelles viticoles à contraintes hydriques contrastées

Présenté par Hélène Sosnowski

Résumé L'environnement physique joue un rôle prépondérant dans la qualité du vin. D'abord le climat, vient ensuite le sol et particulièrement sa capacité à contraindre la vigne, notamment la contrainte hydrique. L'objectif du présent travail est d'appréhender la contrainte hydrique de différents sols viticoles, en caractérisant leurs propriétés hydriques et hydrodynamiques. A la lumière de ces caractéristiques, une réflexion sur les pratiques culturales est réalisée. Quatre parcelles sont sélectionnées, toutes cultivées avec des cépages blancs destinés à la production de vin blanc. Le cépage des deux parcelles belges est le *Chardonnay*. Une des parcelles est située dans le Brabant Wallon, le climat y est frais selon HUGLIN, 1978. Le sol est un limon peu caillouteux avec une réserve en eau utile (REU) élevée (15%). Il présente une conductivité hydraulique à saturation (Ks) faible. La densité de plantation très élevée permet l'augmentation de l'évapotranspiration et de la compétition pour l'alimentation hydrique mais également un développement plus important des racines de faible diamètre, présentant une grande surface d'absorption. La seconde parcelle belge est située à Dahlem, au Domaine des Marnières. Le climat y est frais à tempéré. Le sol y est calcarifère et argilo-limoneux à charge caillouteuse élevée. La REU est moindre (9%) et la macroporosité élevée confère au sol une meilleure infiltration. Les pratiques culturales sur ces deux parcelles sont orientées vers la diminution du rendement (éclaircissage, ébourgeonnage) et la maximisation de la compétition pour l'alimentation hydrique (enherbement permanent). Parmi ces deux parcelles, celle des Marnières semble offrir un meilleur potentiel à celui du vignoble brabançon pour la production de Chardonnay, vu le climat plus chaud, la REU moindre et le caractère calcarifère du sol. Les deux dernières parcelles appartiennent au vignoble de Terracuda, en Italie. Le cépage local est le *Bianchetto Del Metauro*. Le climat y est tempéré chaud à chaud. Le sol y est calcarifère et argileux, à caractère gonflant. Pianelli est situé dans une plaine alluviale, le sol atteint 60% d'argile, découlant sur une REU faible (4%). Malgré cela, le sol présente une macroporosité importante, résultant sur un Ks élevé. Gilberto est situé sur un versant exposé S-O. Sa valeur de REU moyenne est de 8%. La particularité de cette parcelle est une couche compactée à partir de 10 cm de profondeur de sol. Seules de rares racines de diamètre élevé parviennent à la traverser, limitant la densité racinaire de la vigne. De plus, le passage de l'eau est fortement ralenti. Les deux parcelles sont vendangées et vinifiées séparément, le vin produit à Gilberto est de qualité nettement supérieure à celui produit sur Pianelli. Cela est vraisemblablement dû à l'exposition plus favorable de Gilberto ainsi que cette couche compactée, réduisant l'eau disponible pour la plante via la diminution de la densité racinaire et l'infiltration de l'eau.