UCLouvain

AGRO LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Dynamique de la teneur en eau dans deux vignobles wallons enherbés dans l'inter-rang

Auteur : Clémence Becker

Promoteur : Prof. Bruno Delvaux (UCLouvain/ELIE)

Lecteurs : Prof. Sébastien Lambot (UCLouvain/ELIE)
Dr. Charles Vander Linden (UCLouvain/ELIE)

Année académique 2018-2019
Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur : Sciences et technologies de l'environnement

« Un vin, comme la poésie, doit naître dans la souffrance »

Aimé Guibert

Remerciements

En premier lieu, je remercie évidemment mon promoteur, Prof. Bruno Delvaux pour m'avoir encadrée et suivie durant la réalisation de ce mémoire. Merci pour votre enthousiasme lors des journées de terrain, merci d'avoir su calmer mon « anxiété anticipative » et merci de m'avoir offert la chance de travailler sur un sujet qui me passionne.

Je tiens ensuite à remercier Vincent Dienst d'avoir rendu ce mémoire possible ainsi que Michel Verhaeghe de Naeyer de nous avoir ouvert les portes de son vignoble. De même, je remercie Sophie Wautier et Dimitri Vander Heyden de m'avoir permis de faire des mesures au Domaine W ainsi que d'avoir toujours été disponibles pour répondre à mes questions.

Mes remerciements s'adresse à mes deux lecteurs, Prof. Sébastien Lambot et Charles Vander Linden pour le temps passé à la lecture et à l'évaluation de ce travail. Merci également au Prof. Lambot pour son aide avec le GPR et à Charles pour son aide en statistiques.

Un grand merci à Sébastien François d'avoir toujours été disponible et dans la bonne humeur pour les nombreuses journées de terrain.

Merci à Éléonore de Roissart, pour son aide précieuse en reconnaissance de plantes ainsi que t'avoir été une colocataire si exceptionnelle.

J'aimerais remercier Marion Trigaux, ma partenaire de mémoire et ma vignobestouille. Merci pour les kopeckis ratés, pour le trou de la mauvaise humeur, pour les photos devant les vignes et pour avoir apporté une touche de rire pendant chaque terrain passé ensemble.

Pour finir, je voudrais remercier mes parents de m'avoir soutenue pendant mon parcours universitaire et je remercie particulièrement ma maman pour la relecture de ce travail.

Table des matières

Liste des abréviations III

Liste des figures V

Liste des tableaux VII

Introduction 1

1. Revue de la littérature 3

1.1 La notion de terroir 3

1.1.1 Facteurs biologiques 3

1.1.2 Facteurs environnementaux 4

1.1.2.1 Le climat 4

1.1.2.2 Le sol 6

1.1.2.3 La topographie 6

1.1.3 Facteurs humains 7

1.2 L'alimentation en eau de la vigne 7

1.3 L'eau dans le sol 11

1.3.1 Texture du sol 11

1.3.2 Structure du sol 12

1.3.3 Caractérisation de l'eau du sol 12

1.4 L'enherbement du vignoble 14

2. La viticulture en Wallonie 17

2.1 Histoire de la viticulture en Wallonie 17

2.2 La viticulture wallonne aujourd'hui 18

3. Le contexte 21

3.1 Description 21

3.2 Climat 23

3.3 Sol 25

3.4 Topographie 25

3.5 Matériel végétal 26

3.5.1 Cépages 26

3.5.2 Porte-greffes 27

3.6 Enherbement 27

4. Matériel et méthodes 29

4.1 Sélection des parcelles et des sites d'échantillonnage 29

4.2 Échantillons de sol 30

4.3 Variation de la profondeur de la couche de limon 31

4.3.1 Par sondage 31

4.3.2 Avec GPR 32

4.3.2.1 Caractéristiques du radar 32

4.3.2.2 Traitement des données 33

4.4 Pesée des sarments **33**
4.5 Mesure de la densité apparente **34**
4.6 Granulométrie **34**
4.7 Mesure de la réserve en eau utile **35**
4.7.1 Mesure de la teneur en eau à la capacité au champ 35
4.7.2 Mesure de la teneur en eau au point de flétrissement permanent 36
4.8 Mesure de la teneur en eau **38**
4.9 Mesure du potentiel matriciel et de la température **39**
4.10 Analyses statistiques **40**
5. Résultats **41**
5.1 Vignoble du Château de Bousval **41**
5.1.1 Variation de la profondeur de la couche de limon 41
5.1.1.1 Par sondage 41
5.1.1.2 Avec GPR 42
5.1.2 Pesée des sarments 44
5.1.3 Granulométrie 46
5.1.4 Densité apparente 47
5.1.5 Teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, réserve en eau utile 48
5.1.6 Teneur en eau 50
5.1.7 Potentiel matriciel 53
5.1.8 Température du sol 54
5.2 Domaine W **56**
5.2.1 Granulométrie 56
5.2.2 Densité apparente 57
5.2.3 Teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, réserve en eau utile 57
5.2.4 Teneur en eau 58
5.2.5 Potentiel matriciel 59
5.2.6 Température du sol 60
6. Discussion **63**
6.1 Distribution et type de sols **63**
6.2 Réserve en eau utile et teneur en eau **64**
6.3 Contrainte hydrique et enherbement **69**
7. Perspectives **73**
Conclusion **75**
Bibliographie **77**
Annexe **81**

Liste des abréviations

AOP : Appellation d'origine protégée
CC : Capacité au champ
IGP : Indication géographique protégée
IH : Indice héliométrique d'Huglin
PFP : Point de flétrissement permanent
REU : Réserve en eau utile
SPW : Service Public de Wallonie
USDA : United States Department of Agriculture

Liste des figures

Figure 1.1 - Courbe de rétention pour un sol argileux, limoneux et sableux (Bielders et Javaux, 2016) 13
Figure 2.1 - Superficie et production viticoles en Belgique de 2006 à 2017 18
Figure 2.2 - Proportions des quatre grands types de vins par rapport à la production totale de vin en 2017 en Flandre (à gauche) et en Wallonie (à droite) 19
Figure 3.1 - Localisation de la parcelle étudiée au Château de Bousval 21
Figure 3.2 - Localisation de la parcelle étudiée au Domaine W + localisation du site de mesure 22
Figure 3.3 - Précipitations moyennes mensuelles entre 2014 et 2018 à Bousval et Tubize ... 24
Figure 3.4 - Altitude sur la parcelle au Château de Bousval 26
Figure 4.1 - Sites d'échantillonnage au Château de Bousval 29
Figure 4.2 - Position des sites d'échantillonnage dans la pente au Château de Bousval 30
Figure 4.3 - Prise d'un cylindre kopecki à s 30
Figure 4.4 - Prise de cylindres kopecki à p 30
Figure 4.5 - Points de sondage au Château de Bousval 32
Figure 4.6 - Délimitation de deux zones en fonction de la contrainte hydrique au Château de Bousval 34
Figure 4.7 - Cylindres kopecki avec membranes de nylon avant la saturation (BBPs+p, PMPs+p, BHPs+p, SAB) 35
Figure 4.8 - Bac de saturation 35
Figure 4.9 - Casserole à basse pression avec cylindres kopecki 36
Figure 4.10 - Casserole à basse pression fermée 36
Figure 4.11 - Échantillons déstructurés sous forme de boue homogène 37
Figure 4.12 - Échantillons à la sortie de la casserole à haute pression 37
Figure 4.13 - Tarière pour le prélèvement d'échantillons 38
Figure 4.14 - Installation des sondes TEROS 21: sondes (a), datalogger et batterie (b), boitier final (c) 39
Figure 5.1 - Épaisseur de la couche de limon aux points de sondage 41
Figure 5.2 - Interpolation de l'épaisseur de la couche de limon aux points de sondage 42
Figure 5.3 - Profil GPR pour le transect entre le rang 25 et 26 43
Figure 5.4 - Profil GPR pour le transect entre le rang 45 et 46 43
Figure 5.5 - Profil GPR pour le transect entre le rang 85 et 86 43
Figure 5.6 - Profil GPR pour le transect entre le rang 95 et 96 44
Figure 5.7 - Poids moyen des sarments par pied pour le plateau et la vallée pour la prétaille (a) et taille (b) 45
Figure 5.8 - Différence du poids des sarments entre le bas et le haut de pente pour plusieurs rangs de vigne 45

Figure 5.9 - Épaisseur de la couche de limon et numéro des rangs 46
Figure 5.10 - Triangle textural pour les échantillons du Château de Bousval 47
Figure 5.11 - Teneur en eau massique $(x \pm \sigma)$ pour les différents échantillons du Château de Bousval 49
Figure 5.12 - Réserve en eau utile pour les différents sites d'échantillonnage du Château de Bousval 50
Figure 5.13 - Évolution du potentiel matriciel et de la pluviosité au Château de Bousval en haut de pente 53
Figure 5.14 - Évolution du potentiel matriciel et de la pluviosité au Château de Bousval en bas de pente 54
Figure 5.15 - Évolution de la température à 15 cm de profondeur entre le 1er mai et le 25 juin au Château de Bousval 55
Figure 5.16 - Triangle textural pour les échantillons du Domaine W 56
Figure 5.17 - Teneur en eau massique $(x \pm \sigma)$ pour les différents échantillons du Domaine W 57
Figure 5.18 - Réserve en eau utile pour les différents sites d'échantillonnage du Domaine W 58
Figure 5.19 - Évolution du potentiel matriciel et de la pluviosité au Domaine W 60
Figure 5.20 - Évolution de la température à 15 cm de profondeur entre le 1er mai et le 16 juin au Domaine W 61
Figure 6.1 - Valeur de teneur en eau à la capacité au champ et à pF 2,5 (Bruand et al., 1996) 67
Figure 6.2 - Écarts quadratiques moyens entre la teneur en eau à la capacité au champ et au potentiel matriciel de -10, -30, -100, -330 et -1000hPa (Bruand et al., 1996) 68
Figure 7.1 - Évolution du potentiel matriciel mesuré par les sondes en haut de pente au Château de Bousval 81
Figure 7.2 - Évolution du potentiel matriciel mesuré par les sondes en bas de pente au Château de Bousval 81
Figure 7.3 - Évolution du potentiel matriciel mesuré par les sondes au Domaine W 82

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Classification des climats viticoles selon l'indice héliométrique d'Huglin 5
Tableau 3.1 - Caractéristiques des deux parcelles étudiées 23
Tableau 3.2 - Moyenne annuelle et mensuelle de pluviométrie à Bousval et Tubize 24
Tableau 3.3 - Indice héliométrique d'Huglin de 2010 à 2014 dans les deux vignobles 25
Tableau 4.1 - Date d'échantillonnage 38
Tableau 5.1 - Texture pour les échantillons du Château de Bousval 46
Tableau 5.2 - Moyenne arithmétique des densités apparentes et écart-type pour les échantillons du Château de Bousval 48
Tableau 5.3 - Moyenne arithmétique des teneurs en eau massique pour les échantillons du Château de Bousval 48
Tableau 5.4 - Teneur en eau par échantillonnage au Château de Bousval sur le plateau 51
Tableau 5.5 - Teneur en eau par échantillonnage au Château de Bousval en bas de pente .. 52
Tableau 5.6 - Texture des échantillons du Domaine W 56
Tableau 5.7 – Valeurs moyennes de la densité apparente et écarts-types pour les échantillons du Domaine W 57
Tableau 5.8 – Valeurs moyennes de la teneur en eau massique pour les échantillons du Domaine W 57
Tableau 5.9 - Teneur en eau par échantillonnage au Domaine W 58
Tableau 6.1 - Densité apparente mesurée et valeur typique de densité apparente en fonction de la classe texturale 64
Tableau 6.2 - Comparaison des teneurs en eau mesurées à celles proposées par Jamagne et al. (1977) 65
Tableau 6.3 - Comparaison des teneurs en eau mesurées avec celles proposées par Bruand et al. (2004) 66
Tableau 6.4 - Comparaison des teneurs en eau à pF 2,5 et pF 2,0 de Bruand et al. (2004) ... 68
Tableau 6.5 - Niveau de contrainte hydrique subie par la vigne (Riou et Payan, 2001) 70
Tableau 6.6 - Valeur du FTSW aux dates d'échantillonnages au Château de Bousval et au Domaine W 70

Introduction

En viticulture, à l'inverse de la majorité des cultures aujourd'hui, le rendement n'est pas le premier critère à maximiser. Les raisins n'expriment leur puissance aromatique et le vin ne révèle toute son excellence que lorsque la vigne est soumise à des contraintes, hydrique et azotée. Dans le cadre de ce travail, c'est la contrainte hydrique qui sera abordée. La vigne ne doit donc pas se trouver dans un confort hydrique mais à l'inverse, la contrainte ne doit pas être trop forte et soumettre la vigne à un stress. La teneur en eau du sol disponible pour la vigne doit être comprise dans une fine gamme pour permettre à la vigne de se développer dans un état de contrainte hydrique idéal pour la qualité des baies. Cette teneur en eau est influencée par le type de sol et la pluviosité mais également par des facteurs sur lesquels le vigneron peut jouer tels que le choix du matériel végétal, le système de conduite de la parcelle ou encore l'entretien du sol, notamment l'enherbement.

La surface viticole belge a été multipliée par cinq ces dix dernières années. Il semble donc judicieux d'étudier l'adéquation de la vigne avec le terroir belge et plus spécifiquement wallon en termes de contrainte hydrique. La pluviosité est importante en Belgique. Les sols limoneux y sont répandus et ils présentent une réserve en eau utile élevée. Dans ce contexte environnemental il n'est pas toujours aisé d'imposer à la vigne une contrainte hydrique.

Dans le cadre de ce travail, deux parcelles de deux vignobles wallons ont été sélectionnées. Le premier vignoble est celui du Château de Bousval, situé sur la commune de Genappe. La parcelle étudiée, plantée de Chardonnay, présente une pente de 8%. Une couche de limon y recouvre le sable bruxellien. L'épaisseur de la couche de limon varie avec la topographie, ce qui amène d'importantes différences en terme de réserve en eau utile entre le haut et le bas de la parcelle. Le deuxième vignoble est le Domaine W situé sur la commune de Tubize. La parcelle étudiée présente une topographie plane, un sol limoneux et est plantée de Pinot meunier. Ces deux parcelles sont enherbées dans l'inter-rang. L'enherbement est semé au Château de Bousval et naturel au Domaine W. L'objectif de ce mémoire est d'analyser les propriétés hydriques de ces sols et de déterminer si la vigne peut être soumise à une contrainte hydrique. Dans un premier temps, les caractéristiques de ces sols seront étudiées (granulométrie, densité apparente et réserve en eau utile). Ensuite, un suivi dynamique de la teneur en eau sera présenté via un échantillonnage régulier en surface et en profondeur.
Les mesures ont été réalisées entre octobre 2018 et juillet 2019.

1. Revue de la littérature

1.1 La notion de terroir

Le terroir est un concept difficile à appréhender. D'ailleurs, c'est un mot qui n'a pas d'équivalence dans d'autres langues ; dans de nombreux articles en anglais il n'est pas traduit. Pourtant, c'est un concept d'une haute importance en viticulture car il rassemble tous les facteurs qui participent à la typicité d'un vin. Selon van Leeuwen et Seguin (2006), le terroir relie les attributs sensoriels d'un vin aux conditions environnementales dans lesquelles les raisins ont été produits. Ce qui rend ce concept compliqué, c'est qu'il inclut différents facteurs qui interagissent entre eux : les facteurs biologiques (cépage et porte-greffe), les facteurs environnementaux (sol, climat et topographie) et les facteurs humains (contexte socio-économique, pratiques viticoles et œnologiques). Il est impossible de définir le sol parfait pour faire du vin car de grands vins sont produits sur des sols variés. Il en est de même pour le climat. Ces facteurs ne peuvent être analysés seuls mais bien dans leurs interactions avec la vigne (van Leeuwen et Seguin, 2006).
Afin de produire des vins de qualité, surtout dans la production de vins rouges, les vignes sont cultivées sous une contrainte environnementale, réduisant le rendement mais augmentant la qualité des raisins et par conséquent du vin (van Leeuwen, 2009).

Dans les sections qui suivent, les différents facteurs composant le terroir seront décrits.

1.1.1 Facteurs biologiques

Les facteurs biologiques sont principalement le porte-greffe et le cépage choisi.
Un cépage peut être défini comme la variété de vigne cultivée. En effet, il existe une multitude de variétés de vignes, plusieurs milliers, mais seulement quelques centaines sont cultivées en viticulture aujourd'hui. Les différents cépages se distinguent par l'anatomie de la plante, mais aussi au niveau des raisins : leurs composantes aromatiques, le taux d'acidité, l'épaisseur des peaux, la taille des baies… Tout cela a bien évidemment une influence primordiale sur le vin. Une autre caractéristique souvent recherchée pour choisir le cépage est la précocité de la maturation du raisin. Il est possible d'observer un décalage de deux mois entre le moment de maturité d'une variété à maturité précoce et une autre à maturité tardive. Cette caractéristique est utilisée pour adapter la vigne aux conditions climatiques, de sorte que la maturité du fruit se produise dans des conditions plus froides, à la fin de l'été voire au début de l'automne. C'est pourquoi, dans les hautes latitudes où le facteur limitant est le faible niveau de maturité du raisin (raisins verts engendrant des vins acides à taux d'alcool bas), des cépages à maturité précoce sont plantés, tels que le Pinot noir ou le Chardonnay (d'ailleurs fort présent en Belgique). Dès lors, les chances d'obtenir une maturité suffisante sont maximisées. À l'inverse, pour des latitudes plus basses, où le climat est plus chaud et où les raisins pourraient déjà être mûrs avant la fin de l'été, des cépages à

maturité tardive sont plantés, comme le Grenache ou le Mourvèdre. Ce type de viticulture, plus commune dans les pays de l'ancien monde, est appelée « cool-climate viticulture » (van Leeuwen et Seguin, 2006).

Un autre facteur important est le type de porte-greffe planté. C'est depuis la fin du 19e siècle et l'invasion du phylloxéra que la vigne est plantée sur un porte-greffe, créé à partir de vignes américaines, résistantes à ce puceron ravageur. À partir de ce moment, le choix du cépage et du système racinaire est dissocié. En plus de cette résistance, le porte-greffe offre la possibilité d'adapter le matériel végétal au type de sol (teneur en calcaire, pH, fertilité, régime hydrique…). C'est aussi un moyen de gérer la vigueur de la vigne : la vigueur d'un porte-greffe est généralement inversement proportionnelle à la richesse et à la profondeur du sol (van Leeuwen et Roby, 2001).

1.1.2 Facteurs environnementaux

1.1.2.1 Le climat

L'analyse du climat en viticulture s'effectue à trois échelles spatiales et temporelles (Deloire *et al.*, 2005):

- Le macroclimat

C'est le climat étudié à l'échelle d'une région ou du moins, d'une vaste superficie allant jusqu'à des centaines de kilomètres et sur des longues périodes de temps (30 ans ou plus) (Deloire *et al.*, 2005).

- Le mésoclimat

C'est le climat étudié à des petites échelles, de moins d'un hectomètre à quelques kilomètres et sur des périodes de temps journalières ou horaires. Si les variabilités climatiques sont dues au relief, à l'altitude, la pente, l'inclinaison, on parle aussi de topoclimat (Deloire *et al.*, 2005; van Leeuwen, 2009).

- Le microclimat

C'est le climat étudié à l'échelle de la vigne, de quelques centimètres au mètre sur quelques secondes ou minutes (Deloire *et al.*, 2005). Il est influencé par le type de sol, le système de conduction et de la taille de la vigne. Un sol sec va se réchauffer plus rapidement qu'un sol humide. Un pied bien taillé avec peu de feuilles laisse les rayons du soleil pénétrer la canopée, ce qui permet aux raisins d'atteindre plus rapidement la maturation (van Leeuwen, 2009).

La vigne peut s'adapter à de larges conditions climatiques, comme le témoignent les nombreux pays où l'on produit du vin. Cependant, un minimum de 1200 degrés jours en base de 10°C est nécessaire dans le cas des variétés les plus précoces, ce qui peut limiter la culture de la vigne dans les latitudes les plus élevées (van Leeuwen et Seguin, 2006). D'après van Leeuwen (2009) la zone la plus apte à la production de vin de qualité se situe entre le

35e et le 50e parallèle dans l'hémisphère Nord et entre le 32e et le 45e parallèle dans l'hémisphère Sud.

L'indice héliométrique de Huglin (IH) est généralement utilisé en viticulture pour comparer les climats des régions viticoles. Il a été développé par Huglin (1978) et il tient compte des valeurs de la température journalière moyenne et maximum ainsi que de la durée du jour pendant la période du cycle de la vigne (1er avril au 30 septembre dans l'hémisphère Nord). Il se calcule par la formule suivante :

$$IH = \sum_{01/04}^{30/09} \frac{(T-10)+(T_{max}-10)}{2}.d$$

avec T la température moyenne journalière (°C), T_{max} la température maximale journalière (°C) et d un coefficient de durée de jour (de 1,02 à 1,06 entre 40 et 50 degrés de latitude). L'indice divise les climats viticoles en six classes, présentées sur le Tableau 1.1, allant de très frais à très chaud (Huglin, 1978).

Tableau 1.1 - Classification des climats viticoles selon l'indice héliométrique d'Huglin

Classes des climats viticoles	**Indice de Huglin**
Très chaud	3000 < IH
Chaud	2400 < IH ≤ 3000
Tempéré chaud	2100 < IH ≤ 2400
Tempéré	1800 < IH ≤ 2100
Frais	1500 < IH ≤ 1800
Très frais	IH ≤ 1500

Comme expliqué au point précédent, les données climatiques sont importantes pour le choix du cépage, chaque variété exigeant une température minimale pour atteindre la maturité, la meilleure expression du terroir étant obtenue lorsque le cépage atteint la maturité à la fin de l'été (Deloire *et al.*, 2005).

La photopériode a également une grande importance sur le développement phénologique du raisin (Jones et Davis, 2000).

La vigne peut subir les dégâts des gelées à différents moments de l'année. D'abord en automne, avant la chute des feuilles : on parle de gelées précoces, lesquelles sont plus rares. Celles-ci provoquent la mise en dormance de la vigne avant l'heure. En hiver, les ceps peuvent être endommagés lors des fortes gelées hivernales (-15° ou en dessous), celles-ci pouvant provoquer la mort de la souche. Le gel le plus connu et redouté arrive au printemps après le débourrement, quand les bourgeons peuvent être détruits par les gelées de printemps, ce qui compromet la future récolte.

La grêle est aussi un élément climatique à prendre en compte, il s'agit du cauchemar du vigneron. En effet, ce fléau atmosphérique peut ravager un vignoble en quelques minutes.

Enfin, les précipitations ont bien sûr un effet majeur sur la disponibilité de l'eau pour la vigne et sur la composition de la baie. De nombreuses études montrent qu'un déficit modéré en eau a un impact positif sur la qualité du raisin et sur les composés phénoliques (van Leeuwen *et al.*, 2004). Cet aspect sera développé en détail au point 1.2. L'alimentation en eau de la vigne.

1.1.2.2 Le sol

De grands vins sont produits dans des régions du monde très éloignées et sur des sols très différents. Il n'existe pas un seul type de sol idéal pour la production de vin de qualité même si certains sols sont préférables pour produire un certain type de vin. On reconnaît qu'un sol pauvre est préféré à un sol riche et profond. Le sol joue un rôle primordial car il influence l'alimentation hydrique et minérale de la vigne mais également la profondeur d'enracinement, l'aération du sol et la température de la zone racinaire (White, 2003; van Leeuwen, 2009).

Le sol peut tout d'abord être étudié du point de vue géologique, car la roche constitue le matériau parental du sol du vignoble. Une relation peut être mise en évidence entre la qualité d'un vin et la nature géologique du matériau parental du sol. Cependant, ce lien n'est pas aussi évident dans toutes les régions (van Leeuwen et Seguin, 2006).

Ensuite, d'un point de vue pédologique, une classification des sols peut être effectuée. Mais, à nouveau, de grands vins sont produits sur des types de sols très variés. Cependant, certains types de sols sont reconnus pour la production de vin de qualité. On peut citer par exemple les sols calcaires (van Leeuwen et Seguin, 2006).

1.1.2.3 La topographie

La topographie prend en compte l'altitude du terrain, sa pente et son orientation. Ces facteurs, appelés variables topoclimatiques, influencent le climat à l'échelle de la parcelle. Une pente bien exposée, Sud dans notre hémisphère, recevra plus de rayonnement solaire qu'une pente exposée Nord. Un versant bien exposé bénéficiera donc d'une température plus élevée engendrant de meilleures conditions de maturation (van Leeuwen, 2009).

L'inclinaison de la pente influence le drainage et le ruissellement, rendant les terrains pentus mieux drainés que les terrains plats et les fonds de vallée (White, 2003).

Sur les terrains en pente, l'air froid a tendance à s'écouler vers les fonds de vallée tandis que l'air chaud remonte. Ce flux d'air froid peut être dangereux pour la vigne de bas de pente, la rendant plus propice au gel (White, 2003).

La topographie joue aussi sur la profondeur du sol. En effet, sur les pentes concaves, l'érosion sur la partie supérieure de la pente diminue fortement la profondeur du sol tandis que dans la partie inférieure de la pente, la profondeur du sol augmente par l'accumulation des colluvions. En Côte d'Or en Bourgogne par exemple, l'effet de la pente joue sur la profondeur du sol. Sur la partie supérieure, le sol est trop peu profond (moins de 10 cm de profondeur) pour permettre la croissance de la vigne. À l'inverse, en bas de pente, le sol est

profond et riche, augmentant la vigueur et la productivité de la vigne et réduisant la qualité potentielle des baies. Le sol le plus apte à la production de vin de qualité se situe à mi-chemin dans le bas de la pente (van Leeuwen, 2009). Ceci dépend du degré d'érosion et de la profondeur initiale du sol. Sur certains terrains en pente, c'est le sol de la partie supérieure qui produit les meilleurs vins, l'érosion ayant réduit la profondeur du sol jusqu'à une profondeur idéale.

1.1.3 Facteurs humains

Tous les auteurs ne prennent pas en compte le facteur humain dans la définition de terroir. Pour van Leeuwen et Seguin (2006), c'est pourtant essentiel car la viticulture est une activité humaine et aucun vignoble n'existerait sans l'intervention de la main de l'homme. À noter également que les variétés de vigne utilisées aujourd'hui sont le fruit d'une sélection effectuée par l'homme au fil des années voire des siècles sur base de la capacité de ces variétés à produire un vin de grande qualité. Aucune des variétés de *Vitis vinifera* cultivées aujourd'hui n'existaient dans la nature (van Leeuwen, 2009).

Le système de conduction de la vigne, la date de début de la vendange, l'élevage en barrique ou en cuve, la durée de l'élevage, le choix du porte-greffe et du cépage… sont autant de choix que doit effectuer le vigneron et qui influencent la qualité, le goût et les caractéristiques du vin.

De plus, les vignobles naissent là où les conditions socio-économiques sont favorables. C'est pourquoi Paris, centre important de consommation de vin, s'est vu entourer d'un vignoble de 24000 hectares en 1820 alors que les conditions climatiques n'étaient pas des plus optimales pour la production de vin. Et ce n'est pas qu'une affaire du passé, encore aujourd'hui, de nouveaux vignobles se développent là où le contexte socio-économique est favorable. C'est par exemple le cas de l'apparition du vignoble du Pic-Saint-Loup en Languedoc. Cette zone était attractive pour les investisseurs d'une part en raison de sa proximité avec la ville de Montpellier et de la Méditerranée et d'autre part, en raison de la beauté de la campagne dans cette région (van Leeuwen et Seguin, 2006).

1.2 L'alimentation en eau de la vigne

On entend souvent dire que « la vigne doit souffrir pour produire des vins de qualité ». Ce vieil adage signifie que la vigne, contrairement à la majorité des productions végétales, doit être cultivée en dessous de son optimum agronomique afin de produire des raisins de qualité. Cela se réalise en imposant des contraintes environnementales, telles qu'une contrainte hydrique et/ou azotée afin de limiter la vigueur de la vigne et son rendement et favoriser le potentiel œnologique du raisin (van Leeuwen et Vivin, 2008). Dans le cadre de ce mémoire, seule la contrainte hydrique sera étudiée.

Il convient dans un premier temps de bien distinguer les termes « contrainte » et « stress ». Le contrainte hydrique n'est pas forcément néfaste pour la vigne alors que le stress

hydrique, en limitant sévèrement la photosynthèse, engendre des situations où le manque d'eau altère la qualité du raisin et peut mettre en péril la pérennité de la vigne (van Leeuwen et Vivin, 2008).

Contrainte et cycle végétatif

La période pendant laquelle la vigne est limitée en eau a bien sûr une importance sur la qualité des raisins. Cependant, la contrainte en eau augmente généralement au cours de la saison, l'évapotranspiration étant plus importante en été où elle excède souvent les précipitations. Dans un régime hydrique idéal, pour la production de raisin à fort potentiel œnologique, une contrainte hydrique modérée apparaît tôt dans la saison, entre la floraison et la véraison (van Leeuwen et Vivin, 2008).

Les avantages de la contrainte hydrique

Une contrainte hydrique entraine la fermeture de stomates pendant une partie de la journée, ce qui réduit la photosynthèse. Cette régulation stomatique sera d'autant plus importante que le déficit en eau sera sévère. Bien que cette limitation de la photosynthèse puisse sembler négative, en réalité elle ne l'est pas car elle favorise l'arrêt de croissance, limite la taille des baies et stimule la synthèse des composés phénoliques (van Leeuwen et Vivin, 2008). De plus, lorsque les baies sont plus petites, le rapport pulpe/pellicule est plus élevé et comme des nombreux précurseurs d'arômes sont localisés dans la pellicule, leur nombre augmente dans le moût (Ageorges et Terrier, 2014; Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014).

De plus, malgré que l'activité photosynthétique soit réduite, la vitesse de maturation augmente, due à une moindre compétition pour le carbone (arrêt de croissance) et à un volume plus faible de raisin à remplir (diminution de la taille des baies). Par ailleurs, dans un sol en dessiccation, l'extrémité des racines produit de l'acide abscissique, hormone favorable à la maturation du raisin (van Leeuwen et Vivin, 2008).

Les désavantages de la contrainte hydrique

La contrainte hydrique entraîne une diminution du rendement. Or en agriculture, une augmentation du rendement est recherchée pour accroître le bénéfice et les marges économiques. Mais en viticulture, le problème se pose différemment : l'augmentation du rendement en l'absence de contrainte n'augmente pas systématiquement la marge économique en raison de perte de qualité. Un compromis doit être recherché entre un rendement suffisamment élevé et la qualité optimale du raisin (Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014).

Van Leeuwen et Vivin (2008) insiste sur l'importance de savoir là où s'arrête la contrainte hydrique qui est favorable à la qualité du raisin, et là où commence le stress hydrique, défavorable à sa qualité. En cas de stress hydrique, la photosynthèse est très limitée,

causant des blocages dans la maturation. En cas de contrainte hydrique sévère, on observe une diminution de la production de sucres par la photosynthèse et un arrêt de croissance des rameaux. Une chute prématurée des feuilles peut même apparaître dans certains cas (Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014). Cependant, lorsque le déficit hydrique est modéré, les effets positifs l'emportent sur les effets négatifs (van Leeuwen et Vivin, 2008).

Absence de contrainte

Dans le cas où la vigne n'est pas soumise à une contrainte, par exemple en raison d'une pluviosité trop importante ou d'une capacité de rétention en eau élevée du sol, le potentiel œnologique du raisin sera moindre. De plus, l'état sanitaire peut être affecté également par une absence de contrainte. En effet, la disponibilité de l'eau favorisera la croissance des rameaux, des feuilles, des baies, ce qui peut provoquer une situation « d'entassement » et *in fine* le développement de maladies comme le *Botrytis* (Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014). Van Leeuwen et Vivin (2008) avancent même que « *la perte de qualité par un déficit hydrique insuffisant est beaucoup plus fréquente que la perte de qualité par un stress hydrique excessif, même si elle passe généralement inaperçue* ».

Contrainte et typicité des vins

L'intensité de la contrainte dépend grandement du type de vin que le vigneron souhaite produire. Pour la production de vin rouge, une forte contrainte hydrique peut rester favorable alors qu'elle est néfaste pour les vins blancs. La plage de contrainte en eau favorable à la qualité des cépages rouges est plus grande que pour les cépages blancs. Cela peut s'expliquer entre autres par le fait que la qualité d'un vin rouge dépend davantage de sa teneur en composés phénoliques que de sa teneur en sucre (van Leeuwen et Vivin, 2008). Pour les vins blancs, c'est l'inverse, les composés phénoliques ne jouent pas un rôle positif dans les raisins blancs de qualité (Des Gachons *et al.*, 2005).

Parmi les styles de vin, différentes tendances peuvent donc être observées (Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014) :

- Pour les vins rouges, une contrainte hydrique importante est nécessaire pour favoriser la synthèse de polyphénols. C'est d'autant plus vrai pour les vins de garde, riches en composés phénoliques. Cette forte contrainte, même si elle pénalise légèrement la richesse en sucres du moût, favorise le potentiel œnologique.
- Pour les vins blancs de garde, il faut trouver un compromis visant une contrainte hydrique suffisante favorisant la limitation de la croissance et la concentration des baies mais pas trop importante, afin de limiter la production de polyphénols.
- Pour les vins blancs et rosés au profil frais et fruité, une contrainte hydrique faible est conseillée afin de favoriser un rendement qui compense une faible valorisation sur le marché.

Gérer la contrainte

Dans un premier temps, le choix du matériel végétal (cépage et porte-greffe) influence la manière dont la contrainte hydrique touchera les raisins. Certains porte-greffes valorisent peu la réserve en eau du sol comme le Riparia Gloire de Montpellier par exemple (van Leeuwen, 2009). On opte pour ce genre de porte-greffe sur des parcelles où la contrainte risque d'être insuffisante. Et à l'inverse, les porte-greffes résistants à la contrainte hydrique seront choisis sur des parcelles à faible réserve en eau. Au niveau de l'encépagement, beaucoup de cépages blancs, ainsi que le Merlot et le Syrah, sont sensibles à la sécheresse. Le Grenache, le Carignan et le Cabernet Sauvignon sont au contraire connus pour être plus résistants. De plus, le vignoble doit être géré de manière raisonnée, par exemple en affectant les sols à réserve élevée en eau utile aux productions demandant une faible contrainte hydrique (vins blancs et rosés). En revanche, les sols à faible réserve en eau utile, généralement peu profonds, caillouteux… sont susceptibles d'induire une contrainte hydrique importante et sont mieux adaptés à la production de vins rouges de garde (Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014).

Par ailleurs, la contrainte hydrique peut être gérée avec le système de conduite de la parcelle qui influence la surface foliaire. Plus celle-ci est importante, plus les réserves en eau seront épuisées rapidement, ce qui peut être bénéfique sur des sols à contrainte hydrique insuffisante. La surface foliaire peut être augmentée en jouant sur la densité de plantation à l'hectare ou la hauteur de la haie (Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014).

Enfin, l'entretien du sol influence la réserve en eau en favorisant ou non l'infiltration, ce qui est un moyen de créer ou de diminuer la contrainte hydrique (van Leeuwen et Vivin, 2008).

Lorsque la contrainte hydrique est trop sévère, on peut envisager l'irrigation, pour autant que la législation le permette et que les autres méthodes de gestion soient inopérantes. Cependant, sur le long terme (50 à 100 ans), l'irrigation peut provoquer une augmentation des teneurs en sel dans les sols et donc rendre les parcelles impropres à différents types de culture, dont celle de la vigne. De plus, dans un contexte de raréfaction de l'eau, il est utile de se demander s'il est raisonnable d'allouer des quantités d'eau à une culture qui, dans la majorité des cas, est pratiquée sans apport d'eau supplémentaire.

Si elle est mise en place, l'irrigation doit être conduite avec précision afin de minimiser les apports d'eau.

Mesurer la contrainte

Connaître l'état hydrique de la vigne permet une gestion raisonnée de son alimentation en eau dans le but d'atteindre un compromis idéal entre rendement et potentiel qualitatif (Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014).

Estimer cet état hydrique peut s'effectuer de différentes manières. La teneur en eau du sol peut être mesurée directement par la méthode gravimétrique, indirectement par

tensiométrie (tensiomètre, sonde à neutrons…). L'alimentation en eau de la plante peut être évaluée par des mesures directes sur celle-ci, car un déficit hydrique engendrera des modifications dans son fonctionnement physiologique. Ces indicateurs physiologiques sont nombreux tels que le potentiel hydrique foliaire, le potentiel hydrique de la tige, le débit de sève, la variation du diamètre du tronc, la transpiration… (van Leeuwen et Vivin, 2008).
La discrimination isotopique du carbone 13 est une méthode simple qui ne demande pas de mesures répétées. Celle-ci repose sur le fait que le ^{13}C, qui représente environ 1% du carbone dans le CO_2 atmosphérique, est plus lourd que le ^{12}C. La plante incorpore donc préférentiellement le ^{12}C. Lorsque la vigne est soumise à une contrainte hydrique, les stomates peuvent se fermer, ce qui ralentit les échanges de CO_2 entre la feuille et l'atmosphère. La discrimination isotopique n'est donc plus possible. Le rapport $^{13}C/^{12}C$, appelé ΔC13, se rapproche alors de celui du CO_2 atmosphérique. Ce rapport isotopique est mesuré dans les sucres du moût à maturité afin d'obtenir un indicateur global de la contrainte hydrique subie par la vigne pendant la période de maturation (van Leeuwen *et al.*, 2001).

1.3 L'eau dans le sol

La réserve en eau utile du sol, disponible pour les besoins de la vigne, dépend entre autres du climat, de la profondeur du sol, de sa texture et de sa structure (van Leeuwen et Vivin, 2008). Ces deux dernières influencent particulièrement la rétention en eau et en nutriments ainsi que le drainage, l'aération et la température du sol (White, 2003).

1.3.1 Texture du sol

La distribution de la taille des particules du sol détermine la texture de celui-ci. Une division arbitraire sépare ces particules en différentes classes. Tout d'abord, le refus au tamis à 2mm est la charge caillouteuse alors que la fraction (f) tamisée constitue la terre fine (f<2mm). La terre fine est elle-même divisée en trois fractions : les argiles (particules < 2 μm), les limons (particules entre 2 et 50 μm) et les sables (particules entre 50 et 2000 μm). On s'intéresse surtout à la terre fine et peu à la charge caillouteuse, les particules trop grosses ne participant pas à la réactivité du sol (par hypothèse). Cependant, dans certains sols, l'abondance de cailloux et pierres doit être prise en compte dans le fonctionnement du sol car celui-ci retiendra moins d'eau qu'un sol ayant la même texture de terre fine mais avec une charge caillouteuse faible.
La texture du sol est également une caractéristique importante car elle a un effet sur la température du sol. Elle est l'une des propriétés du sol les plus stables, évoluant lentement, ce qui en fait un bon indicateur pour le potentiel agricole d'un sol. On reconnaît que les sols à textures fine et moyenne sont généralement plus souhaitables en agriculture que les sols à texture grossière. Cela est dû à une meilleure capacité de rétention d'eau et d'éléments nutritifs. Cependant, pour la culture du raisin, cette règle fait exception. On recherchera des sols moins fertiles imposant à la vigne une contrainte hydrique et azotée et contenant de

gros cailloux permettant de tamponner les variations de température jour/nuit (White, 2006).

1.3.2 Structure du sol

Les particules de sol s'assemblent en unités plus grandes de tailles variées appelées agrégats. Cette agrégation est la base de la structure du sol qui définit la taille, la forme et la disposition des agrégats et des espaces séparant ceux-ci (White, 2006). La porosité, qui désigne les vides occupés par de l'eau et/ou par l'air, est séparée en trois classes selon la taille des pores. La macroporosité désigne les pores les plus grands assurant la fonction de drainage de l'eau, de circulation de l'air et l'espace de croissance pour les racines. La mésoporosité retient l'eau utilisable pour les plantes (eau utile). Enfin, la microporosité assure la rétention de l'eau hygroscopique. La mésoporosité dépend essentiellement de la texture du sol alors que la macroporosité dépend plutôt de la structure (Gobat *et al.*, 2010).

1.3.3 Caractérisation de l'eau du sol

Le teneur en eau volumique θ, définie comme le volume d'eau par unité de volume de sol, est une variable qui permet de quantifier l'eau dans le sol. Cependant, toute l'eau du sol n'est pas disponible pour la vigne. En effet, certaines forces agissent sur l'eau, affectant son énergie potentielle et sa disponibilité pour les plantes. Ces différents états énergétiques sont liés à des processus d'adsorption hygroscopique, de forces capillaires, osmotiques (négligeable sauf dans les sols salés), de pressions hydrostatiques et gravitaires (drainage) (White, 2003). Le potentiel total de l'eau est donc égal à la somme de ces différentes composantes. Généralement, le potentiel s'écrit avec la lettre ψ, on parle en réalité d'énergie potentielle massique et l'unité est le J/kg, mais cela dépend des auteurs. De plus, comme la masse volumique de l'eau est constante, le potentiel peut aussi être exprimé comme une énergie par unité de volume et non de masse, ce qui donne des joules par m^3, ou des newtons par m^2, appelés pascal. Enfin, l'accélération de la gravité étant une constante, l'énergie potentielle peut être exprimée par unité de poids, des joules par newton, ce qui donne des mètres. En résumé, le potentiel de l'eau dans le sol peut s'exprimer de trois manières suivantes (Bielders et Javaux, 2016).

- ψ : potentiel total → énergie potentielle par unité de masse [J/kg]
- P : pression totale → énergie potentielle par unité de volume [J/m^3]
- H : charge totale → énergie potentielle par unité de poids [J/N] = [J/kg]

Le potentiel matriciel ψ_m correspond aux effets combinés des forces de capillarité et d'adsorption, directement liées au rayon des pores, on parle également de charge matricielle h, appelée aussi tension ou succion matricielle. Il représente donc l'énergie qui résulte de la pression de l'eau due d'une part aux effets de liaison autour des particules solides et d'autre part aux effets de capillarité dans les pores. En physique du sol, le pF est

utilisé pour désigner le potentiel matriciel. Il s'agit du logarithme en base 10 de la valeur absolue du potentiel matriciel, exprimé en hauteur d'eau en cm.

$$pF = log_{10}|h(cm)|$$

Il est appelé pF par analogie au pH utilisé en chimie pour mesurer le degré d'acidité (Bielders et Javaux, 2016).

La relation entre la teneur en eau volumique θ et la charge matricielle h est appelée courbe de rétention ou courbe de succion. La teneur en eau est généralement placée en ordonnée alors que la charge matricielle est placée en abscisse sur une échelle logarithmique (Figure 1.1). Sur cette courbe, plusieurs valeurs de teneur en eau sont caractéristiques (Bielders et Javaux, 2016) :

- θ_{sat} : La teneur en eau à l'ordonnée à l'origine, lorsque la succion est nulle, est la teneur en eau à saturation, qui représente la porosité totale.
- θ_{CC} : La teneur en eau à la capacité au champ, c'est-à-dire après ressuyage d'un sol saturé pendant 48 heures. Elle apparaît à un pF entre 2 et 2,5, c'est-à-dire à une succion entre 100 et 300 cm (sur la Figure 1.1, elle est marquée à une succion de 200 cm).
- θ_{PF} : La teneur en eau au point de flétrissement permanent, c'est-à-dire le seuil au-delà duquel la plante subit un flétrissement irréversible. Elle apparaît à un pF de 4,2, c'est-à-dire à une succion d'environ 10 000 cm.

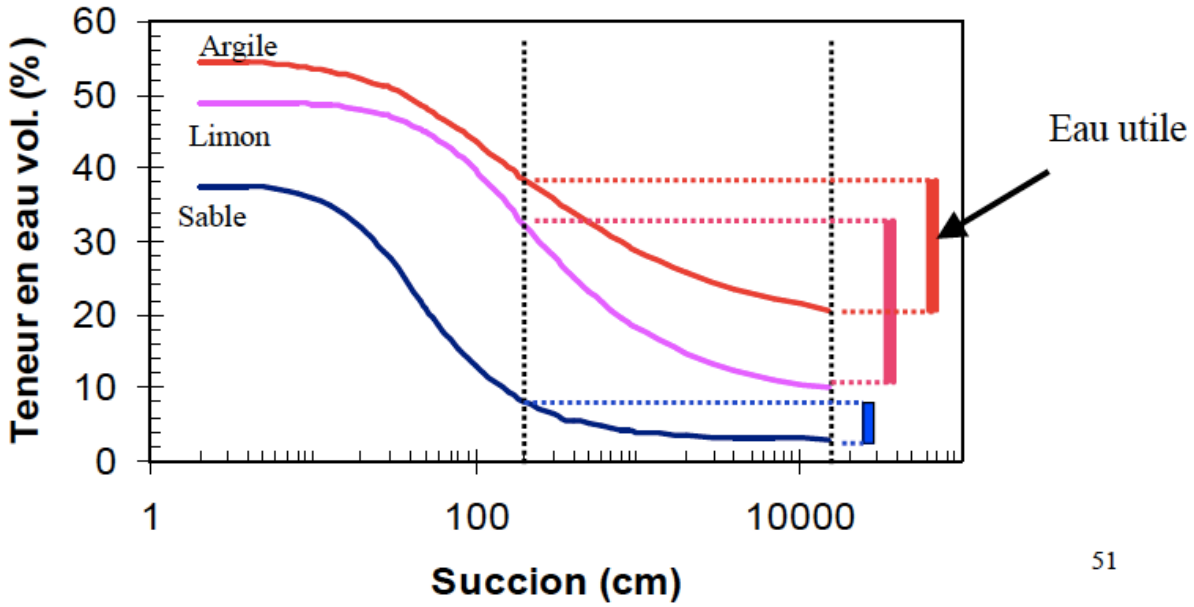


Figure 1.1 - Courbe de rétention pour un sol argileux, limoneux et sableux (Bielders et Javaux, 2016)

La quantité d'eau maximale disponible pour la plante est appelée la réserve en eau utile (REU). Elle correspond à la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et celle mesurée au point de flétrissement permanent : REU = $\theta_{CC} - \theta_{PF}$. Comme illustré sur la Figure 1.1, l'eau utile dépend principalement de la texture et donc de la taille des pores. Dans un sol sableux contenant une majorité de macropores, ceux-ci seront drainés aux

teneurs en eau excédant θ_{CC}. En revanche, un sol argileux retiendra une quantité d'eau hygroscopique élevée au sein de la microporosité : θ_{PF} est donc élevée, ce qui conduit à une REU assez faible. Les sols limoneux, à mésoporosité importante, présentent la plus grande réserve en eau utile. La REU dépend également de la structure, de la profondeur du sol…

Pour calculer ces valeurs caractéristiques et/ou établir la courbe de rétention, il existe diverses méthodes. Celles utilisées dans le cadre de ce mémoire seront expliquées au Chapitre 4 - Matériel et méthodes.

1.4 L'enherbement du vignoble

L'enherbement du vignoble consiste à maintenir un couvert herbacé intercalaire dans l'inter-rang et/ou sous le rang de la vigne. Ce couvert végétal peut être spontané, dit enherbement « naturel », ou semé par le viticulteur. On distingue également les enherbements par leur durée : les couverts permanents se maintiennent toute l'année alors que les couverts temporaires sont détruits au cours de l'année. Cette association est un peu particulière dans le sens où seule la production d'une des deux cultures est valorisée. Le couvert végétal a donc comme objectif d'optimiser la concurrence entre les espèces ainsi que la qualité du vin (Celette, 2007).

Cette pratique n'est pas nouvelle et possède de nombreux avantages.
Tout d'abord, l'enherbement dans l'inter-rang permet une meilleure portance du sol et donc facilite le passage des engins agricoles. De plus, grâce à la présence d'un système racinaire dans les premiers centimètres du sol et donc à une amélioration de la structure du sol, le couvert végétal contribue à réduire l'érosion et le ruissellement. Cela permet de diminuer l'impact environnemental grâce à la limitation de la pollution des cours d'eau par les pesticides et matières en suspension qui sont entrainés par le ruissellement (Celette, 2007). Par ailleurs, enherber un vignoble induit une diminution de la vigueur de la vigne et souvent du rendement. De ce fait, l'aération des grappes est favorisée, améliorant l'état sanitaire de la vendange, en particulier le développement de la pourriture grise (ITV-France, 2002). Enfin, un dernier avantage et non des moindres, est la limitation de la flore spontanée, indésirable ce qui induit une réduction de l'utilisation d'herbicide (Delabays *et al.*, 2006).
Une caractéristique importante d'une vigne enherbée est qu'elle génère une contrainte hydrique plus importante qu'une vigne désherbée. Dans un premier temps, l'enherbement, s'il est permanent, compense la concurrence pour l'eau grâce à une meilleure infiltration et donc à une meilleure recharge hivernale du profil hydrique. Mais à partir de la floraison, il y a moins d'eau disponible pour la vigne à cause de la transpiration du couvert végétal (Gary et Celette, 2009). C'est cette caractéristique qui freine de nombreux viticulteurs à installer un enherbement, craignant une contrainte hydrique encore plus forte, surtout sous les climats connaissant une raréfaction de l'eau. D'ailleurs, des études ont été menées (ITV-

France, 2002; Spring et Delabays, 2006) afin de déterminer quelles sont les espèces à semer qui sont le moins concurrentielles pour la vigne, telles que les fétuques élevées.

Par ailleurs, l'enherbement joue également un rôle dépressif sur l'enracinement de la vigne. Cela est surtout marqué dans les horizons de surface où les racines du couvert végétal se développent. Une réduction du système racinaire de la vigne est observée dans ces premiers horizons, principalement des racines de faible diamètre dans l'inter-rang. Dans les climats chauds, un enherbement est plus adapté sur les sols profonds où la vigne peut développer des racines en profondeur pour compenser la concurrence dans les horizons de surface (Morlat *et al.*, 1987). Le niveau de concurrence pour l'eau induite par l'enherbement sur la vigne est corrélée à la possibilité de la vigne à coloniser les horizons plus profonds et donc directement à la profondeur du sol (ITV-France, 2002).

2. La viticulture en Wallonie

2.1 Histoire de la viticulture en Wallonie

A l'heure où la viticulture wallonne fait parler d'elle, peu nombreux sont ceux qui savent que les vignes occupaient déjà le paysage belge il y a plusieurs siècles.

L'historien Joseph Halkin est le premier, et pour l'instant le seul, à avoir recensé la présence de vigne en Belgique[1] dans son *Étude historique de la culture de la vigne en Belgique* en 1895. Selon lui, les premières mentions de vigne en Belgique dans les textes officiels indiqueraient que la viticulture belge date du IXe siècle, plus précisément en 815.

Toujours selon Halkin, tout porte à croire que les premiers cultivateurs de vignes belges étaient les moines qui avaient besoin de vin pour le Saint-Sacrifice de la Messe. La manière la plus simple de s'en procurer et d'être assuré de sa pureté était de le produire soi-même. Les premiers vignobles sont donc propriété des abbayes.

La viticulture ne resta pas seulement l'affaire des ecclésiastiques, les particuliers commencèrent également à cultiver le raisin et à en vendre le produit, source de revenu de grande valeur.

Le vignoble belge se développe sur les bords de la Meuse et affluents, surtout sur les coteaux bien exposés entre Huy et Liège. La culture du raisin s'étend en occupant de plus en plus d'espace jusqu'au XVIe siècle avec des vignes à Tournai, Mons, Bruxelles, dans la vallée de la Sambre, de la Senne, de la Dyle… En Flandre, c'est à Louvain que se concentrent les vignobles. Du côté wallon, trois pôles se dégagent : Huy, Liège et Namur (Boschman et Vanel, 2015).

Le déclin du vignoble belge s'explique par différents facteurs.

Tout d'abord, le vin belge subit à partir du XVIIe siècle la rude concurrence de la bière, aussi appelée le « vin d'orge » à l'époque, moins coûteuse et se conservant mieux (Vin de Liège, sans date). Ensuite, l'amélioration des moyens de communication avec notamment le développement des chemins de fer et des routes rend l'accès aux vins français, allemand et espagnol beaucoup plus aisé « *contre lesquels nos vins de pays ne pouvaient guère lutter en valeur, en qualité et en bouquet* » (Halkin, 1895). De plus, l'augmentation démographique diminue la superficie des vignobles d'une part, par la construction de nouvelles habitations et d'autre part, par l'extension des cultures maraîchères, nécessaires pour nourrir la population urbaine croissante, qui supplantent les zones viticoles. Par ailleurs, le climat n'a pas été très clément pour la culture de la vigne en Europe avec le Petit âge glaciaire entre le XIVe et le XIXe siècle, causant des récoltes désastreuses, surtout au XVIe siècle. Enfin, les

[1] Les termes "Belgique", "Wallonie" et "Flandre" désignent l'espace géographique connu aujourd'hui même s'il portait un autre nom à l'époque.

différentes guerres ayant touché l'Europe entre le XIIe et le XVIIIe siècle ont mis à mal le vignoble belge et causé partiellement sa destruction.

Au début du XXe siècle, les dernières vignes sont anecdotiques sur notre territoire et ne résistent pas à la Seconde Guerre Mondiale. Il faut attendre 1965 pour le relancement de la viticulture wallonne. Depuis les années 2000, la superficie du vignoble wallon a considérablement augmenté (Boschman et Vanel, 2015).

2.2 La viticulture wallonne aujourd'hui

La viticulture belge et wallonne commence à faire parler d'elle en Belgique et même parfois au-delà de nos frontières. Le secteur viticole est en pleine expansion depuis le début des années 2000. Le nombre de producteurs en Belgique était de 129 en 2017 et de 117 en 2016, soit une augmentation d'environ 10%. En terme de production (en litres), toujours entre 2016 et 2017, le secteur a connu une hausse de 12% (L'Echo, 2018). La Figure 2.1 ci-dessous montre l'évolution de la superficie et de la production du vignoble belge entre 2006 et 2017 (Service public fédéral Economie, 2018).

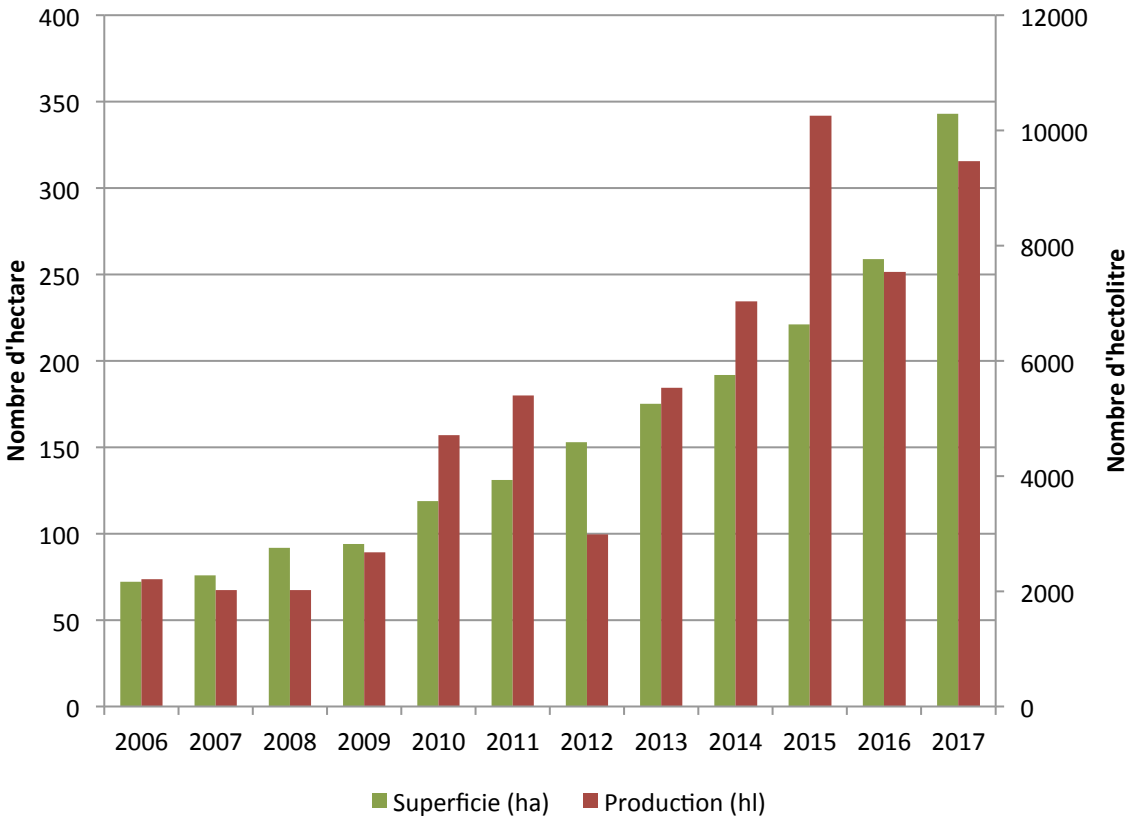


Figure 2.1 - Superficie et production viticoles en Belgique de 2006 à 2017

La surface occupée par des vignobles en Belgique est passée du simple au quintuple en un peu plus de 10 ans. La Wallonie compte aujourd'hui presque 200 hectares de vigne et les professionnels du secteur pensent que cette superficie pourrait doubler d'ici 3 ans (RTBF, 2018). Cependant, malgré cette nette croissance, le vignoble wallon reste six fois plus petit

que le luxembourgeois, 175 fois plus petit que le champenois et 600 fois plus petit que le bordelais (Questions à la Une, 2018)!

En terme de production, la croissance est moins linéaire, fortement dépendante des conditions climatiques. En 2016 et 2017, les conditions météorologiques assez défavorables, avec notamment des gelées d'avril en 2017, causent une diminution de la production par rapport à 2015. Le climat exceptionnel de 2018 a fait exploser le compteur avec plus d'un million de litres rien que pour le vin wallon, soit 1.32 million de bouteilles, une augmentation de 40% par rapport à 2015 (Le Soir, 2018). Un chiffre à mettre en relation avec la consommation de vin en Belgique : 300 millions de bouteille par an. La production est encore très faible par rapport à la consommation, ce qui permet au secteur d'être peu compétitif et de laisser de la place pour de nouveaux producteurs dans les années à venir.

Au niveau de la couleur (rouge, blanc, rosé) et du type (mousseux ou non) de vin produit en Belgique, la situation diffère entre la Flandre et la Wallonie comme le montre la Figure 2.2 ci-dessous. En Flandre, la production de vin blanc domine largement, suivi par le mousseux alors qu'en Wallonie c'est l'inverse, la production de mousseux représente près de 60%. Quant à la production de rouge et de rosé, elle est semblable dans les deux régions, avoisinant les 15% pour le rouge et 4% pour le rosé (Service public fédéral Economie, 2018).

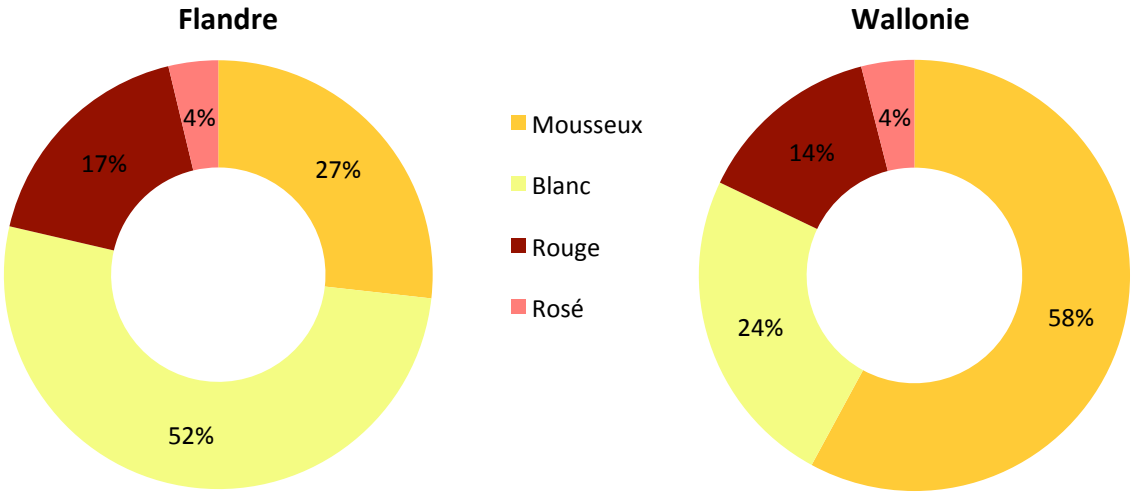


Figure 2.2 - Proportions des quatre grands types de vins par rapport à la production totale de vin en 2017 en Flandre (à gauche) et en Wallonie (à droite)

Avec une production faible, les vins belges misent pour l'instant sur la qualité du vin proposé. Pour le consommateur, la qualité d'un vin est souvent associée à l'appellation qu'il porte. Ces appellations sont gérées par les pouvoirs régionaux en Belgique et demandent de respecter un cahier des charges dictant des règles concernant la délimitation de la zone de production, les cépages utilisés, le rendement moyen maximal à l'hectare… En 1997 apparaît la première appellation d'origine protégée en Flandre : AOP Hagelandse Wijn (La Revue du vin de France, sans date). Quatre autres AOP suivront en Flandre ainsi qu'une IGP (indication

géographique protégée). En Wallonie, il faut attendre 2004 pour voir apparaître la première AOP « Côtes de Sambre et Meuse » ainsi que la première IGP « Vin de pays des jardins de Wallonie ». Il existe deux autres AOP aujourd'hui : Vins mousseux de qualité de Wallonie ainsi que Crémants de Wallonie (Apaq-W, sans date).

La viticulture belge et plus précisément wallonne est une discipline récente encore à son commencement. La création d'appellations démontre l'existence d'un véritable vignoble, avec ses atouts commerciaux modernes, à qui le futur réserve certainement un bel avenir.

3. Le contexte

Dans le cadre de ce mémoire, deux parcelles de deux vignobles seront étudiées. Il s'agit de deux parcelles plantées récemment (après 2014) dans le Brabant wallon. Le premier vignoble, « Vignoble du Château de Bousval », se situe à Genappe et le second, « Domaine W », à Tubize.

3.1 Description

Vignoble du Château de Bousval

Situé à Bousval, entité de la ville de Genappe, il s'agit d'un des plus grands vignobles du Brabant wallon avec presque six hectares de vigne pour 37 500 pieds. Le vignoble se compose de trois parcelles et on y retrouve principalement du Chardonnay, puis du Pinot noir et un peu de Pinot gris. Les pieds ont été plantés en 2014.

La parcelle étudiée, entourée en rouge sur la Figure 3.1, grande de près de 3 ha, est plantée uniquement de Chardonnay. Avant de devenir un vignoble, cette terre était occupée par une culture de maïs, puis a été laissée au repos pendant deux ans avant que la vigne y soit installée.



Figure 3.1 - Localisation de la parcelle étudiée au Château de Bousval

Domaine W

Ce vignoble est situé à Saintes, sur la commune de Tubize, à l'extrémité ouest du Brabant wallon. Les premiers pieds de vignes ont été plantés en 2016 et sont au nombre de 12 000 aujourd'hui. On y retrouve les cépages traditionnels champenois : Chardonnay, Pinot noir et Pinot meunier. Le vignoble de 4 ha, est certifié en bio et biodynamie. Plus de 600 arbres et arbustes ont été plantés à proximité avec également des prés fleuris, ruches, piquets à rapaces… Ce vignoble s'inscrit dans le programme de Natagriwal qui met en place des mesures agro-environnementales. La première vendange a eu lieu en septembre 2018 pour des premières bouteilles de mousseux en 2020. Avant d'être un vignoble, ces parcelles étaient des champs cultivés en rotation avec les cultures typiques de la région (blé, maïs, betterave, pomme de terre...). Les terres ont été laissées au repos pendant au minimum un an avant la plantation de la vigne.

La parcelle étudiée, en rouge sur la Figure 3.2, s'étend sur 0,5 ha et est composée uniquement de Pinot meunier, planté mi-2016.

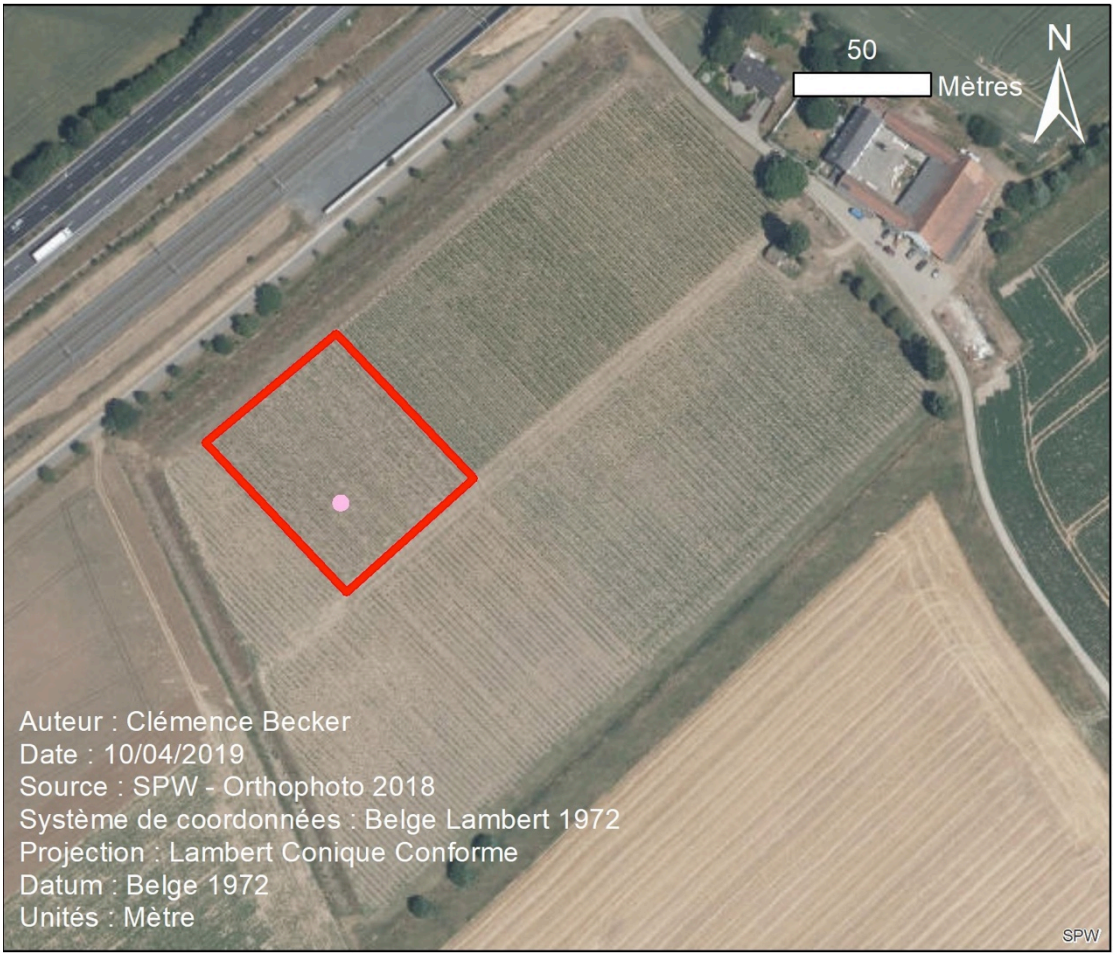


Figure 3.2 - Localisation de la parcelle étudiée au Domaine W + localisation du site de mesure

Dans le Tableau 3.1 sont présentées quelques caractéristiques des deux parcelles étudiées.

Tableau 3.1 - Caractéristiques des deux parcelles étudiées

	Château de Bousval	**Domaine W**
Caractéristiques physiques		
Surface	3 ha	0,5 ha
Topographie	Pente de 8%	Plane
Orientation	Est	Sud-Est
Altitude (m)	115	55
Écartement rangs (m)	1,60	2,25
Écartement pieds (m)	0,75	1
Caractéristiques de la vigne		
Âge	5 ans	3 ans
Cépage	Chardonnay	Pinot meunier
Porte-greffe	3309C	114
Caractéristiques du vin		
Type de vin	Vin blanc tranquille	Vin effervescent
Vin biologique	Oui	Oui
Première récolte	2017	2018
Entretien de la vigne		
Occupation passée	Maïs	Maïs, pomme de terre, betterave, blé
Enherbement	Semé	Naturel
Taille	Guyot simple	Guyot simple

3.2 Climat

Les deux vignobles étant distants à vol d'oiseau de 26,72 km et n'étant pas à la même altitude, les climats diffèrent légèrement. Les précipitations moyennes mensuelles de la période 2014 – 2018 pour les deux régions sont données à la Figure 3.3. Les données pluviométriques viennent du site des Voies hydrauliques de Wallonie de la SPW. La station de Tubize se trouve à 3,45 km du Domaine W et celle de Bousval à 1,2 km du Château de Bousval.

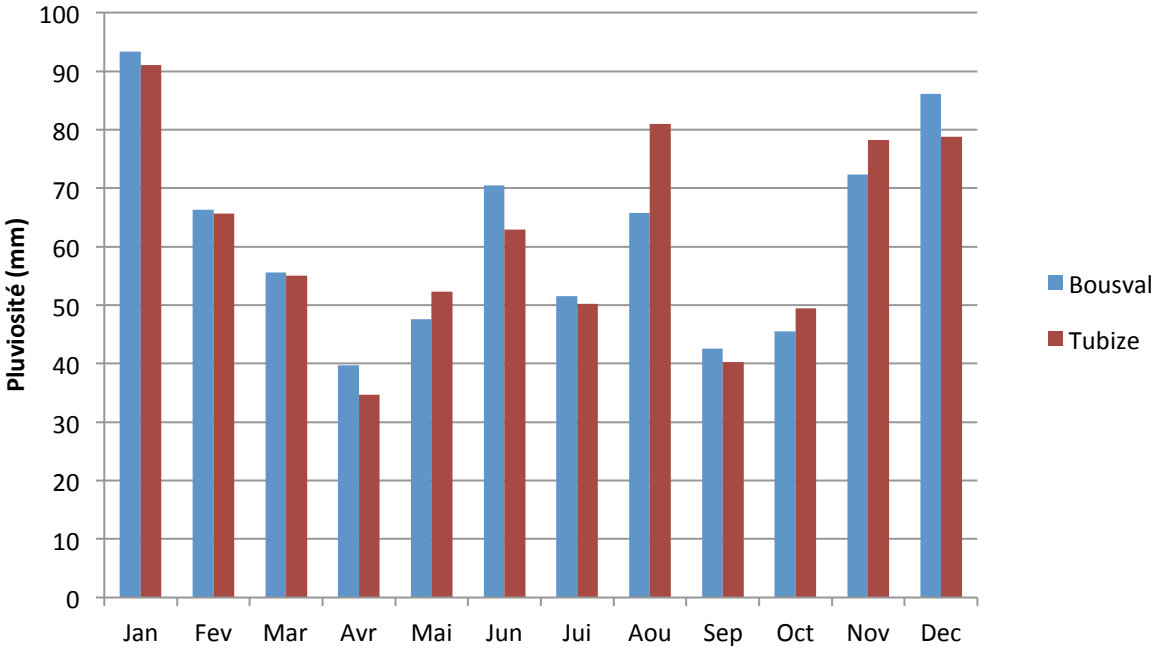


Figure 3.3 - Précipitations moyennes mensuelles entre 2014 et 2018 à Bousval et Tubize

La pluviosité mensuelle moyenne entre 2014 et 2018 à Tubize est légèrement inférieure à celle de Bousval pour les premiers mois de l'année. Cependant, la différence est minime, globalement il n'y a pas de fortes différences. Sur cette même période, on recense en moyenne 740 mm/an à Tubize et 737 mm/an à Bousval. A noter qu'il y a une grande variabilité interannuelle et intermensuelle comme en témoigne le Tableau 3.2. L'année 2018 a été particulièrement sèche avec des mois de juin et juillet considérablement en dessous de la moyenne par rapport aux cinq dernières années alors que l'année 2016 était plutôt pluvieuse.

Tableau 3.2 - Moyenne annuelle et mensuelle de pluviométrie à Bousval et Tubize

	Bousval	**Tubize**
Moyenne annuelle (2014 – 2018)	737	740
Moyenne annuelle 2018	626	568
Moyenne annuelle 2016	897	859
Moyenne mensuelle (juin/juillet 2014 – 2018)	61	57
Moyenne mensuelle (juin/juillet 2018)	27	13
Moyenne mensuelle (juin/juillet 2016)	97	87

Pour comparer les climats viticoles, l'indice Huglin (IH) s'avère utile. Cependant, cet indice demande des données de température qui doivent refléter au mieux la zone et qui ne sont pas faciles à obtenir. Pour cette étude, les résultats publiés dans le mémoire de Vincent Dienst en 2015 seront utilisés. Celui-ci a fait une cartographie de l'IH en Belgique sur base d'un jeu de données de température pour les années 2010 à 2015 fournies par l'Institut Royal Météorologique. Ces données ont ensuite été réparties sur une grille d'une résolution

de 5x5km, obtenues par interpolation des températures des 140 stations météorologiques. La méthode du krigeage a ensuite été adoptée pour interpoler les résultats et établir la carte pour la Belgique (Dienst, 2015).

Tableau 3.3 - Indice héliométrique d'Huglin de 2010 à 2014 dans les deux vignobles

	Château de Bousval	**Domaine W**
2010	1300 - 1400	1400 - 1500
2011	1500 - 1600	1500 - 1600
2012	1300 - 1400	1400 - 1500
2013	1300 - 1400	1400 - 1500
2014	1500 - 1600	1500 - 1600

Selon cet indice, le climat dans les deux domaines est qualifié de frais en 2011 et 2014 (deux années particulièrement chaudes) et de très fais en 2010, 2012 et 2013. Cependant, comme l'indique l'auteur, de par la méthodologie utilisée pour faire les cartes, les valeurs sont à prendre avec précaution. En effet, celles-ci ne tiennent pas compte des variations à l'échelle de la parcelle liées à la topographie, l'exposition, l'altitude…

3.3 Sol

Selon la carte des sols de Wallonie, le sol de la parcelle étudiée au Château de Bousval est principalement de type sLba2_3 (sol à substrat sableux débutant entre 20 et 80 cm, texture limon sableux, drainage naturel favorable, horizon B textural).

Le vignoble repose sur le Massif du Brabant, datant du Primaire et diverses couches se sont ensuite succédées afin de former le sol que l'on retrouve aujourd'hui. Il y a eu notamment des dépôts marins, datant de l'Eocène au début de l'âge Tertiaire, appelés « sables bruxelliens », et puis plus tard, lors du Quaternaire, des dépôts éoliens de texture limon.

Au Domaine W, le sol de la parcelle étudiée est de type Aba1 (sol limoneux, drainage naturel favorable, horizon B textural et horizon A mince). Ce vignoble repose également sur le Massif du Brabant.

3.4 Topographie

Au Château de Bousval, la topographie est complexe. Il y a d'abord une pente d'environ 8% dans le sens des rangs et une pente d'environ 5% dans le sens perpendiculaire aux rangs. L'altitude maximale sur la parcelle est de 123 m pour un minimum à 102 m (Figure 3.4). Cette topographie particulière joue un rôle important sur la profondeur d'apparition du sable bruxellien. En effet, sur le plateau, le sable apparaît souvent entre 40 et 50 cm alors qu'en milieu de pente et dans la vallée, on ne le retrouve pas à la tarière (110 cm). Sur cette toposéquence, l'érosion de la couverture limoneuse en haut de versant va de pair avec

l'accumulation de colluvions en bas de pente. L'épaisseur de la couche de limon qui recouvre le sable est discutée au point 5.1.1 Variation de la profondeur de la couche de limon.

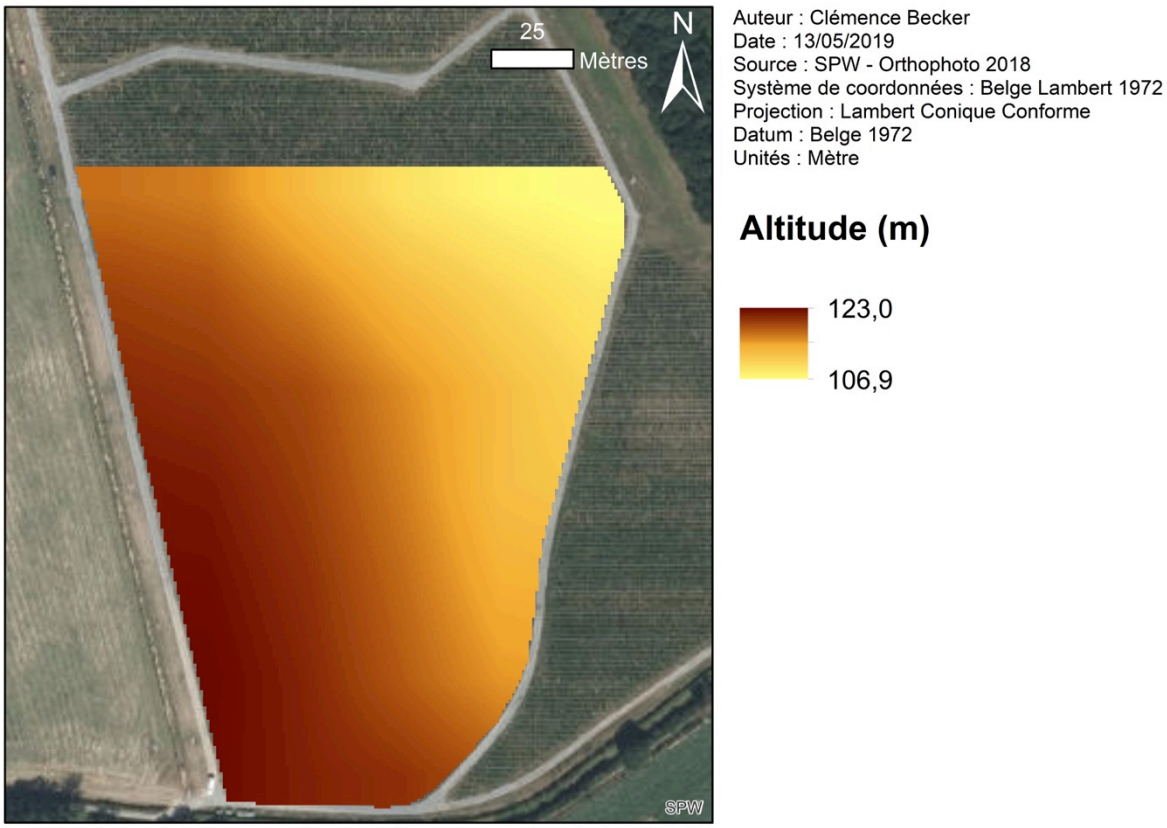


Figure 3.4 - Altitude sur la parcelle au Château de Bousval

Cette différence de profondeur de limon a une importance sur la contrainte hydrique imposée à la vigne. En effet, sur le plateau où la couche de limon est moins épaisse qu'en bas de pente, la quantité d'eau stockée dans le sol est nettement inférieure, le sable ayant une REU plus faible que le limon. En 2018, le viticulteur a d'ailleurs vendangé et vinifié séparément les raisins venant de la partie supérieure de la parcelle et ceux venant de la partie inférieure.

Au Domaine W, la topographie est relativement plane avec une altitude allant de 58 à 54 m.

3.5 Matériel végétal

3.5.1 Cépages

En viticulture, lorsqu'on parle de vigne, on parle de *Vitis vinifera*, l'espèce cultivée, de la famille des *Vitaceae*. Les différentes variétés de vigne sont les cépages et seront présentés ici seulement ceux plantés sur les parcelles étudiées : le Chardonnay du Château de Bousval et le Pinot meunier du Domaine W.

Le Chardonnay, d'origine bourguignonne, est cultivé dans de nombreux pays. En France, on le trouve surtout en Bourgogne et en Champagne. Ce cépage est caractérisé par un cycle court et une précocité de maturation. Ses baies sont petites. On le retrouve aussi bien dans des vins monocépages ou d'assemblages, secs, effervescents ou même liquoreux. Il possède un potentiel qualitatif élevé avec des arômes de fruits secs, noisette, beurre, fruits exotiques,... (IFV *et al.*, 2008). Il se développe sur des sols moyennement fertiles à dominance calcaire ou marneuse. En Belgique, la véraison n'a lieu que vers le 10 septembre pour les années avec un climat normal à froid (Vander Linden, 2015). C'est le cépage le plus populaire en Belgique, il est planté sur 121,36 ha, ce qui représente 35% de la superficie du vignoble belge (Service public fédéral Economie, 2018).

Le Pinot meunier est un cépage noir, issu d'une mutation du Pinot noir. Il est intéressant pour son cycle court également et son débourrement tardif, le rendant moins sensible au gel printanier. Ses grappes sont petites et les baies souvent très petites (IFV *et al.*, 2008). Moins populaire que le Chardonnay, on le retrouve néanmoins en Champagne où il partage, environ à part égale, l'encépagement avec le Pinot noir et le Chardonnay. En Belgique, il figure à la douzième place des cépages les plus courants en terme de superficie mais avec seulement 5,52 ha donc moins de 2% du vignoble belge (Service public fédéral Economie, 2018). Le clone 817 est utilisé au domaine W, à maturité précoce qui convient donc bien au climat belge.

3.5.2 Porte-greffes

Le porte-greffe est la partie enterrée du pied de vigne qui porte le greffon. Les porte-greffes sont résistants au phylloxera mais diffèrent selon de nombreuses caractéristiques afin de s'adapter au mieux au sol, aux conditions climatiques et au type de vin désiré.

Le porte-greffe du Château de Bousval est le 3309 Couderc (3309 C). Très populaire en France, il est planté sur 105 000 hectares. C'est un porte-greffe sensible au stress hydrique et aux chlorures, à éviter lorsqu'il y a des risques de salinité. Il convient bien aux sols profonds, sablo-argileux, limono-argileux, pas ou peu calcaires (Pl@ntGrape, sans date).

Au Domaine W, c'est le clone 114 du porte-greffe Kober 5 BB qui est planté. C'est un porte-greffe nettement moins répandu que le précédent, qu'on retrouve sur 9000 ha de vigne en France. Il confère aux greffons une vigueur importante et une tendance à retarder la maturité (Pl@ntGrape, sans date).

3.6 Enherbement

Un relevé phytosociologique a été effectué fin juin 2019 dans les deux vignobles en vue de déterminer les espèces qui composent majoritairement l'enherbement.

Un mélange d'avoine, de trèfle incarnat et de moutarde ont été semés à Bousval en novembre 2018 dans l'inter-rang. Depuis lors, d'autres espèces se sont également installées.
On retrouve à environ 40% du ray-grass anglais (*Lolium perenne*), 25% du trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*) et 20% d'avoine (*Avena fatua*). Des différences s'observent selon la topographie avec plus de trèfle blanc (*Trifolium repens*), de pissenlit (*Taraxacum agg*), de pâturin annuel (*Poa annua*) vers le bas de pente.

Au Domaine W, l'enherbement est « naturel », on y laisse ce qui se développe naturellement. La flore dans l'inter-rang est composée en majorité de pâturin annuel (*Poa annua*). Cette graminée domine à environ 50% la strate herbacée. La petite oseille (*Rumex acetosella*), le chardon commun (*Cirsium vulgare*) et le ray-grass italien (*Lolium multifolium*) constituent ensemble environ 30% de la strate herbacée. Les 20% restants de la strate sont composés de diverses espèces dicotylées, telles que le pissenlit (*Taraxacum agg*.), la camomille matricaire (*Matricana recutita*), la pâquerette (*Bellis perennis*), le mouron des oiseaux (*Stellana media*) et la capselle bourse-à-pasteur (*Capsella bursa-pastoris*).
La strate herbacée est tondue régulièrement.

4. Matériel et méthodes

4.1 Sélection des parcelles et des sites d'échantillonnage

Les deux vignobles ont été sélectionnés selon le critère de l'enherbement : un enherbement semé à Bousval et « naturel » au Domaine W. De plus, les deux parcelles présentent des caractéristiques différentes, du point de vue du sol et de la topographie ce qui impactera différemment la contrainte hydrique subie par la vigne et permettra d'induire aussi des comparaisons.

Le Château de Bousval présentant une topographie complexe, l'échantillonnage a été effectué selon une toposéquence : un site d'échantillonnage sur le haut de pente HP, un site dans le milieu de pente MP et un site en bas de pente BP (Figure 4.1 et Figure 4.2).



Figure 4.1 - Sites d'échantillonnage au Château de Bousval

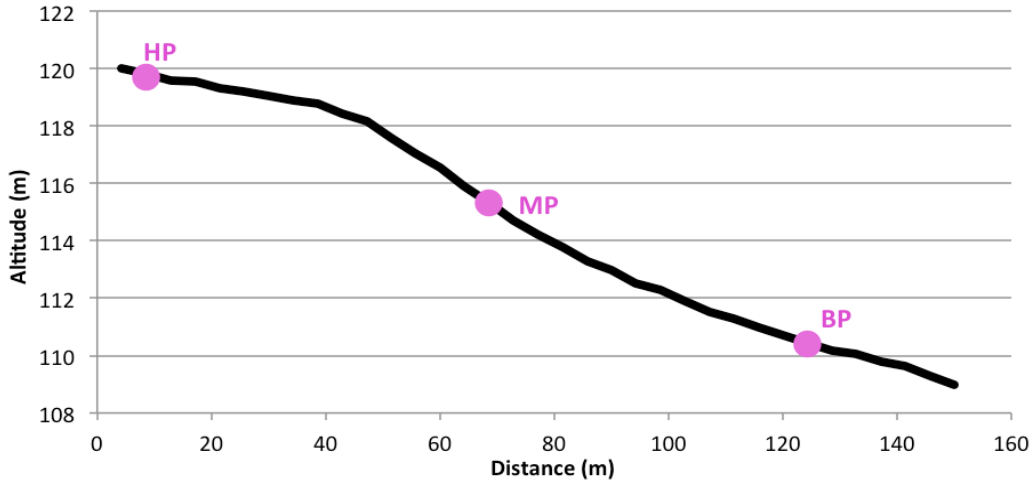


Figure 4.2 - Position des sites d'échantillonnage dans la pente au Château de Bousval

La parcelle du Domaine W présente une topographie plane et un profil assez homogène. C'est pourquoi un seul site d'échantillonnage a été défini sur cette parcelle. Il est observable sur la Figure 3.2, le point rose.

4.2 Échantillons de sol

Pour chaque site d'échantillonnage, deux types d'échantillons ont été prélevés : des échantillons déstructurés et des cylindres kopecki de 100 cm^3. Sur chacun de ces sites, deux profondeurs ont été échantillonnées : entre 5 et 10 cm (s pour surface) et entre 40 et 45 cm (p pour profondeur), à partir de la surface (Figure 4.3 et Figure 4.4).



Figure 4.3 - Prise d'un cylindre kopecki à s



Figure 4.4 - Prise de cylindres kopecki à p

Trois à cinq répétitions pour les cylindres kopecki ont été prélevées par profondeur. Les échantillons en vrac prélevés à la tarière ont été pris en quantité suffisante pour les différentes analyses. De plus, à Bousval, trois répétitions de cylindres kopecki de sable bruxellien ont été pris.

Un code a été donné aux différents échantillons.
Pour le Château de Bousval :
Première lettre : B
Deuxième et troisième lettre : site d'échantillonnage (HP, MP ou BP)
Quatrième lettre : profondeur (s ou p)
Pour les échantillons de sable : SAB
Pour le Domaine W :
Première lettre : W
Deuxième lettre : profondeur (s ou p)

4.3 Variation de la profondeur de la couche de limon

4.3.1 Par sondage

Afin d'appréhender la variation de la profondeur de la couche du limon qui recouvre le sable bruxellien au Château de Bousval, des sondages ont été réalisés à la tarière selon une maille régulière (Figure 4.5). La profondeur d'apparition du sable a été notée pour chacun de ces points. La tarière ne permettant que de creuser jusqu'à 110 cm, si le sable n'apparaissait pas à cette profondeur, la profondeur « > 110 cm » était indiquée. Lorsque pour deux points d'un même rang, une profondeur supérieure à 110 cm était déterminée, la profondeur d'apparition du sable pour les points restant du rang était supposée également supérieure à 110 cm (les sondages étaient réalisés du haut vers le bas de la pente).



Figure 4.5 - Points de sondage au Château de Bousval

4.3.2 Avec GPR

La méthode GPR a été réalisée avec l'aide du Professeur Sébastien Lambot. Cette partie est le résultat d'un travail commun d'écriture et d'interprétation réalisée avec Marion Trigaux.

4.3.2.1 Caractéristiques du radar

Dans le but d'appréhender la variation de la couche de limon, la méthode du GPR (sigle pour *Ground Penetrating Radar* en anglais) a été utilisée. Cet appareil utilise une antenne pointée vers le sol qui envoie des ondes électromagnétiques. Lorsque celles-ci rencontrent un changement de milieu, une partie est renvoyée vers l'antenne réceptrice.

Comme la couche de limon présente une REU plus élevée, l'onde peut être renvoyée en passant d'un milieu humide, le limon, à un milieu moins humide, le sable. Le temps mis par l'onde pour être renvoyée et enregistrée par l'antenne peut être converti en distance et cela permet de mesurer la profondeur de la couche de limon.

Le modèle de GPR utilisé est un radar GSSI SIR-20 (Geophysicial Survey Systems, Inc., Salem, Massacusetts, USA) avec une antenne radar de type papillon d'une fréquence centrale de 400 MHz.

Quatre profils ont été acquis sur la parcelle dans quatre inter-rangs : l'inter-rang 25-26, 45-46, 85-86 et 95-96. Dans ces inter-rangs, une transition nette de sable a été observée sur plusieurs dizaines de mètres le long du profil lors des sondages, à l'exception de l'inter-rang 85-86. Ces choix d'inter-rangs avaient pour but de pouvoir observer par GPR des profils de sol différents, avec et sans transition texturale marquée.

Les profils radar ont été acquis jusqu'à 50 nanosecondes avec une densité de 100 scans par mètre. La distance parcourue le long des profils est mesurée avec un odomètre qui sert également pour déclencher les mesures.

4.3.2.2 Traitement des données

Les données radar ont été traitées par le Pr. Sébastien Lambot afin d'optimiser la visibilité des structures et hétérogénéités du sol pour les conditions particulières du site. Toutes les images ont subi le même traitement. Les principales étapes du traitement sont les suivantes:

- Une fonction de gain de puissance a été appliquée dans le but de compenser l'atténuation des ondes radar avec la profondeur. Cette fonction appliquée est le temps au cube (t^3).
- Un filtre spectral temporel passe-bande de 100-900 MHz a été appliqué pour supprimer les données ayant un rapport signal sur bruit faible dû à la bande passante limitée de l'antenne radar tout en maximisant la résolution.
- Un filtre spatial a été appliqué pour supprimer les réflexions internes de l'antenne indépendantes du milieu ainsi que les réflecteurs constants le long des profils.
- Une conversion du temps de propagation des ondes (t) en une profondeur (z), en considérant une permittivité diélectrique relative $\varepsilon_r = 8$, a été réalisée sur base d'une estimation de l'humidité du sol à 15%. La permittivité relative d'un sol varie approximativement de 3 à 20, en fonction de son degré de saturation en eau et de ces propriétés physiques. La conversion du temps (en seconde) en profondeur (en mètre) se fait via l'équation suivante :

$$z = \frac{c}{2.\sqrt{\varepsilon_r}} . t$$

où c = 3 x 10^8 m/s est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide. A noter que 8 est une estimation de la permittivité diélectrique relative du sol au moment de la prise de mesure, qui peut varier avec l'espace : les profondeurs estimées sont donc approximatives.

4.4 Pesée des sarments

Comme expliqué dans le point sur la topographie, la vigne de la parcelle étudiée au Château de Bousval subit une plus forte contrainte hydrique sur le plateau en haut de pente que dans la vallée en bas de pente, due à une couche de limon moins épaisse. Sur la Figure 4.6 sont délimitées les deux zones, définies par le viticulteur, qui ont été vendangées et vinifiées séparément. La zone en jaune, appelée plateau/haut de pente par après, a logiquement une réserve en eau utile inférieure à celle de la zone en orange, appelée vallée/bas de pente par après. Une étude de la vigueur des vignes a été réalisée. En effet, les vignes du plateau se sont développées avec moins d'eau à leur disposition, ce qui pourrait limiter la taille, le poids et le nombre de sarments. Pour vérifier cela, les bois de taille et de prétaille venant des deux zones ont été récoltés et pesés séparément. Ensuite, ce poids a été ramené au nombre de pied afin de déterminer le nombre de kilo de bois de taille et de prétaille par pied en moyenne dans les deux zones. Cette opération a été réalisée tous les dix rangs afin de capter

l'hétérogénéité de la parcelle. Il a donc fallu également compter le nombre de pieds du plateau et de la vallée pour chacun des rangs où la pesée a été réalisée.



Figure 4.6 - Délimitation de deux zones en fonction de la contrainte hydrique au Château de Bousval

4.5 Mesure de la densité apparente

La densité apparente se calcule avec les cylindres kopecki de volume connu de 100 cm^3 avec la formule suivante :

$$\rho_{a=}\frac{M_S}{V_t}$$

avec V_t le volume total de sol (donc ici 100 cm^3) et M_s la masse de sol sec, obtenu après que les cylindres kopecki aient passé 48 heures dans l'étuve à 105°C.

4.6 Granulométrie

Pour l'analyse granulométrique, les échantillons déstructurés ont été utilisés. Ils ont été préalablement séchés, broyés et tamisés afin de ne garder que la fraction fine (<2mm). La matière organique qui pourrait stabiliser les argiles est détruite par attaque à l'eau oxygénée. Ensuite, la fraction sableuse est tamisée sous eau à l'aide de tamis de 50 microns. Les fractions argileuses et limoneuses ont été déterminées selon la méthode à la pipette de Robinson qui se base sur la loi de Stoke, mettant en relation la vitesse de sédimentation et le rayon des particules. Le sol, ne contenant plus que les limons et les argiles, est placé dans une colonne d'un litre avec un agent dispersant (héxamétaphosphate de sodium). Après mélange et sédimentation, en prélevant 20 ml de la solution à des endroits et des moments bien précis, il est possible d'obtenir la fraction argileuse (<2µm), limoneuse fine (2-20µm) et

grossière (20-50µm). Ensuite, la fraction pondérale de chaque classe est exprimée en pourcent par rapport au poids sec après 24 heures à l'étuve à 105°C.

4.7 Mesure de la réserve en eau utile

Pour déterminer la réserve en eau utile des deux parcelles, il faut calculer la différence de teneur en eau à deux points caractéristiques : au point de flétrissement permanent (PFP) et à la capacité au champ (CC). La réserve en eau utile sera exprimée en mm/cm de sol.

4.7.1 Mesure de la teneur en eau à la capacité au champ

La première étape consiste à saturer les cylindres kopecki par le bas en maintenant un niveau d'eau à la base des échantillons afin que l'eau puisse monter par capillarité. La base des cylindres est recouverte d'une membrane en nylon avec une ouverture de 50µm (Figure 4.7).

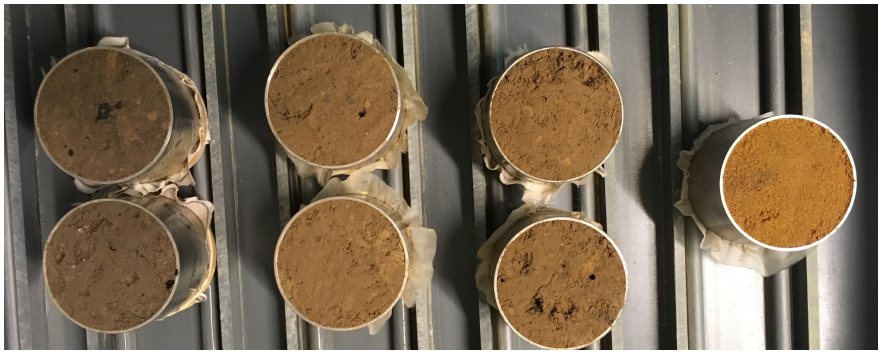


Figure 4.7 - Cylindres kopecki avec membranes de nylon avant la saturation (BBPs+p, PMPs+p, BHPs+p, SAB)

Ensuite les cylindres sont placés dans un bac à saturation contenant une solution diluée de sulfate de calcium à 0,005M pour éviter la dispersion des argiles. Ce bac est équipé d'un vase de Mariotte qui permet de garder le niveau d'eau constant à la base des échantillons (Figure 4.8). Lorsqu'un film d'eau est visible à la surface des échantillons, ceux-ci sont saturés.



Figure 4.8 - Bac de saturation

Les cylindres kopecki sont ensuite placés dans la casserole à basse pression (Figure 4.9). Cette étape se fait sans la membrane en nylon car la face inférieure du cylindre doit être en contact avec une plaque poreuse en céramique, préalablement saturée elle aussi. Cette plaque et les échantillons sont donc placés dans une enceinte fermée (Figure 4.10), dans laquelle est appliquée une pression donnée. La face aval de la plaque est connectée à la pression atmosphérique. Dès lors, un gradient de pression est appliqué sur la phase liquide. Ce gradient génère une désaturation de l'échantillon jusqu'à atteindre l'équilibre de potentiel entre l'eau dans l'échantillon et la pression désirée (Javaux et Laurent, 2018). Pour la capacité au champ, une pression de 0,3 bar a été appliquée, c'est-à-dire un pF de 2,477 ≈ 2,5.

L'équilibre est atteint lorsque le niveau d'eau dans les tubes qui réceptionnent l'eau drainée de la plaque poreuse ne varie pas en 48 heures. Cela prend environ une semaine. Une fois l'équilibre atteint, les cylindres sont pesés une première fois puis ensuite une deuxième fois après avoir été placés à l'étuve pendant 48h. La différence de poids entre les deux pesées ainsi que le volume connu du cylindre permettent d'obtenir la teneur en eau volumique. Pour déterminer la teneur en eau massique, il est nécessaire de connaître le poids du sol sec, le cylindre kopecki est donc pesé séparément à la fin de l'opération.



Figure 4.9 - Casserole à basse pression avec cylindres kopecki

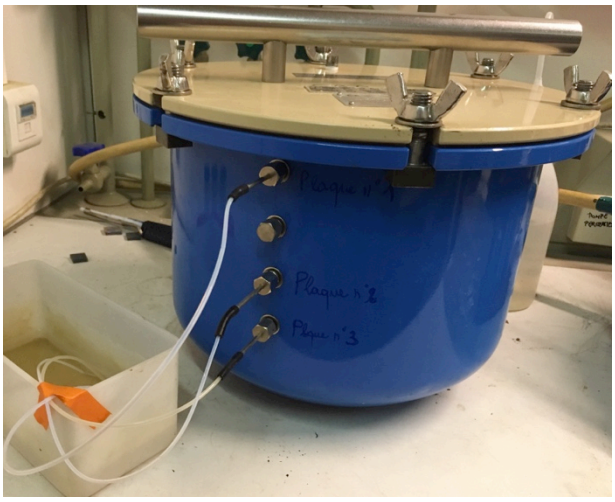


Figure 4.10 - Casserole à basse pression fermée

4.7.2 Mesure de la teneur en eau au point de flétrissement permanent

Le principe utilisé pour la mesure de la teneur en eau au point de flétrissement permanent est très semblable à celui de la casserole à basse pression. Cependant, une pression plus élevée est appliquée, la casserole à haute pression est dès lors utilisée. La pression appliquée est de 15 bar ce qui correspond à un pF de 4,176 ≈ 4,2. A cette pression, les pores plus larges liés à la structure sont vides et seuls les pores liés à la texture sont concernés. Cette étape se réalise donc avec des échantillons déstructurés.

Ces échantillons sont mélangés avec de l'eau afin de former une boue homogène (Figure 4.11).



Figure 4.11 - Échantillons déstructurés sous forme de boue homogène

Cette boue est ensuite placée dans des anneaux de 5 cm de diamètre pour 1 cm de hauteur, eux-mêmes placés sur la plaque de céramique dans la casserole à haute pression. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque échantillon. Une fois que tous les anneaux placés dans la casserole ont été remplis, celle-ci est refermée avec des tiges de serrage prévues à cet effet. Il faut attendre environ 10 jours pour atteindre l'équilibre. Les échantillons de sol sont pesés à la sortie de la casserole puis placés à l'étuve (sans les anneaux de PVC) pendant 48 heures (Figure 4.12).



Figure 4.12 - Échantillons à la sortie de la casserole à haute pression

Une deuxième pesée après le passage à l'étuve permet de déterminer la teneur en eau massique des échantillons au pF 4,2. La teneur en eau volumique peut être obtenue à l'aide de la densité apparente via la formule suivante :

$$\theta_{vol} = w \,.\, \rho_a$$

avec θ_{vol} la teneur en eau volumique, w la teneur en eau massique et ρ_a la densité apparente (g/cm^3). Cependant, les valeurs de teneur en eau dans la suite de ce travail sont souvent exprimées en g d'eau par g de sol pour ne pas fausser la valeur de teneur en eau volumique dans le cas d'une éventuelle erreur dans la densité apparente.

4.8 Mesure de la teneur en eau

Depuis le mois de février et à la fréquence d'une fois par mois environ, des échantillons ont été prélevés dans les deux vignobles. Ils ont été prélevés en surface, entre 0 et 15 cm et en profondeur, entre 40 et 55 cm, avec entre trois et cinq répliquas par profondeur. Au Château de Bousval, le prélèvement s'est effectué sur le haut de pente et le bas de pente, à proximité du point de prélèvement des cylindres kopecki (Figure 4.1). Au Domaine W, les échantillons ont été prélevés à différents endroits de la parcelle, la topographie n'ayant pas ou peu d'influence sur le sol. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une tarière creuse (Figure 4.13). Les échantillons de sol étaient placés dans un sachet en plastique fermé pendant le transport jusqu'au laboratoire où ils étaient pesés avant d'être placés à l'étuve. Une deuxième pesée après 48h à l'étuve permet de déterminer la teneur en eau du sol au moment du prélèvement.



Figure 4.13 - Tarière pour le prélèvement d'échantillons

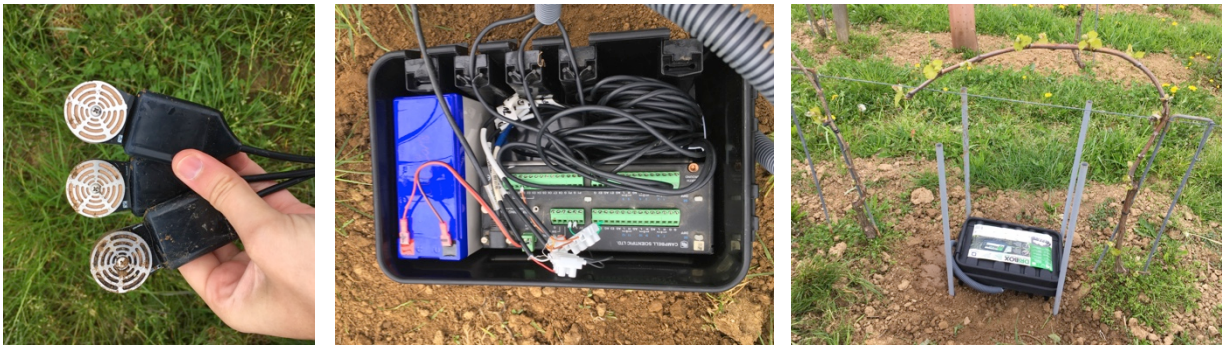
Les dates d'échantillonnages sont indiquées dans le Tableau 4.1

Tableau 4.1 - Dates d'échantillonnage

	Château de Bousval	Domaine W
25 février 2019	X	
6 mars 2019		X
11 mars 2019	X	
23 mars 2019	X	
9 avril 2019		X
30 avril 2019	X	X
31 mai 2019	X	X
25 juin 2019	X	X
27 juin 2019	X	X
3 juillet 2019	X	X

4.9 Mesure du potentiel matriciel et de la température

Fin avril, des sondes ont été installées dans les vignobles. Il s'agit de la sonde TEROS 21 de METER Groupe ®. Trois sondes ont été installées par site, au milieu de l'inter-rang, entre 10 et 15 cm sous la surface. Au Château de Bousval, un site se situe en haut de pente et un site en bas de pente, à proximité du point de prélèvement des cylindres kopecki. Au Domaine W, un seul site avec trois sondes a été installé, au milieu de la parcelle. La tête du capteur est composée de deux disques poreux en céramique. Les sondes sont reliées à un datalogger, lui-même relié à une batterie (Figure 4.14).



(a) (b) (c)

Figure 4.14 - Installation des sondes TEROS 21: sondes (a), datalogger et batterie (b), boitier final (c)

Ces sondes mesurent le potentiel de l'eau du sol et sa température. Leur fonctionnement repose sur le principe suivant : lorsqu'un objet est en contact hydraulique avec le sol, le potentiel de l'eau de cet objet se met en équilibre avec le potentiel de l'eau du sol. Mesurer le potentiel de l'eau des disques en céramique poreux donne donc la mesure (indirecte) du potentiel de l'eau du sol, puisque ceux-ci sont en équilibre. La sonde mesure en vérité la permittivité diélectrique des disques de céramique pour en déterminer ensuite son contenu en eau. En effet, la permittivité diélectrique de l'air, de la céramique solide et de l'eau est très différente (1, 5 et 80 respectivement). C'est pourquoi la permittivité des disques dépend fortement de la quantité d'eau présente dans les espaces poreux. Le potentiel de l'eau est relié à la teneur en eau par la courbe de rétention de la céramique. Comme la distribution des pores des disques poreux de céramique est connue, le potentiel de l'eau peut être déduit de la teneur en eau de ces disques (Decagon Devices, 2016). Cependant, les mesures de teneur en eau ne sont pas accessibles car les capteurs n'informent que du potentiel matriciel. Pour connaître la valeur de la teneur en eau à partir du potentiel matriciel, il faudrait déterminer la courbe de rétention des sols, ce qui n'a pas été réalisé dans le cadre de ce travail.

Les sondes ont pris la tension de l'eau du sol toutes les heures pendant les mois de mai et juin et ces données ont été enregistrées dans le datalogger.

4.10 Analyses statistiques

Afin de déterminer si la moyenne d'une mesure prise sur plusieurs échantillons est statistiquement différente d'une autre, un test de Student ou test t a été réalisé. Pour les échantillons de ce travail, ce test est utilisé pour comparer deux moyennes de deux populations lorsque leurs variances sont inconnues et supposées différentes. Il fonctionne de la manière suivante :

$$H_0 \quad \mu_1 = \mu_2 \qquad\qquad H_1 \quad \mu_1 \neq \mu_2$$

Statistique de test : $t_{obs} = \frac{(\overline{X_1} - \overline{X_2})}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \sim t_{dl}$ sous H_0 avec $dl = \frac{(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2})^2}{\frac{(\frac{s_1^2}{n_1})^2}{n_1 - 1} + \frac{(\frac{s_2^2}{n_2})^2}{n_2 - 1}}$

Dans ce mémoire, l'hypothèse nulle est rejetée si la p valeur est inférieure à 0,05 avec

$$\text{p valeur} = 2.P(t_{dl} > |t_{obs}|)$$

Ces tests sont effectués avec le logiciel RStudio ®.

Dans la suite de ce travail, si deux moyennes ne sont pas significativement différentes, elles seront annotées d'une même lettre minuscule. Au contraire, des valeurs significativement différentes n'auront aucune lettre en commun.

5. Résultats

Dans ce chapitre seront d'abord présentés l'ensemble des résultats pour le vignoble du Château de Bousval et ensuite pour le Domaine W.

5.1 Vignoble du Château de Bousval

5.1.1 Variation de la profondeur de la couche de limon

5.1.1.1 Par sondage

La Figure 5.1 illustre la profondeur de la couche de limon qui recouvre le sable bruxellien pour la parcelle du Château de Bousval.

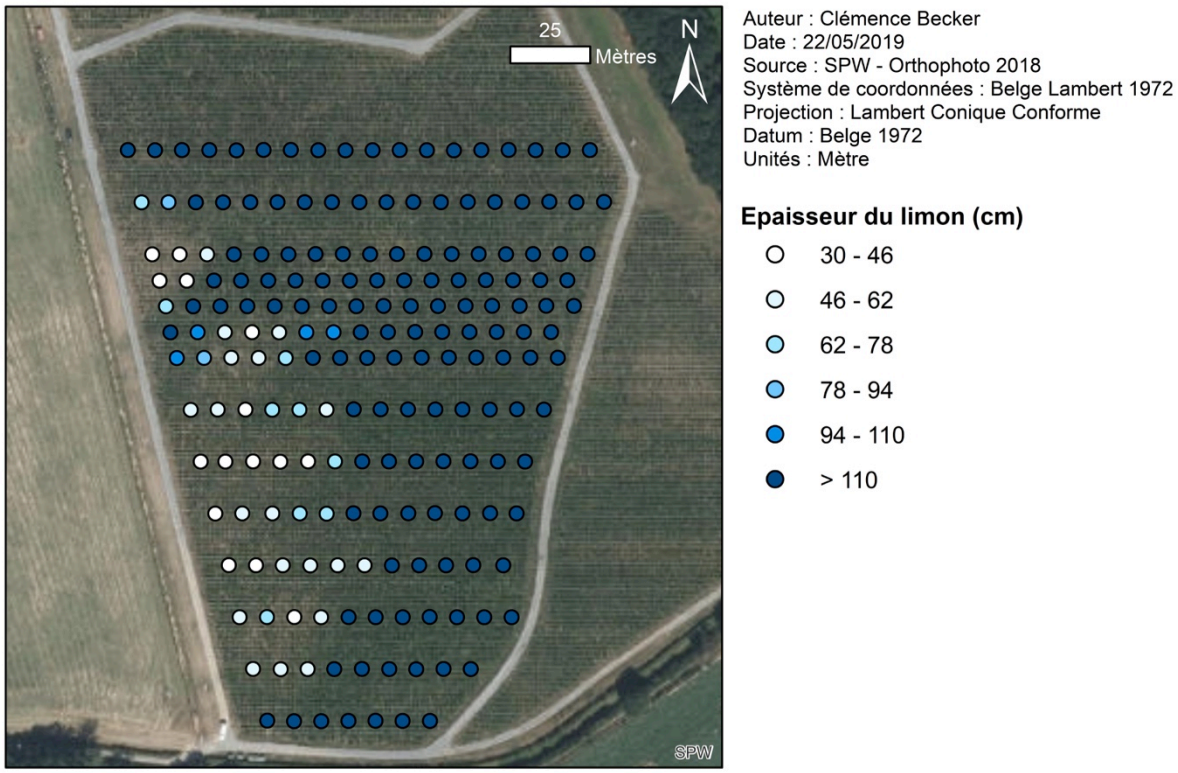


Figure 5.1 - Épaisseur de la couche de limon aux points de sondage

Pour une meilleure visualisation de la variation spatiale de la couche de limon, une interpolation sur le logiciel ArgGis®. Celle-ci a été faite à l'aide de l'outil « IDW » (Inverse distance weighted) qui pondère par l'inverse de la distance. Le résultat de cette interpolation est visible à la Figure 5.2.

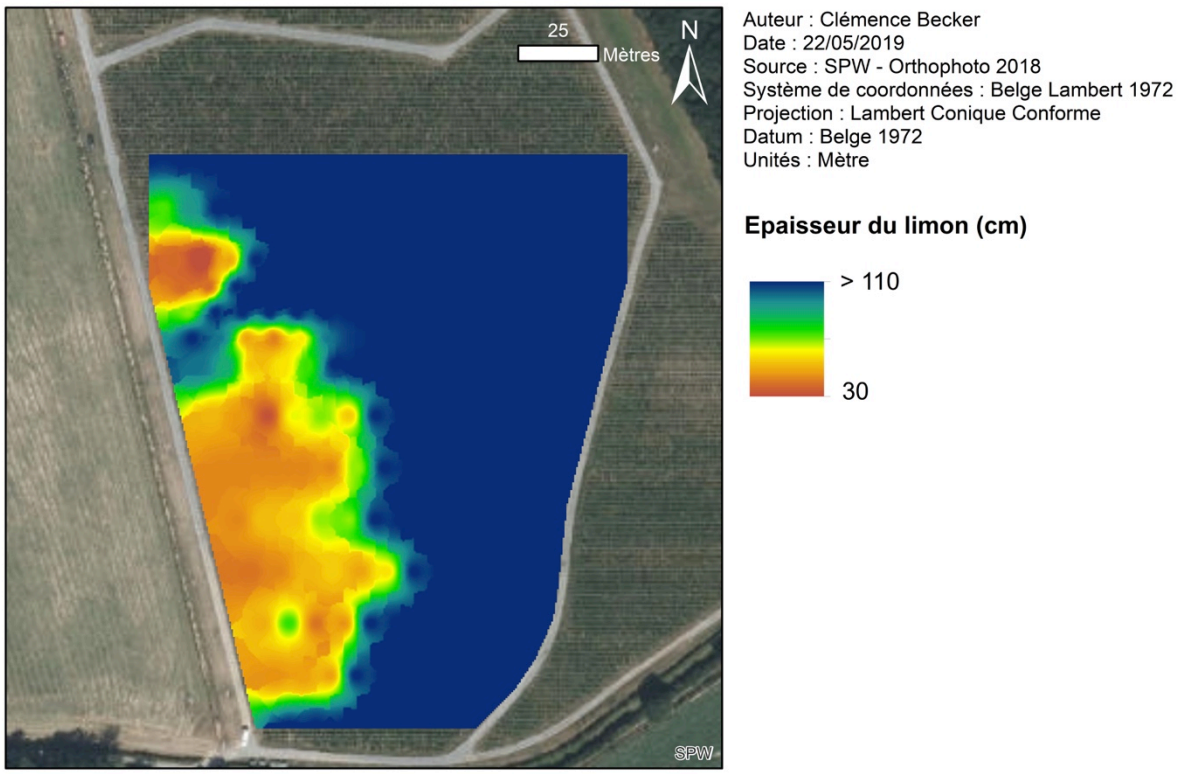


Figure 5.2 - Interpolation de l'épaisseur de la couche de limon aux points de sondage

Il est clair que le sable affleure davantage en haut de pente. La couche de limon varie avec la topographie et a tendance à s'épaissir le long de la pente.

5.1.1.2 Avec GPR

Les quatre figures suivantes présentent les résultats des différents profils acquis avec le GPR. La position x = 0 est localisée sur le plateau en haut de pente de chacun des rangs. La profondeur en ordonnée est approximative car dépendante de la permittivité qui a été fixée à 8 selon les conditions d'humidité mais qui peut varier légèrement.

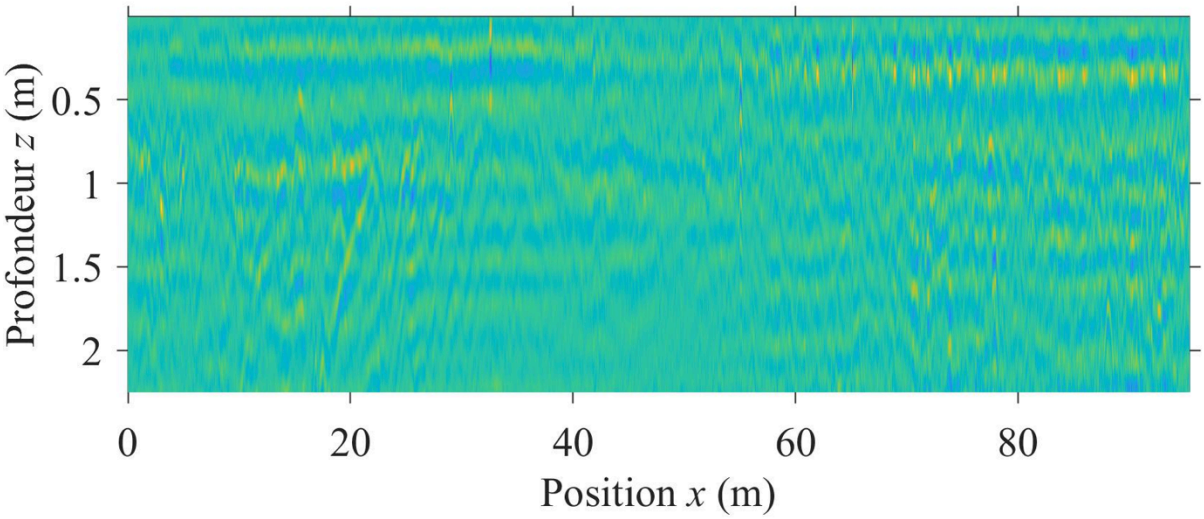


Figure 5.3 - Profil GPR pour le transect entre le rang 25 et 26

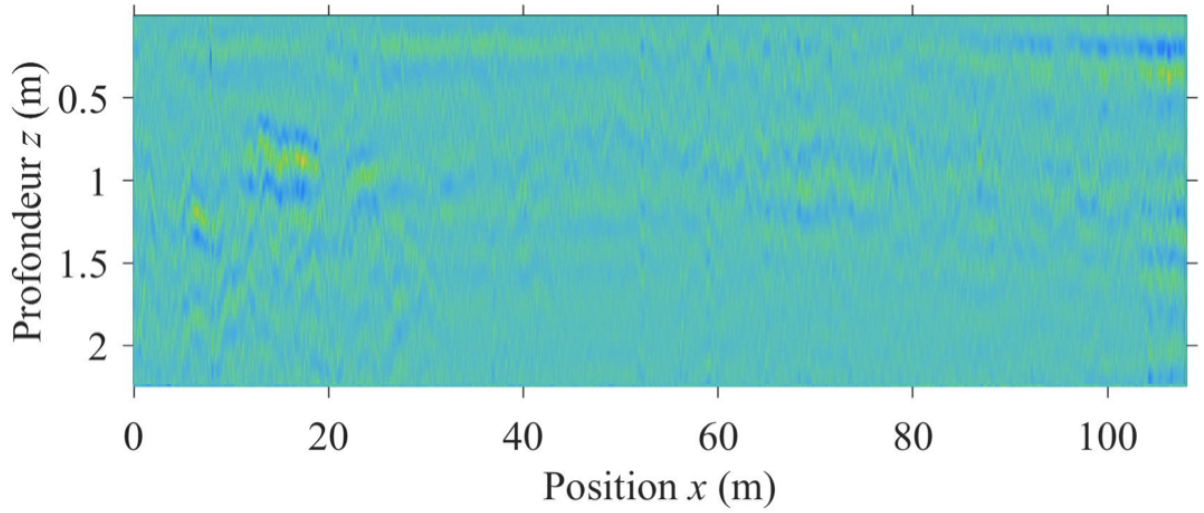


Figure 5.4 - Profil GPR pour le transect entre le rang 45 et 46

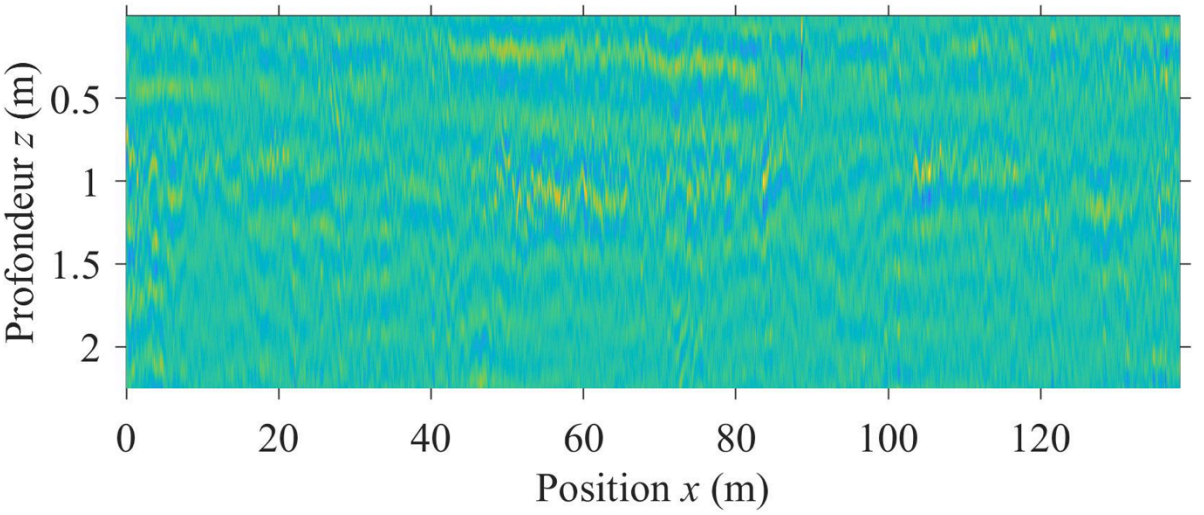


Figure 5.5 - Profil GPR pour le transect entre le rang 85 et 86

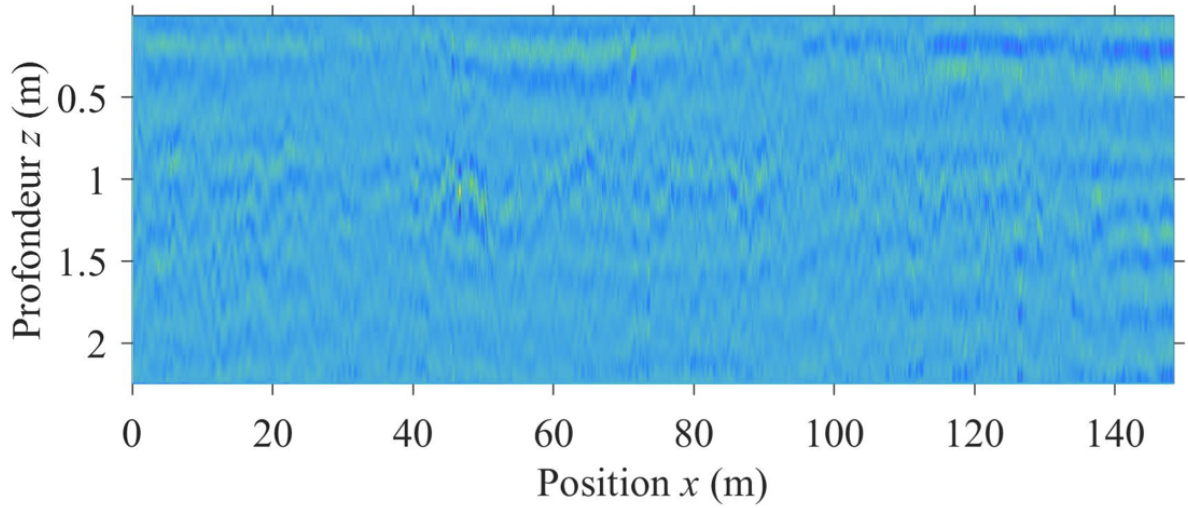


Figure 5.6 - Profil GPR pour le transect entre le rang 95 et 96

Il est possible d'observer des variations, un ensemble d'hyperboles de réflexion qui signifie qu'il y a des hétérogénéités locales telles que des cailloux. A certains endroits, l'amplitude de la réflexion du sol change, cela peut suggérer un contraste pédologique plus marqué ou une couche avec une humidité plus élevée, ce qui est lié au contraste pédologique. Certaines zones ressortent davantage.
Sur la Figure 5.4 de l'inter-rang 45-46, une zone d'hyperbole se démarque entre 15 et 20 mètres et vers un mètre de profondeur. Cela pourrait être une zone de transition entre le limon et le sable qui est plus marqué pédologiquement à cet endroit.
Sur la Figure 5.5 de l'interrang 85-85, entre 40 et 80 mètres apparaît une zone de réflexions plus intenses qui indique probablement un sol plus humide.

Les résultats ne correspondent pas tout à fait à ce qui était attendu. En effet, étant donné la présence d'une couche de limon sur une couche de sable, nous nous attendions à pouvoir observer un contraste représenté par un ensemble d'hyperboles descendant le long du profil, au fur et à mesure que la couche de limon s'épaissit. Ce n'est pas vraiment le cas. Deux raisons peuvent expliquer cela. D'abord, il se peut que le contraste pédologique ne soit pas suffisamment marqué et qu'il y ait plutôt une zone de transition entre le limon et le sable. Ensuite, les conditions hydrodynamiques au moment de la mesure n'étaient peut-être pas assez contrastées sur les premiers mètres de profondeur que pour voir cette transition sur les résultats du GPR.

5.1.2 Pesée des sarments

Le poids moyen des sarments taillés par pied pour les vignes en haut de pente et en bas de pente sont représentés à la Figure 5.7, à gauche pour la prétaille et à droite pour la taille. Les données sont manquantes pour les rangs 15 et 35.

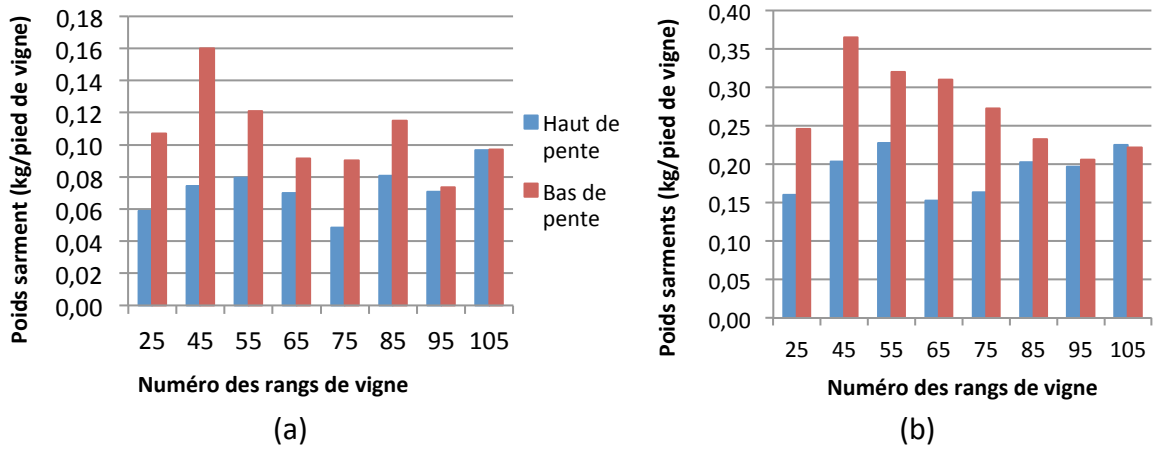


Figure 5.7 - Poids moyen des sarments par pied pour le plateau et la vallée pour la prétaille (a) et taille (b)

Il apparaît clairement que le poids des sarments est plus élevé en bas de pente par rapport au plateau, autant pour les bois de taille et de prétaille. Cette différence n'est pas marquée de la même façon en fonction des rangs de vigne. La Figure 5.8 illustre cette différence de poids entre les deux parties de la parcelle selon l'équation suivante :

$$Différence\ (\%) = \frac{(Poids\ moyen\ en\ bas\ de\ pente - poids\ moyen\ en\ haut\ de\ pente)}{Poids\ moyen\ en\ bas\ de\ pente}.100$$

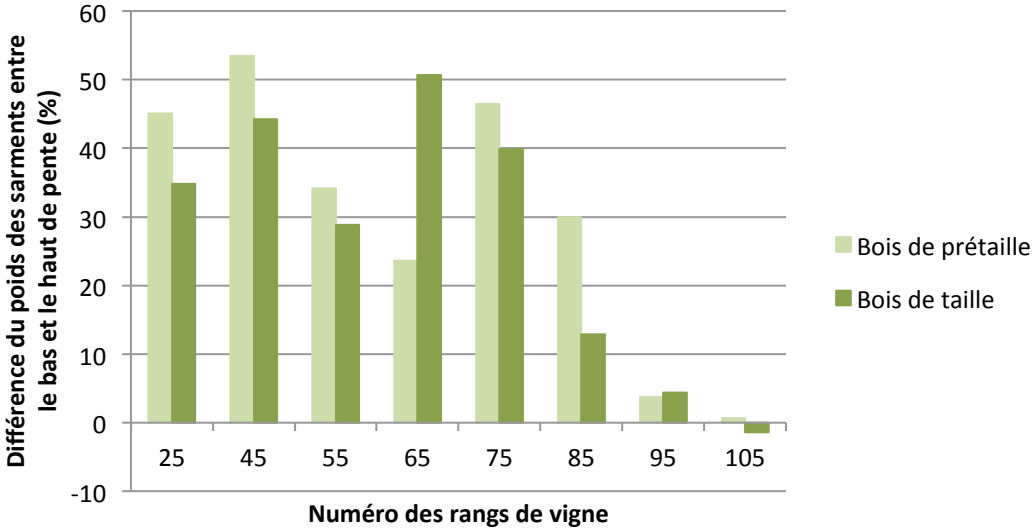


Figure 5.8 - Différence du poids des sarments entre le bas et le haut de pente pour plusieurs rangs de vigne

La différence est globalement plus marquée pour le bois de prétaille que pour le bois de taille. Aussi, les deux paramètres suivent une même tendance entre les rangs avec des différences importantes pour les rangs 25, 45, 55, 65 et 75 alors que la différence est très faible pour la rang 95 voire inexistante pour le rang 105.

La Figure 5.9 indique où se situent les rangs sur la carte d'épaisseur du limon. Le lien est bien visible. Le rang 105, où aucune différence de poids des sarments n'est observée entre le haut et le bas de pente, est localisé dans une zone où la couche de limon est importante, y

compris sur le haut de pente. Les vignes des deux zones ne seront pas soumises à une contrainte hydrique très différente puisque les racines ne pénètrent pas la couche de sable (sauf peut-être sur les premiers mètres du rang). A l'inverse, les vignes des rangs 25 à 75 sur le haut de pente, à la différence de poids des sarments bien marquée, disposeront de quantités moindres d'eau utile car la couche de limon est moins épaisse qu'en bas de pente.

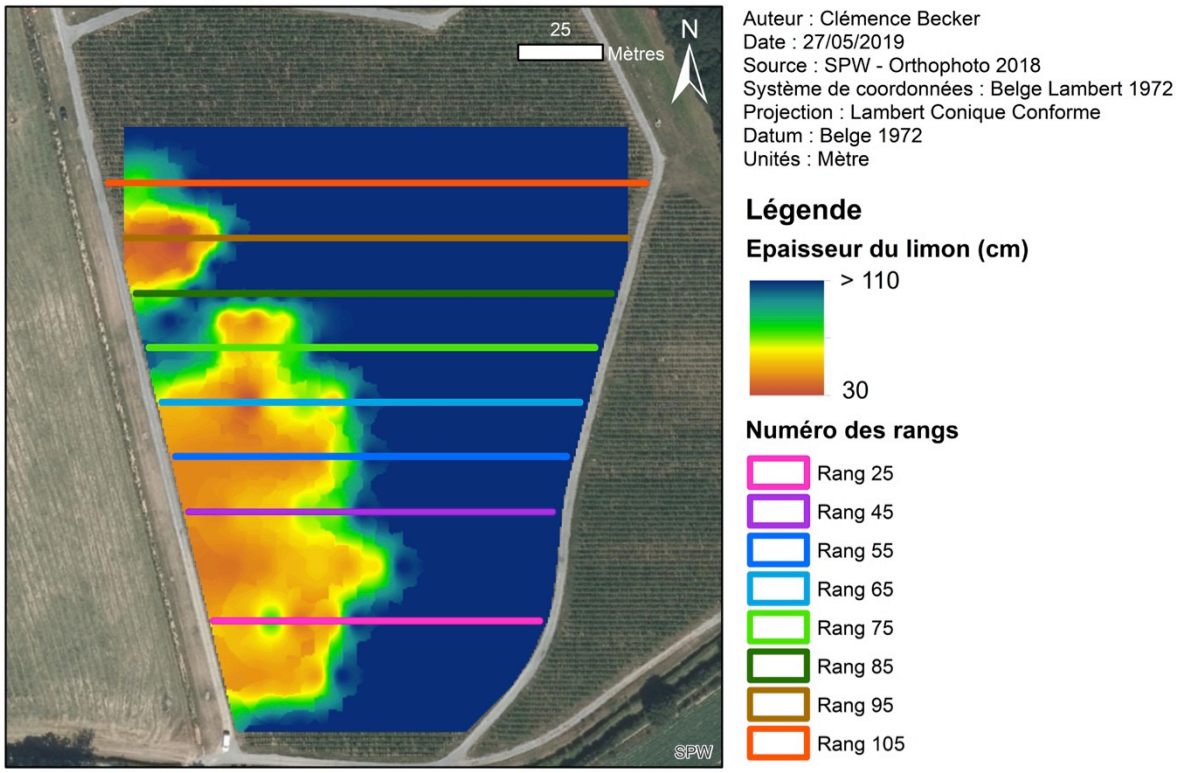


Figure 5.9 - Épaisseur de la couche de limon et numéro des rangs

5.1.3 Granulométrie

Le Tableau 5.1 reprend la texture aux différents points d'échantillonnage pour la parcelle de Bousval.

Tableau 5.1 - Texture pour les échantillons du Château de Bousval

	Sable (500-2000 μm) %	Limon grossier (20-500 μm) %	Limon fin (2-20 μm) %	Argile (0-2 μm) %
SAB	95,07	1,56	1,12	2,25
HPs	43,57	22,94	15,26	18,24
HPp	81,11	3,32	4,11	11,47
MPs	52,57	18,06	13,89	15,48
MPp	34,49	23,38	22,86	19,26
BPs	38,09	28,25	17,96	15,70
BPp	31,88	30,01	18,87	19,24

Le triangle textural, selon la classification USDA en 12 classes, est illustré à la Figure 5.10, où les différents échantillons sont pointés.

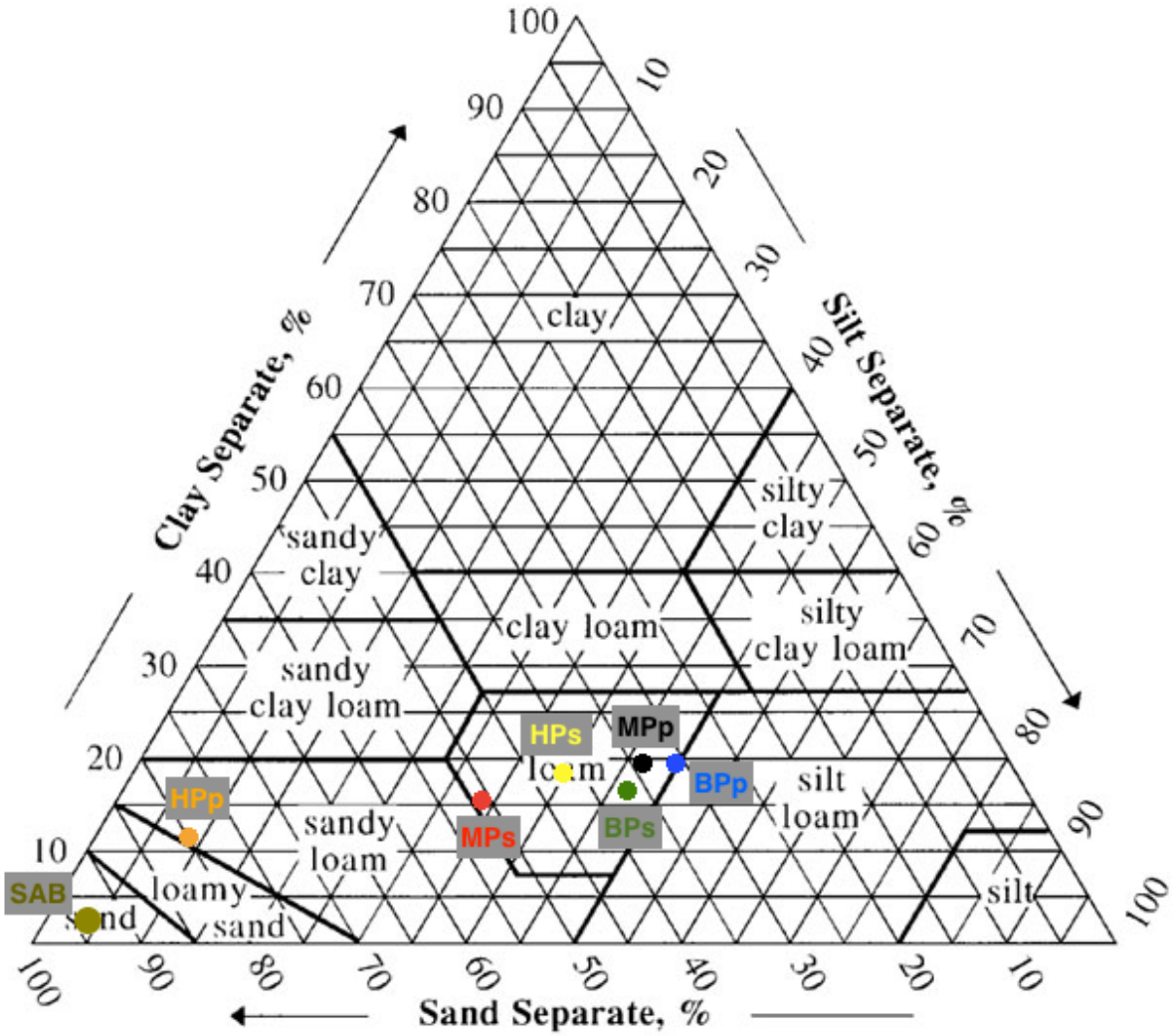


Figure 5.10 - Triangle textural pour les échantillons du Château de Bousval

Sans surprise, l'analyse texturale du sable bruxellien révèle plus de 95% de sable. L'échantillon du haut de pente, présente à 40 cm de profondeur une texture dominée sableuse, avec 81% de sable, ce qui pourrait dénoter un léger mélange avec la couverture limoneuse, peu épaisse dans cette position topographique.

Les autres échantillons sont tous caractérisés par la classe texturale « Loam » avec une teneur en argile variant entre 15 et 20%, une teneur en sable comprise entre 30 et 52%, et en limon allant de 32 à 49%.

5.1.4 Densité apparente

Les valeurs moyennes de la densité apparente des différents sites d'échantillonnage du Château de Bousval sont présentées dans le Tableau 5.2. Les lettres minuscules indiquent si les valeurs ont une p-valeur < 0,05 selon un test de Student. Les valeurs partageant une même lettre minuscule en commun ne sont pas significativement différentes avec un degré de confiance de 95%. Cette notation s'appliquera à d'autres parties de ce mémoire.

Tableau 5.2 - Moyenne arithmétique des densités apparentes et écart-type pour les échantillons du Château de Bousval

	ρ_a moyenne (g/cm^3)	Écart-type
SAB	1,5921 ac	0,0415
HPs	1,6263 abc	0,0671
HPp	1,6568 a	0,0107
MPs	1,5785 abc	0,0679
MPp	1,5932 abc	0,0735
BPs	1,5080 b	0,0295
BPp	1,5950 c	0,0190

Les valeurs de densité apparente moyennes sont assez élevées pour tous les sites d'échantillonnage et aux deux profondeurs. La teneur élevée en sable et puis en limon peut être une première explication de la densité apparente élevée. De plus, le passé cultural (maïs) de la parcelle avec l'utilisation de nombreux passages d'engins agricoles pourrait justifier une éventuelle compaction.

5.1.5 Teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, réserve en eau utile

Les teneurs en eau massique à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent sont présentés au Tableau 5.3 ainsi que mis en graphique à la Figure 5.11.

Tableau 5.3 - Moyenne arithmétique des teneurs en eau massique pour les échantillons du Château de Bousval

	Teneur en eau massique à capacité au champ (g/g)	Teneur en eau massique au point de flétrissement permanent (g/g)
SAB	0,0733 a	0,0165 a
HPs	0,1876 bcd	0,1251 b
HPp	0,1850 b	0,0727 c
MPs	0,2020 bcd	0,0929 d
MPp	0,1832 bc	0,1124 ef
BPs	0,2384 e	0,1083 e
BPp	0,2073 d	0,1174 f

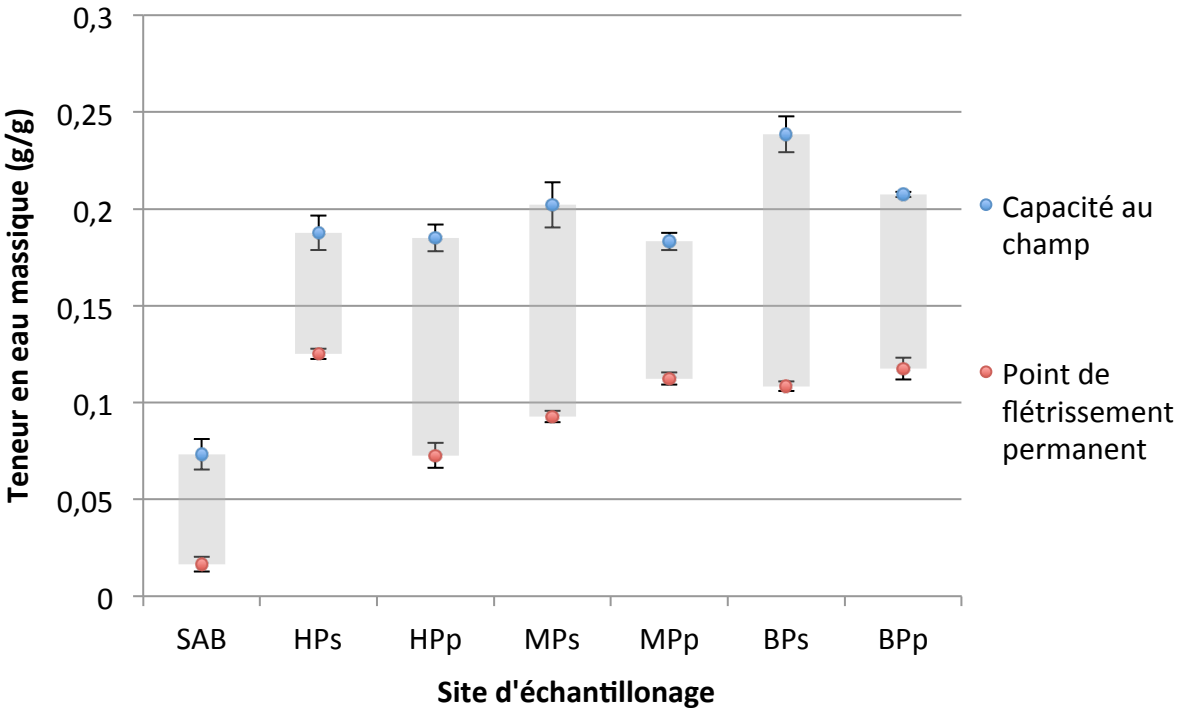


Figure 5.11 - Teneur en eau massique $(\overline{x} \pm \sigma)$ ***pour les différents échantillons du Château de Bousval***

L'échantillon de sable bruxellien présente des valeurs de teneur en eau fortement inférieure à celles de tous les autres échantillons, de par sa texture sableuse et donc sa macroporosité importante.

En utilisant la densité apparente, la réserve en eau utile peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$REU = (w_{CC} - w_{PFP}).\rho_a.10$$

avec

- REU : réserve en eau utile (mm/cm)
- w_{CC} : teneur en eau massique à la capacité au champ (g/g)
- w_{PFP} : teneur en eau massique au point de flétrissement permanent (g/g)
- ρ_a : densité apparente (g/cm^3)

Elle est présentée sur le graphique de la Figure 5.12.

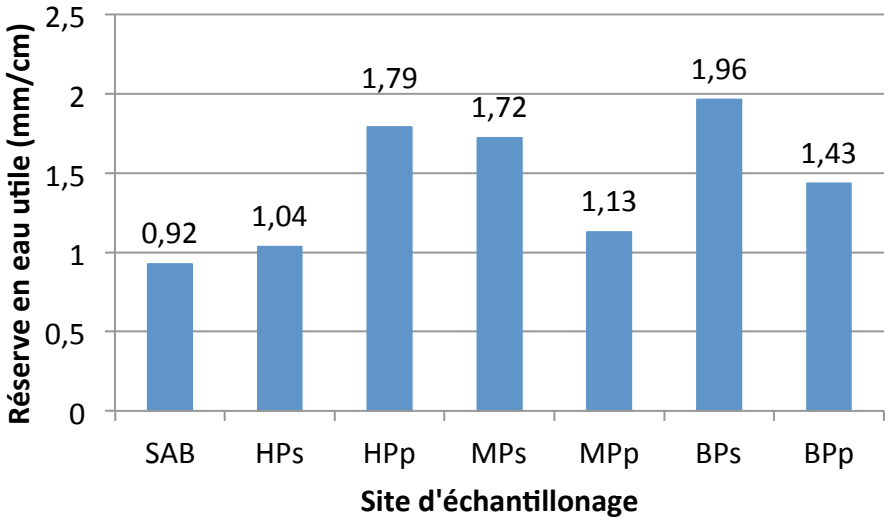


Figure 5.12 - Réserve en eau utile pour les différents sites d'échantillonnage du Château de Bousval

La réserve en eau utile (REU) est la plus faible pour l'échantillon de sable mais de peu, l'échantillon du haut de pente en surface et du milieu de pente en profondeur ont une réserve en eau juste légèrement supérieure.

Notons que le calcul de la REU requiert la densité apparente et la teneur en eau massique à la capacité au champ (cylindres kopecki) ainsi que la teneur en eau massique au point de flétrissement permanent (échantillons déstructurés). Ces deux types d'échantillons ne sont pas toujours pris exactement au même endroit ou à la même profondeur. Pour l'échantillon du haut de pente en profondeur, l'échantillon déstructuré pris à la tarière était plus sableux que les cylindres kopeckis prélevés dans une fosse à quelques dizaines de centimètres. Cela cause une teneur en eau au point de flétrissement assez basse, se rapprochant de celle de l'échantillon de sable bruxellien, alors que ce n'est pas le cas pour la teneur en eau à la capacité au champ. La réserve en eau utile pour ce point est donc assez élevée à cause de cette raison.

Mis à part le haut de pente, la réserve en eau utile est nettement inférieure en profondeur qu'en surface.

5.1.6 Teneur en eau

Le Tableau 5.4 reprend les teneurs en eau massique pour les différentes dates d'échantillonnage sur le plateau en haut de pente au Château de Bousval. A cette position topographique, le sable bruxellien apparaît déjà entre 40 et 55 cm de profondeur. La hauteur des précipitations (mm) est aussi renseignée pour les deux et sept jours précédents l'échantillonnage.

Tableau 5.4 - Teneur en eau par échantillonnage au Château de Bousval sur le plateau

			HPs (0-15cm)			HPp (SAB)		
Date	Pluie J-2 (mm)	Pluie J-7 (mm)	Teneur eau (g/g)	Teneur eau à CC (g/g)	Teneur eau à PFP (g/g)	Teneur eau (g/g)	Teneur eau à CC (g/g)	Teneur eau à PFP (g/g)
25/02/19	0	0,5	0,186 a	0,188	0,125	0,104 a	0,073	0,026
11/03/19	9,9	31,2	0,207 b			0,127 b		
23/03/19	0	10,3	0,200 b			0,106 a		
30/04/19	0	8,8	0,109 c			0,072 c		
31/05/19	0,2	12	0,117 c			0,063 cd		
25/06/19	0	3,7	0,113 c			0,069 cd		
27/06/19	0	0	0,109 c			0,052 d		
03/07/19	0	0	0,074 d			0,047 d		

Pour les trois premières dates, de fin février à fin mars, la teneur en eau est proche ou supérieure à la teneur en eau à la capacité au champ, tant en surface qu'en profondeur, qu'il ait plu ou pas au cours des dernières 48 heures. Le débourrement ayant eu lieu à la mi-avril, avant cette date la vigne est toujours en dormance, consommant peu d'eau. De plus, l'évapotranspiration est très faible vu que la surface foliaire est faible et que la température maximale moyenne n'excède pas 12°C en février et mars. La réserve en eau du sol est donc peu utilisée par l'ensemble vigne-enherbement avant le mois d'avril.

Pour les dates suivantes, à partir de mai, la teneur en eau du sol a nettement diminué par rapport aux valeurs mesurées en février et mars. Par exemple, entre l'échantillonnage du 23 mars et du 30 avril, la teneur en eau passe de 0,200 g/g à 0,109 g/g fin avril, alors que la pluviosité des jours précédant l'échantillonnage était très semblable. Le débourrement de la vigne et des températures plus élevées représentent certainement la cause de cette différence de teneur en eau du sol.
En surface, la teneur en eau du sol au moment de l'échantillonnage est même inférieure à la teneur en eau au point de flétrissement permanent calculé à cet endroit. Cela indique que la réserve en eau du sol est épuisée en surface et que l'eau n'est retenue que dans la microporosité, où elle est indisponible pour la plante.
En profondeur, dans le sable, il y a également une teneur en eau plus faible à partir d'avril mais la différence est moins marquée. En effet, la teneur en eau du sol est tout juste légèrement inférieure à la teneur en eau à la capacité au champ. L'enherbement du sol, aux racines plutôt courtes influence probablement moins la teneur en eau en profondeur, ce qui explique cette différence mois marquée par rapport à la surface.

Entre l'échantillonnage du 25 juin et du 3 juillet 2019, a eu lieu une vague de chaleur en Belgique sans pluie et sous températures dépassant les 30 degrés plusieurs jours de suite. La teneur en eau en surface est passée de 0,113 à 0,074 g/g en 8 jours. Le sol en surface était

extrêmement sec, largement en dessous de la teneur en eau au point de flétrissement permanent.
En profondeur, dans le sable, la différence est à nouveau moins marquée avec une valeur de 0,047 g/g pour le 3 juillet, mais qui n'est pas significativement différente des teneurs en eau des trois derniers échantillonnages. Cependant, bien que supérieures à la teneur en eau au point de flétrissement, ces valeurs de teneur en eau sont très faibles : très peu d'eau est disponible pour la plante, de par la texture sableuse.

Dans le Tableau 5.5 se trouvent les mêmes résultats pour l'échantillonnage pour le site en bas de pente du Château de Bousval.

Tableau 5.5 - Teneur en eau par échantillonnage au Château de Bousval en bas de pente

			BPs (0-15cm)			**BPp (40-55cm)**		
Date	Pluie J-2 (mm)	Pluie J-7 (mm)	Teneur eau (g/g)	Teneur eau à CC (g/g)	Teneur eau à PFP (g/g)	Teneur eau (g/g)	Teneur eau à CC (g/g)	Teneur eau à PFP (g/g)
25/02/19	0	0,5	0,228 a	0,238	0,108	0,229 a	0,207	0,117
11/03/19	9,9	31,2	0,258 b			0,233 a		
23/03/19	0	10,3	0,255 b			0,227 a		
30/04/19	0	8,8	0,161 c			0,199 b		
31/05/19	0,2	12	0,148 c			0,171 c		
25/06/19	0	3,7	0,159 c			0,161 c		
27/06/19	0	0	0,161 c			0,180 c		
03/07/19	0	0	0,108 d			0,166 c		

Les mêmes tendances s'observent en bas de pente. Pour les échantillons de février et mars, avant le débourrement donc, la teneur en eau du sol est supérieure à la teneur en eau à capacité au champ à cet endroit, en surface comme en profondeur. La consommation d'eau semble quasi nulle.

A partir de la fin du mois d'avril, les valeurs de teneur eau diminuent. Entre mars et avril, pour une pluviosité semblable, la teneur en eau du sol passe de 0,255 à 0,161 g/g en surface et de 0,227 à 0,199 g/g en profondeur. La différence est donc plus marquée en surface ici aussi. Avec le débourrement, la surface foliaire augmente, comme les températures.
La teneur en eau en surface entre le 25 juin et le 3 juillet a remarquablement diminué, passant de 0,159 à 0,108 g/g.

Nos résultats révèlent une tendance claire qui s'observe entre les mesures avant et après le débourrement, tant sur le plateau qu'en bas de pente, et qui est davantage marquée en surface qu'en profondeur.

5.1.7 Potentiel matriciel

Aux Figure 5.13 et Figure 5.14 sont représentées les évolutions respectives du potentiel matriciel mesuré par les sondes TEROS 21 et de la hauteur de précipitation, en haut et en bas de pente pour les mois de mai et juin. La valeur moyenne de la tension mesurée par les trois sondes est indiquée sur les graphiques, avec l'écart-type correspondant. Les graphiques reprenant les mesures des trois sondes non moyennées se trouvent à l'annexe 1. La pluviosité horaire est également reprise pour cette période. La tension est exprimée en kPa. Pour rappel, les valeurs de tension de 10, 20 et 33 kPa correspondent à des valeurs de pF de 2, 2.3 et 2.5, respectivement. Relier les valeurs de tension à celles de la teneur en eau n'est possible que si la courbe de rétention en eau est connue, ce qui n'est pas le cas ici. Cependant pour un même sol, une tension plus négative indique une teneur en eau plus faible.

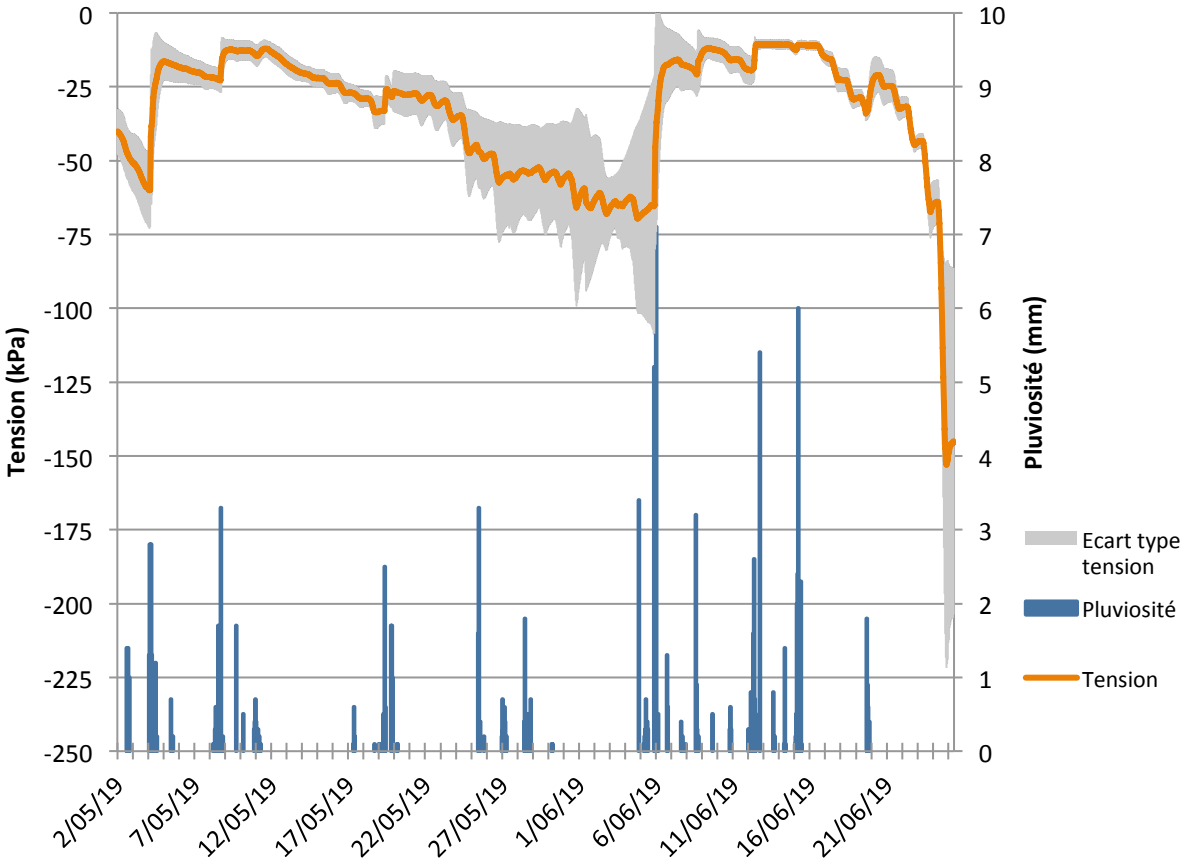


Figure 5.13 - Évolution du potentiel matriciel et de la pluviosité au Château de Bousval en haut de pente

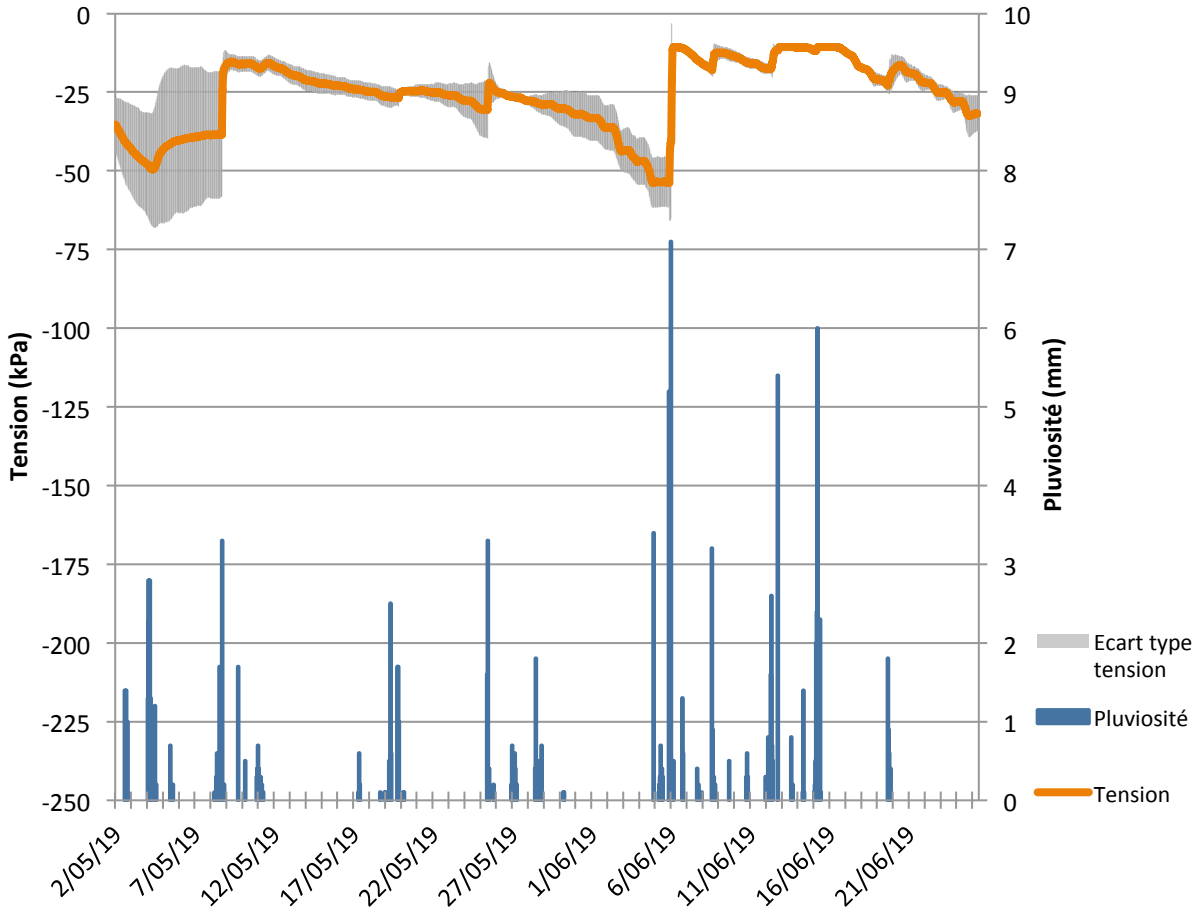


Figure 5.14 - Évolution du potentiel matriciel et de la pluviosité au Château de Bousval en bas de pente

Sans surprise, la tension croît suite aux pluies importantes. Pour les deux sites, l'évolution de la tension moyenne est semblable. La tension reste assez élevée, proche de la valeur de la capacité au champ (généralement entre 10 et 33 kPa) indiquant une réserve en eau utile peu utilisée. A la fin des mesures, entre le 20 et le 25 juin, les températures étaient fort élevées (voir point suivant) et les dernières pluies dataient du 19 juin. Pendant cette période, la tension chute fortement sur le site en haut de pente alors qu'elle ne diminue que modérément en bas de pente.

5.1.8 Température du sol

Les sondes TEROS 21 installées pour mesurer le potentiel matriciel mesurent aussi la température du sol à 10 - 15 cm de la surface. La Figure 5.15 montre l'évolution de cette température sur les deux sites du Château de Bousval, en haut de pente et bas de pente.

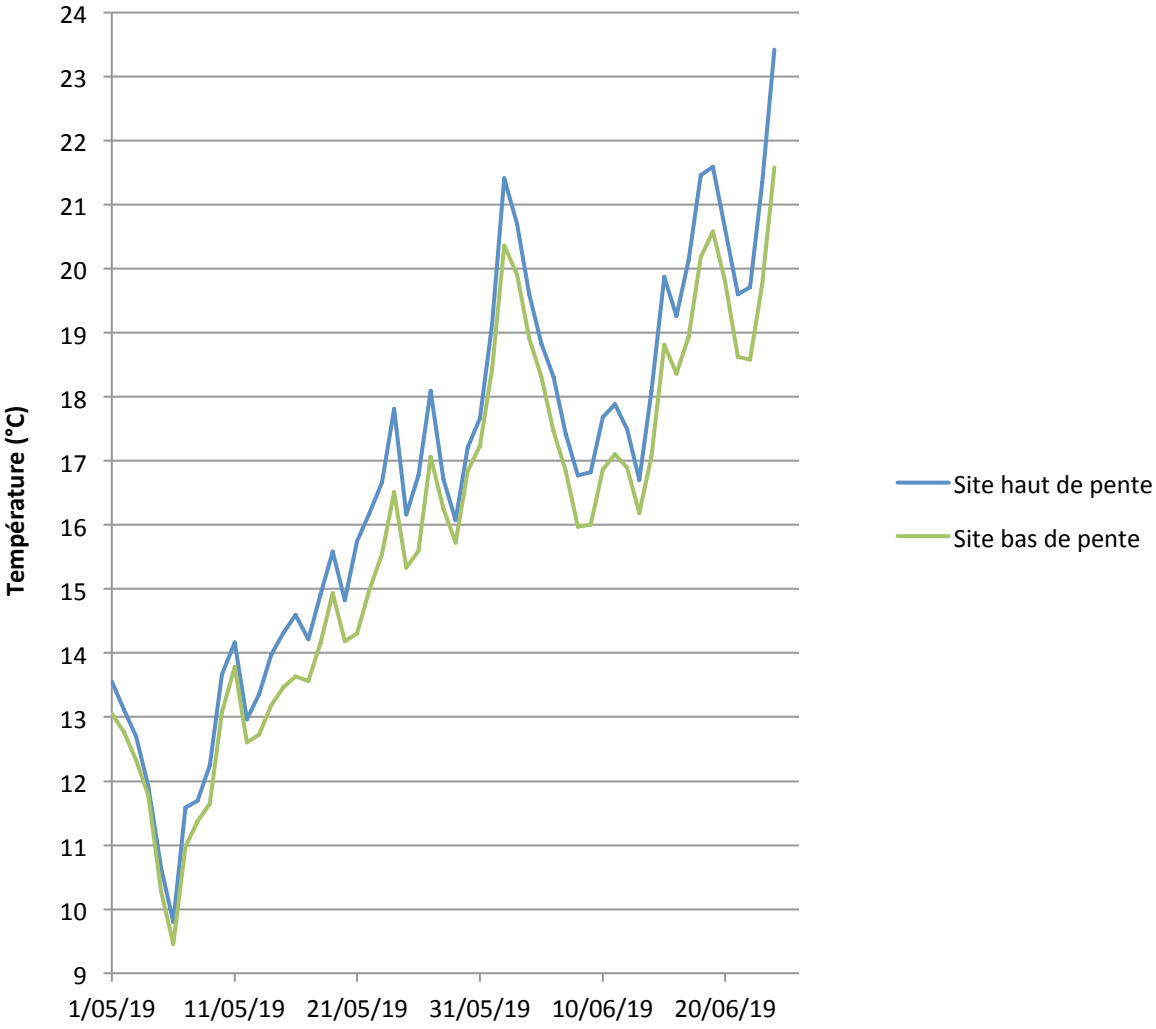


Figure 5.15 - Évolution de la température à 15 cm de profondeur entre le 1er mai et le 25 juin au Château de Bousval

La température est systématiquement plus élevée sur le site en haut de pente, parfois avec 1 degré de différence.

5.2 Domaine W

5.2.1 Granulométrie

L'analyse texturale pour les échantillons de surface et en profondeur du Domaine W est présentée dans le Tableau 5.6 et représentée dans le triangle textural à la Figure 5.16.

Tableau 5.6 - Texture des échantillons du Domaine W

	Sable (500-2000 μm) %	Limon grossier (20-500 μm) %	Limon fin (2-20 μm) %	Argile (0-2 μm) %
Ws	23,73	38,48	20,89	16,91
Wp	37,02	24,73	16,91	21,34

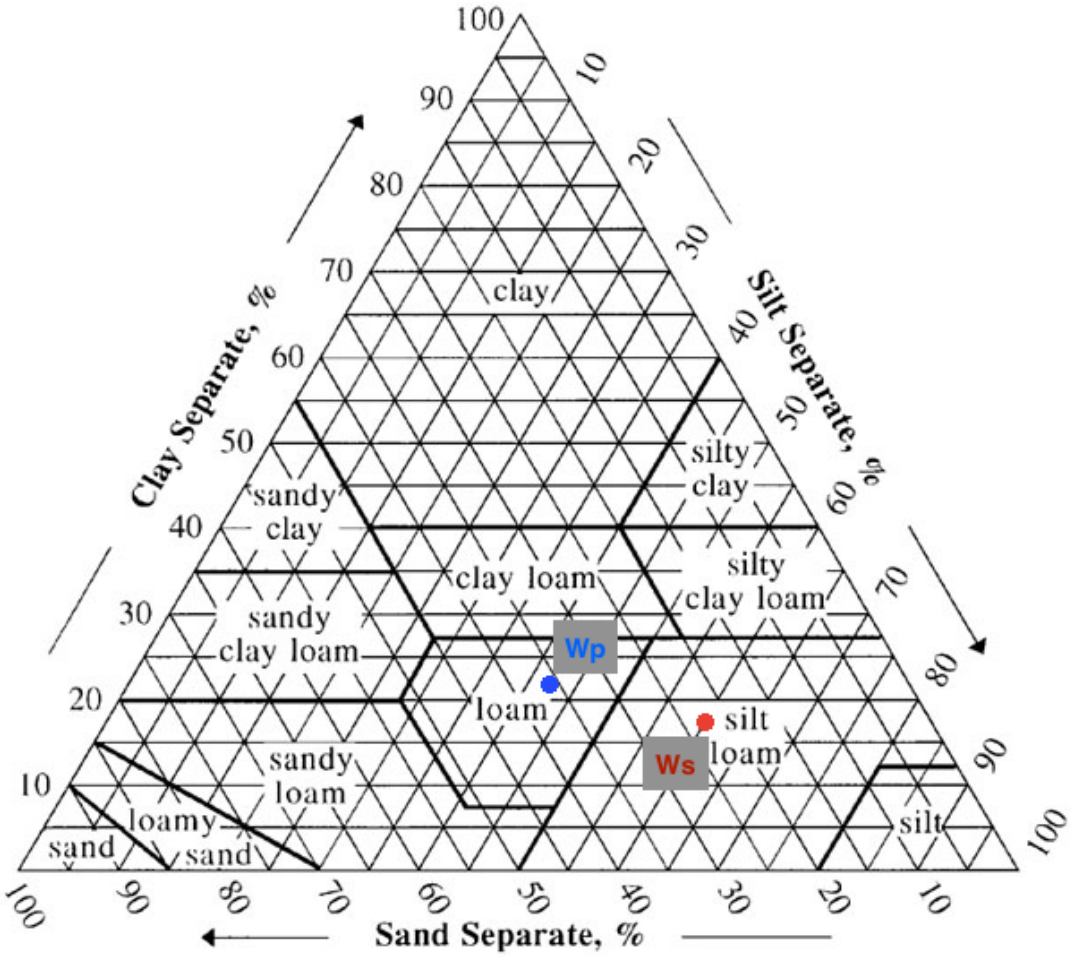


Figure 5.16 - Triangle textural pour les échantillons du Domaine W

Les teneurs en argile et en de sable sont plus élevées en profondeur qu'en surface, au détriment du limon.

5.2.2 Densité apparente

Le Tableau 5.7 reprend les valeurs moyennes de la densité apparente pour les échantillons de surface et de profondeur au Domaine W.

Tableau 5.7 - Valeurs moyennes de la densité apparente et écarts-types pour les échantillons du Domaine W

	ρ_a moyenne (g/cm^3)	Écart-type
Ws	1,4050 a	0,0422
Wp	1,4808 b	0,0267

La densité apparente diffère significativement : elle est plus élevée en profondeur qu'en surface, ce qui est cohérent avec l'évolution de la texture.

5.2.3 Teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, réserve en eau utile

Dans le Tableau 5.8 sont indiquées les teneurs en eau massique à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Elles sont également représentées en graphique à la Figure 5.17.

Tableau 5.8 - Valeurs moyennes de la teneur en eau massique pour les échantillons du Domaine W

	Teneur en eau massique à capacité au champ (g/g)	Teneur en eau massique au point de flétrissement permanent (g/g)
Ws	0,2429 a	0,1045 a
Wp	0,2250 b	0,1465 b

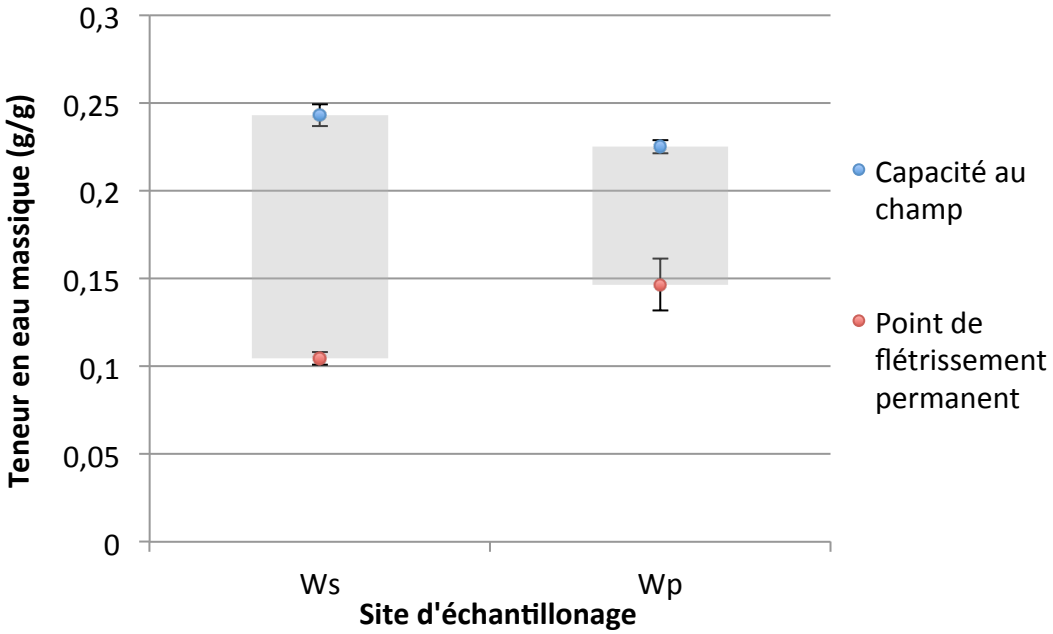


Figure 5.17 - Teneur en eau massique $(\bar{x} \pm \sigma)$ pour les différents échantillons du Domaine W

La teneur en eau à la capacité au champ est légèrement inférieure en profondeur et la teneur en eau au point de flétrissement permanent est supérieure en profondeur amenant une réserve en eau utile moindre en profondeur qu'en surface. Cela s'observe également à la Figure 5.18.

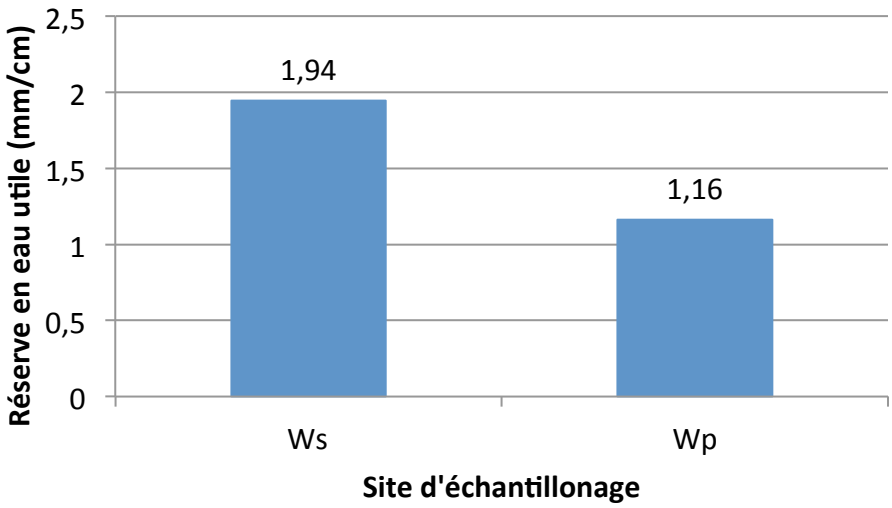


Figure 5.18 - Réserve en eau utile pour les différents sites d'échantillonnage du Domaine W

Cette réserve en eau utile plus importante en surface est cohérente avec le contenu plus élevé en limon et donc une plus grande mésoporosité en surface qu'en profondeur.

5.2.4 Teneur en eau

Les teneurs en eau massique obtenues par échantillonnage et pesées frais et secs sont indiquées dans le Tableau 5.9 pour les différentes dates d'échantillonnage. La pluviosité en mm est aussi renseignée pour les deux et sept jours précédant l'échantillonnage.

Tableau 5.9 - Teneur en eau par échantillonnage au Domaine W

			s (0-15cm)			p (40-55cm)		
Date	Pluie J-2 (mm)	Pluie J-7 (mm)	Teneur eau (g/g)	Teneur eau à CC (g/g)	Teneur eau à PFP (g/g)	Teneur eau (g/g)	Teneur eau à CC (g/g)	Teneur eau à PFP (g/g)
6/03/19	9	19,2	0,279 a	0,243	0,104	0,238 a	0,225	0,147
9/04/19	3,5	15,1	0,256 b			0,218 b		
30/04/19	2,7	13,1	0,187 c			0,212 b		
31/05/19	0,3	13,6	0,143 d			0,181 c		
25/06/19	0	6,4	0,177 c			0,197 d		
27/06/19	0	0	0,155 d			0,185 c		
03/07/19	0	0	0,121 e			0,201 d		

Pour la première date, début mars, la teneur en eau est supérieure à la teneur en eau à la capacité au champ. La pluie pendant les deux derniers jours est importante, rechargeant la macroporosité du sol. A cette période, la vigne est toujours en dormance et les températures assez faibles. L'évapotranspiration est faible également.

Pour les deux dates du mois d'avril, le cumul des pluies des deux et sept jours précédant l'échantillonnage est semblable. Cependant, la teneur en eau en surface le 30 avril (0,187 g/g) est nettement inférieure à la teneur en eau en surface le 9 avril (0,256 g/g). Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs. D'abord, le débourrement du vignoble ayant eu lieu entre ces deux dates, la croissance et le développement de la surface foliaire de la vigne génèrent une consommation d'eau accrue. Ensuite, la température moyenne des sept jours précédents l'échantillonnage est de 8,5°C pour le 9 avril et de 11,2°C pour le 30 avril. Le développement du couvert herbacé contribue aussi à l'évapotranspiration du couvert.
Il n'y a pas de différence notable de la teneur en eau en profondeur entre ces deux dates, soulignant le fait que c'est en surface, probablement par l'enherbement, qu'une différence au niveau des teneurs en eau se crée.

Ensuite, en mai et juin, la teneur en eau en surface est nettement inférieure aux teneurs en eau observées jusque-là, se rapprochant davantage de la teneur en eau au point de flétrissement permanent que de la teneur en eau à la capacité au champ. La réserve en eau du sol était donc bien entamée. Il n'a presque pas plu les deux jours précédant l'échantillonnage. La période d'échantillonnages était proche de la floraison, alors que la vigne a une croissance foliaire importante et donc un besoin en eau élevé.
Entre le 25 juin et le 3 juillet (précipitations nulles et température supérieure à 30°C pendant plusieurs jours consécutifs), la teneur en eau en surface a diminué considérablement, se rapprochant de la teneur en eau au point de flétrissement permanent.

En profondeur, la teneur en eau a globalement diminué entre le début et la fin de l'échantillonnage mais la diminution est moins marquée qu'en surface et plus lente.

5.2.5 Potentiel matriciel

L'évolution du potentiel matriciel (moyenne avec écart-type) entre le 2 mai et le 17 juin et la pluviosité horaire sur cette période est présentée à la Figure 5.19. Le graphique des mesures des trois sondes se trouvent à l'annexe 1.

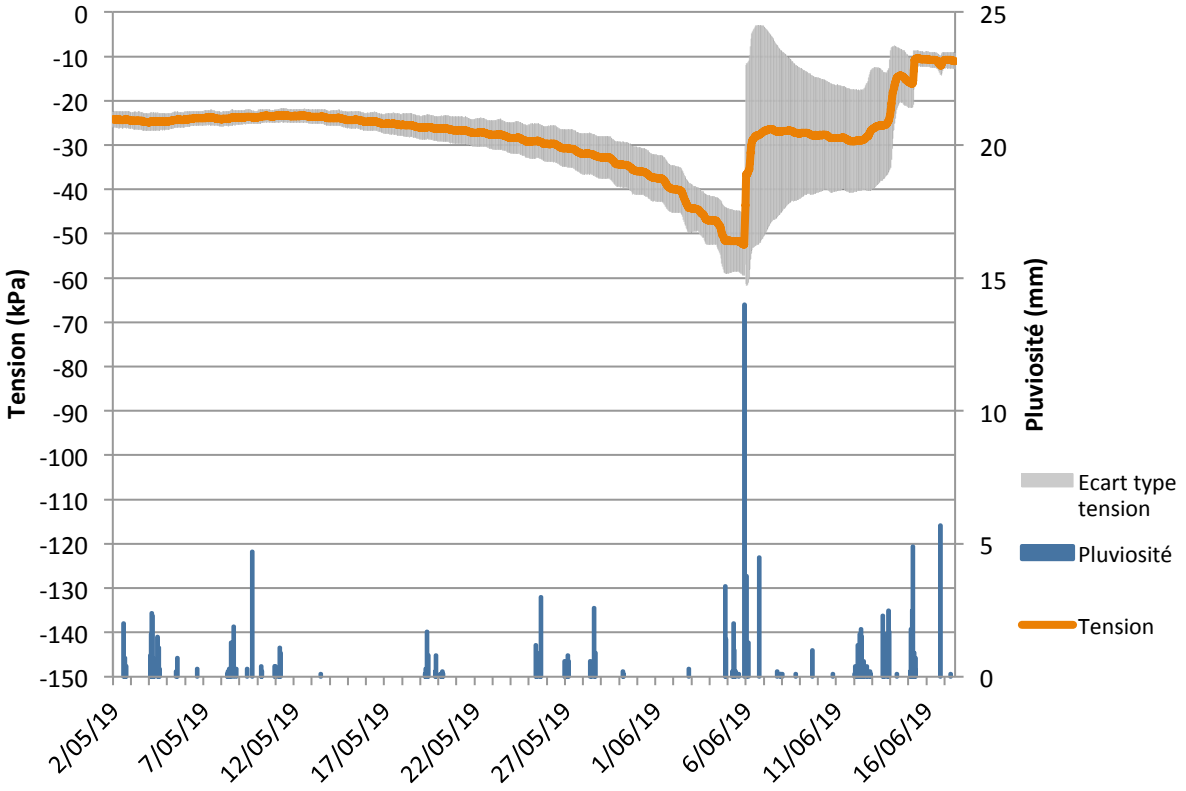


Figure 5.19 - Évolution du potentiel matriciel et de la pluviosité au Domaine W

Les valeurs de tension jusqu'au 6 juin sont étonnantes. La tension ne fait pratiquement que diminuer lentement et ne semble pas répondre aux précipitations. La tension remonte seulement lors de la pluie de 14 mm en une heure du 6 juin. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette situation. Tout d'abord, il est possible qu'un temps d'équilibration relativement long soit nécessaire entre la sonde et le sol. Ensuite, la position horizontale des sondes dans le sol peut créer une zone sous le capteur qui est sèche et qui ne s'humidifie que lors de pluies importantes comme celle du 6 juin. Cependant, l'installation est identique dans les deux vignobles et les sondes au Château de Bousval n'ont pas eu ce genre de problème. Il est également possible que pendant les pluies du mois de mai, qui n'ont jamais excédé plus de 5 mm en une heure, l'humidité n'atteignait pas les sondes à 15 cm mais restait en surface.

5.2.6 Température du sol

La Figure 5.20 illustre l'évolution de la température à 15 cm de profondeur.

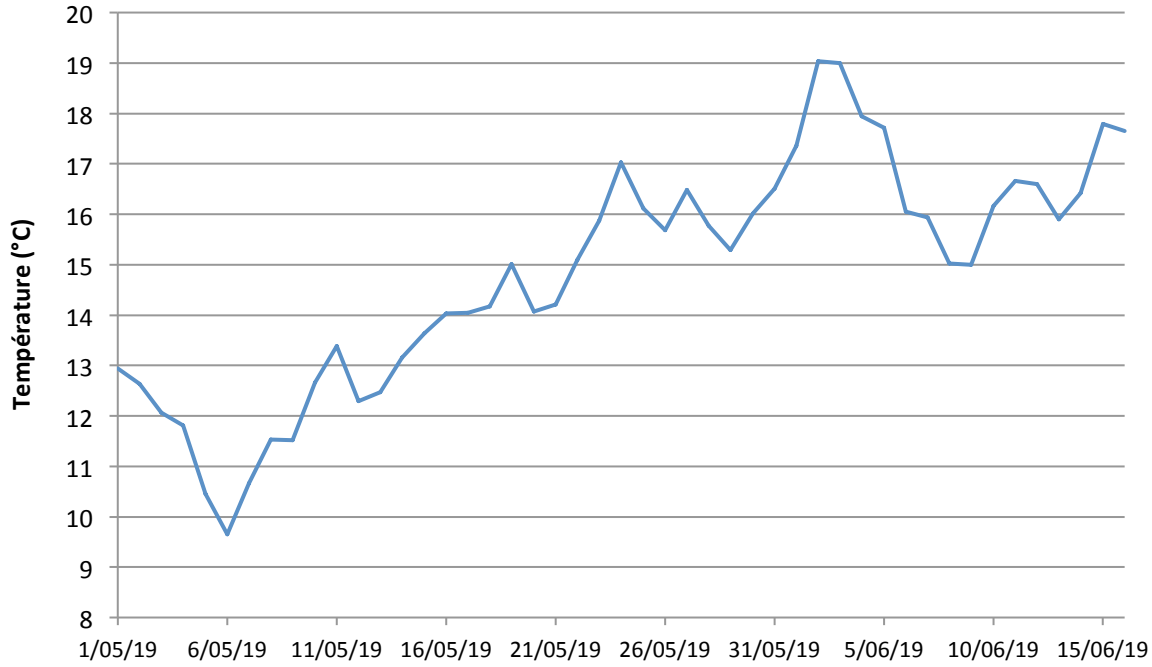


Figure 5.20 - Évolution de la température à 15 cm de profondeur entre le 1er mai et le 16 juin au Domaine W

Sans surprise, la température du sol augmente de mai à juin, de manière semblable à celle observée à Bousval. Cependant, la température est légèrement plus élevée à Bousval, surtout par rapport au site en haut de pente et pour les minimas et maximas avec des différences jusque 2°C.

6. Discussion

Le chapitre des résultats a mis en exergue de grandes différences entre des deux parcelles étudiées. Dans ce chapitre, la distribution des sols au sein de chaque vignoble sera d'abord étudiée avant de comparer ces sols au niveau de leur texture et de leur densité apparente. Ensuite, la question de la teneur en eau dans les sols sera approfondie, tout en analysant les résultats du potentiel matriciel. Enfin, l'efficacité de l'enherbement pour induire une contrainte hydrique sera étudiée et comparée pour chacun des vignobles.

6.1 Distribution et type de sols

Au Château de Bousval, des disparités s'observent entre le plateau et le bas de pente, de par la topographie. Celle-ci amène un épaississement de la couche de limon en bas de pente. Cela a été confirmé par des sondages et a pu s'observer sur la carte de la Figure 5.2 où apparaît clairement une zone sur le plateau où le sable apparaît dans le premier mètre de profondeur. Ce phénomène a des répercussions sur la vigne avec un poids de sarments coupés lors de la taille par ceps nettement inférieur en moyenne sur le plateau. La vigne y est moins vigoureuse. Au-delà des répercussions sur la vigne, la topographie influence les caractéristiques du sol telles que sa texture ou sa densité apparente et amène des différences entre le plateau et le bas de pente.
Au Domaine W, la topographie étant plane, peu de disparités sont observées sur la parcelle.

Cependant, bien que les sols de ces deux vignobles soient tous deux situés dans la ceinture des sols limoneux développés sur loess, de larges différences s'observent.

Concernant la granulométrie, les horizons profonds des sols des deux vignobles sont similaires : la classe texture y est de type « loam » sauf pour le sable bruxellien et l'échantillon en profondeur sur le plateau au vignoble du Château de Bousval. Globalement il s'agit donc de sols limoneux (30-50% de limon) avec une teneur en sable non négligeable, de 30 à 50%, et une teneur en argile assez faible, avoisinant les 20%.
En surface, quelques différences s'observent. Au Domaine W, la texture en surface atteint les 60% de limon, plus qu'en profondeur donc, alors qu'au Château de Bousval, la teneur en limon en surface n'excède pas les 46% et augmente avec la profondeur.

Concernant la densité apparente, elle est globalement plus élevée au Château de Bousval, avec des valeurs allant 1,51 à 1,66 g/cm^3 alors qu'au Domaine W, la densité apparente en surface est de 1,405 g/cm^3 et de 1,48 g/cm^3 en profondeur. Dans les deux vignobles, elle augmente avec la profondeur, l'échantillon de surface a toujours une densité apparente inférieure à celle de l'échantillon pris en profondeur pour un même site. Les valeurs de densité apparente mesurées ainsi que les valeurs typiques de densité apparente (USDA, sans

date) en fonction de la classe texturale selon la classification USDA sont indiquées sur le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 - Densité apparente mesurée et valeur typique de densité apparente en fonction de la classe texturale

Vignoble	Échantillons	ρ_a moyenne (g/cm^3)	Classification USDA	Valeur typique de ρ_a selon la classe texturale (g/cm^3)
Château de Bousval	SAB	1,5921	Sand	1,60 – 1,70
	HPs	1,6263	Loam	1,45 – 1,55
	HPp	1,6568	Sandy loam	1,50 – 1,60
	MPs	1,5785	Loam	1,45 – 1,55
	MPp	1,5932	Loam	1,45 – 1,55
	BPs	1,5080	Loam	1,45 – 1,55
	BPp	1,5950	Loam	1,45 – 1,55
Domaine W	Ws	1,4050	Silt loam	1,45 – 1,55
	Wp	1,4808	Loam	1,45 – 1,55

Il apparaît qu'au Château de Bousval, sauf pour les échantillons SAB et BPs, les valeurs mesurées sont au-dessus des valeurs typiques pour cette classe texturale. La valeur moyenne de densité apparente mesurée lors d'un travail précédent dans ce vignoble qui est de 1,55 g/cm^3 (Sosnowski, 2018), est cohérente avec les valeurs de densité apparente mesurées dans ce présent travail. Le passé cultural du vignoble (maïs) ainsi que les passages répétés d'engins agricoles susceptibles de causer compaction peuvent fournir des éléments de réponses pour expliquer ces valeurs relativement élevées.

Au Domaine W, en surface, la valeur mesurée est inférieure à la gamme de valeurs typiques pour ce type de sol. En profondeur, la valeur mesurée est dans la gamme attendue. L'enherbement en surface amène de la matière organique et des fines racines dans les premiers centimètres du sol, pouvant générer une diminution de la densité apparente. D'autres études ont montré que la densité apparente du sol diminue en surface sous enherbement (Morlat et Venin, 1981).

Les sites en bas de pente au Château de Bousval et au Domaine W peuvent être comparés plus facilement car semblables. Les deux sont situés sur une topographie relativement plane, avec un sol limoneux profond.

6.2 Réserve en eau utile et teneur en eau

Les données de teneur en eau à la capacité au champ, au point de flétrissement permanent et la réserve en eau utile mesurées dans le cadre de ce travail sont comparées à la littérature dans le Tableau 6.2. Jamagne et al. (1977) ont publié pour la première fois un tableau de correspondance entre la classe texturale et les teneurs en eau massiques à la capacité au champ et au point de flétrissement. La densité apparente renseignée permet la conversion

en teneur en eau volumique et donc le calcul de la réserve en eau utile en mm/cm de sol. Ce travail est demeuré longtemps une référence car aucun autre jeu de données n'était disponible jusqu'au début des années 2000 (Bruand *et al.*, 1996). Les classes texturales utilisées par Jamagne et al. (1977) sont celles du triangle de l'Aisne et sont renseignées dans le tableau ci-dessous pour chacun de nos échantillons. Les teneurs en eau à la capacité au champ, au point de flétrissement et la réserve en eau utile de Jamagne et al. (1977) sont notées JAM dans le Tableau 6.2.

Tableau 6.2 - Comparaison des teneurs en eau mesurées à celles proposées par Jamagne et al. (1977)

Site	Classe texturale triangle de l'Aisne		Humidité à CC JAM (g/g)	Humidité à CC mesurée (g/g)	Humidité à PFP JAM (g/g)	Humidité à PFP mesurée (g/g)	ρ_a JAM (g/cm^3)	ρ_a mesurée (g/cm^3)	REU JAM (mm/cm)	REU mesurée (mm/cm)
SAB	S	Sable	0,08	0,0733	0,03	0,0165	1,35	1,5921	0,70	0,92
HPs	LSA	Limon sablo-argileux	0,22	0,1876	0,11	0,1251	1,50	1,6263	1,65	1,04
HPp	S	Sable	0,08	0,1850	0,03	0,0727	1,35	1,6568	0,70	1,79
MPs	LS	Limon sableux	0,19	0,2020	0,09	0,0929	1,45	1,5785	1,45	1,72
MPp	LSA	Limon sablo-argileux	0,22	0,1832	0,11	0,1124	1,50	1,5932	1,65	1,13
BPs	LS	Limon sableux	0,19	0,2384	0,09	0,1083	1,45	1,5080	1,45	1,96
BPp	LAS	Limon argilo-sableux	0,24	0,2073	0,12	0,1174	1,45	1,5950	1,75	1,43
Ws	LMS	Limon moyen sableux	0,20	0,2429	0,09	0,1045	1,45	1,4050	1,60	1,94
Wp	LSA	Limon sablo-argileux	0,22	0,2250	0,11	0,1465	1,50	1,4808	1,65	1,16

Les teneurs en eau mesurées, surtout pour le point de flétrissement, sont assez proches de celles proposées par Jamagne et al. (1977), mais s'écartent davantage pour la réserve en eau utile. Cela est lié entre autres à des différences de densité apparente. La granulométrie à elle seule n'est pas suffisante pour estimer correctement les propriétés de rétention en eau. Pour une même classe texturale, de grandes variations de rétention sont observées en fonction de la densité apparente (Bruand et al., 1996). De plus, Jamagne et al. (1977) ont estimé la teneur en eau à la capacité au champ avec la teneur en eau à pF 2 alors qu'un pF 2,5 a été utilisé dans le cadre de ce travail. La teneur en eau à pF 2 est plus élevée qu'à pF 2,5 et la réserve en eau utile est donc également supérieure.

Bruand et al. (2004) proposent, à partir d'une base de données, une estimation des propriétés de rétention en eau selon trois critères : la texture, le type d'horizon (horizon A ou horizons E, B et C) et la densité apparente. Les classes texturales sont également celles du triangle de l'Aisne. Les échantillons de surface sont considérés comme des horizons A dans la classification de Bruand et al. (2004) et la densité apparente choisie était celle se

rapprochant le plus de la densité mesurée. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 6.3 avec l'abréviation « BRU » pour les données de Bruand et al (2004).

Tableau 6.3 - Comparaison des teneurs en eau mesurées avec celles proposées par Bruand et al. (2004)

Site	Classe texturale triangle de l'Aisne		Humidité à CC BRU (g/g)	Humidité à CC mesurée (g/g)	Humidité à PFP BRU (g/g)	Humidité à PFP mesurée (g/g)	ρ_a BRU (g/cm^3)	ρ_a mesurée (g/cm^3)	REU BRU (mm/ cm)	REU mesurée (mm/ cm)
SAB	S	Sable	0,056	0,0733	0,023	0,0165	1,65	1,5921	0,55	0,92
HPs	LSA	Limon sablo-argileux	0,187	0,1876	0,089	0,1251	1,50	1,6263	1,25	1,04
HPp	S	Sable	0,056	0,1850	0,023	0,0727	1,65	1,6568	0,55	1,79
MPs	LS	Limon sableux	0,150	0,2020	0,600	0,0929	1,70	1,5785	1,53	1,72
MPp	LSA	Limon sablo-argileux	0,153	0,1832	0,105	0,1124	1,55	1,5932	0,74	1,13
BPs	LS	Limon sableux	0,150	0,2384	0,061	0,1083	1,70	1,5080	1,54	1,96
BPp	LAS	Limon argilo-sableux	0,173	0,2073	0,108	0,1174	1,55	1,5950	1,02	1,43
Ws	LMS	Limon moyen sableux	0,181	0,2429	0,072	0,1045	1,50	1,4050	1,64	1,94
Wp	LSA	Limon sablo-argileux	0,153	0,2250	0,105	0,1465	1,55	1,4808	0,74	1,16

Les teneurs en eau proposées par Bruand et al. (2004) sont toujours inférieures à celles mesurées et la réserve en eau utile est souvent inférieure mais pas systématiquement.

Les deux tableaux ci-dessous mettent en avant le fait que, bien que les valeurs estimées et mesurées diffèrent légèrement, les propriétés de rétention en eau sont cohérentes avec l'analyse granulométrique pour tous les échantillons sauf HPp. En effet, au Château de Bousval en profondeur sur le haut de pente, de grandes différences sont observées entre les valeurs mesurées et estimées. La valeur de teneur en eau mesurée est très largement supérieure à celle estimée autant par Jamagne et al. (1977) que par Bruand et al. (2004). La teneur en eau à la capacité au champ est proche de celle mesurée en surface, pour un échantillon du type limon sablo-argileux. Comme cela avait déjà été mentionné au point 5.1.5, l'échantillon pris pour la granulométrie et pour mesurer la teneur en eau au point de flétrissement permanent est un échantillon déstructuré qui a été probablement prélevé dans une « transition » limon-sable. L'échantillon pour mesurer la teneur en eau à la capacité au champ est un kopecki probablement été prélevé dans la couche de limon. La profondeur de la couche de limon varie à quelques dizaines de centimètres et cela explique pourquoi pour un même site de prélèvement, des différences de texture amenant des différences de rétention d'eau peuvent être observées.

L'humidité à la capacité au champ est difficile à mesurer directement sur le terrain et est estimée en laboratoire en appliquant une pression afin de déplacer l'eau jusqu'à atteindre un équilibre qui doit en théorie correspondre à la capacité au champ. Pendant longtemps, cette pression a été estimée à 1 bar soit un pF de 3. Cependant cette pression n'est pas unique et est souvent remise en question (Baize, 2018). Dans ce travail, un pF 2,5 a été appliqué pour s'approcher de la teneur en eau à la capacité au champ, aussi remis en question. La Figure 6.1 publiée par Bruand et al (1996) compare la teneur en eau à la capacité au champ (W_{CC}), d'échantillons prélevés directement sur le terrain et la teneur en eau après avoir appliqué une pression d'un pF de 2,5 ($W_{2,5}$) pour différents types de texture.

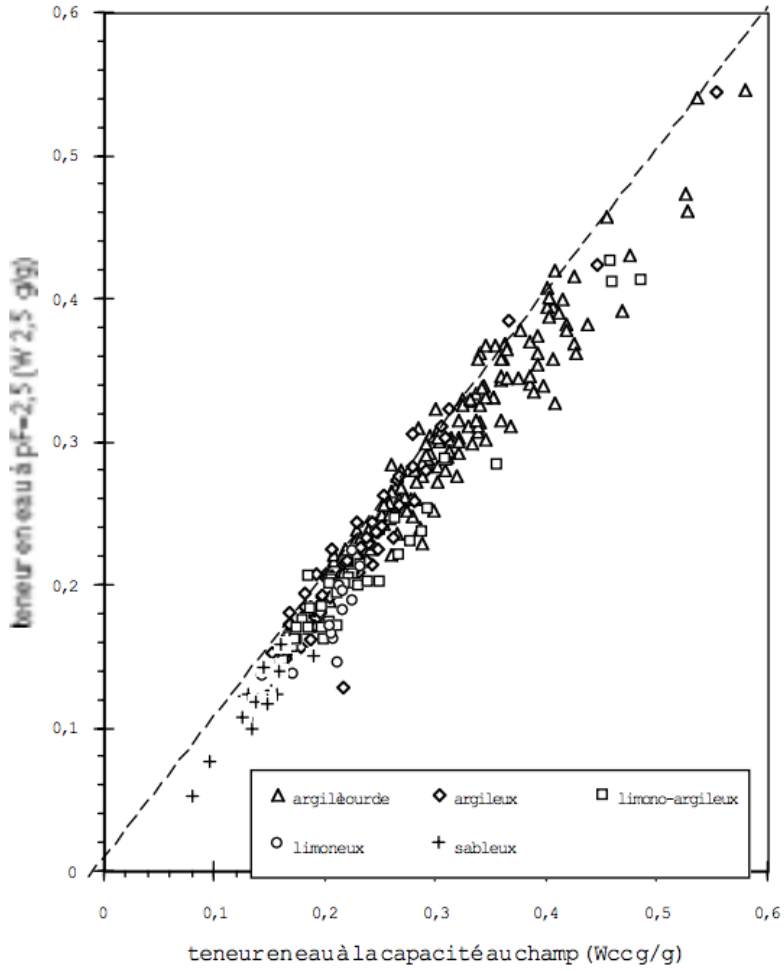


Figure 6.1 - Valeur de teneur en eau à la capacité au champ et à pF 2,5 (Bruand *et al.*, 1996)

La teneur en eau à la capacité au champ est proche de celle à pF 2,5 mais légèrement supérieure, pour tout type de texture. Les écart quadriques moyens (EQM) sont calculés pour chaque classe texturale selon la formule suivante :

$$EQM = \frac{\left[\sum(W_{CC} - W_{2,5})^2\right]}{(n-1)}$$

avec n le nombre d'horizons étudiés.

Les valeurs des EQM varient de $0{,}29.10^{-3}$ à $1{,}02.10^{-3}$ g^2/g^2 avec les valeurs les plus élevés pour des horizons de type limono-argileux (LA, LAS, LSA) et limoneux (LM, LMS). Ensuite les

EQM, toutes textures confondues, ont été calculés avec une formule analogue pour des valeurs de pF de 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 et 3.0. Ces résultats sont présentés à la Figure 6.2 (Bruand *et al.*, 1996)

Potentiel matriciel (hPa)		EQM (g^2/g^2)	Nombre d'horizons
-10	pF = 1,0	$1,15\ 10^{-3}$	91
-33	pF = 1,5	$0,43\ 10^{-3}$	74
-100	pF = 2,0	$0,25\ 10^{-3}$	48
-330	pF = 2,5	$0,50\ 10^{-3}$	212
-1000	pF = 3,0	$1,31\ 10^{-3}$	104

Figure 6.2 - Écarts quadratiques moyens entre la teneur en eau à la capacité au champ et au potentiel matriciel de -10, -30, -100, -330 et -1000hPa (Bruand *et al.*, 1996)

Il apparaît que la teneur en eau à la capacité au champ est la plus proche de celle déterminée avec un pF = 2,0. Ces comparaisons permettent de montrer que la teneur en eau à la capacité au champ est généralement comprise entre la teneur en eau au pF = 1,5 et au pF = 2,0 (Bruand *et al.*, 2004).
Bruand et al. (2004) ont estimé des valeurs de teneur en eau à sept potentiels de l'eau dont à pF 2,0 et pF 2,5. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 6.4 avec la REU associée.

Tableau 6.4 - Comparaison des teneurs en eau à pF 2,5 et pF 2,0 de Bruand et al. (2004)

Classe texturale triangle de l'Aisne		Humidité pF 2,5 (g/g)	Humidité pF 2,0 (g/g)	Augmen-tation (%)	REU pF 2,5 (mm/cm)	REU pF 2,0 (mm/cm)	Augmen-tation (%)
S	Sable	0,056	0,078	39,3	0,55	0,91	65,5
LS	Limon sableux	0,150	0,161	7,3	1,53	1,70	11,1
LSA	Limon sablo-argileux	0,153	0,175	14,4	0,74	1,09	46,3
LAS	Limon argilo-sableux	0,173	0,201	16,2	1,02	1,44	41,2
LMS	Limon moyen sableux	0,181	0,20	10,5	1,64	1,92	17,1

La teneur en eau entre le pF 2,5 et le pF 2,0 augmente entre 7 et 39% et la réserve en eau utile augmente entre 11 et 65% en fonction de la texture.
Les réserves en eau utile des sols des deux vignobles qui ont été mesurées sont déjà importantes (sauf pour le sable) et le sont probablement davantage en considérant que le pF de la capacité au champ est plutôt 2,0 que 2,5.

Bien qu'en théorie, il y a de l'eau disponible pour la plante jusqu'à la teneur en eau du point de flétrissement, le prélèvement d'eau par la plante diminue ou s'arrête avant cette teneur

en eau critique. C'est pourquoi la notion de réserve en eau facilement utilisable (RFU) est utilisée. Il est difficile d'estimer cette RFU, des formules simplistes existes telles que : RFU = 1/2 ou 2/3 de REU mais sont peu précises. Il est préférable de déterminer cette valeur en champ après observation (Baize, 2018). Dans un rapport de la FAO, la RFU est calculée de la manière suivante : RFU = p.REU avec p un coefficient de déplétion variant selon les espèces. Pour la vigne, il est estimé à 0,45 (Allen *et al.*, 1998).

De plus, la réserve en eau utile est exprimé en mm par cm de sol et est donc dépendante de la profondeur de celui-ci. Une REU en mm/cm importante sur un sol peu profond peut amener à contraindre la vigne. Dans le même rapport de la FAO, la profondeur maximum des racines des vignes est généralement entre 1 et 2 m (Allen *et al.*, 1998). Bien que certaines racines puissent aller jusqu'à 6 m de profondeur et plus (Seguin, 1972), la majorité des racines se situent dans le premier mètre de profondeur (Richards, 1983). Au Château de Bousval en haut de pente, le sable affleure à certains endroits déjà à 30 cm (voir section 5.1.1). La REU du sable étant très faible, les vignes ne peuvent puiser de l'eau principalement que sur les 30 premiers cm. Sur le premier mètre de profondeur, on a en haut de pente une réserve de 96 mm (en prenant la REU de HPs pour les 30 premiers cm et de SAB pour les 70 suivants) alors qu'en bas de pente, elle est de 156 mm (en prenant la REU de BPs pour les 25 premiers cm et de BPp pour les 75 suivants). Les vignes sur le haut de pente ont plus de chance d'être soumises à une contrainte hydrique car le premier mètre de profondeur est souvent composé en partie de sable, à la réserve en eau utile faible. En année sèche, ou plus précisément en cas de sécheresse pendant la période de maturation, la contrainte pourrait même être convertie en stress, comme ce fut le cas par exemple au cours de l'été 2018.

6.3 Contrainte hydrique et enherbement

Les différents échantillonnages effectués entre février et juillet 2019 dans les deux vignobles (voir section 5.1.6 et 5.2.4) ont montré une diminution marquée de la teneur en eau avant et après le débourrement. Pour évaluer ces teneurs en eau, la notion de « *fraction of transpirable soil water* » (FTSW) sera utilisée. Cette notion sert à évaluer le stress hydrique en tant qu'indicateur du déficit hydrique du sol subi par une plante. Des études montrent que FTSW est pertinent pour évaluer le déficit hydrique subi par la vigne (Pellegrino *et al.*, 2004). Elle est définie comme le ratio de « *available soil water* » (ASW) à un moment donné et de « *transpirable soil water* » (TTSW) d'un sol (Sinclair et Ludlow, 1986). La limite supérieure de ASW est la teneur en eau mesurée au moment de la mesure et celle de TTSW est la teneur en eau à la capacité au champ. La limite inférieure de ASW et TTSW est définie comme la teneur en eau mesurée la plus faible lorsque les plantes sont très sèches et que les feuilles sont soit mortes soit en dormance (Ritchie, 1981). A défaut d'avoir cette valeur, la teneur en eau au point de flétrissement sera utilisée, bien que celle-ci soit inférieure à la limite définie par Ritchie (1981) (Lacape *et al.*, 1998). Les valeurs de FTSW peuvent être interprétées avec les valeurs du Tableau 6.5 (Riou et Payan, 2001).

Tableau 6.5 - Niveau de contrainte hydrique subie par la vigne (Riou et Payan, 2001)

Niveau de contrainte	FTSW (%)
Absence de contrainte	> 40
Contrainte faible	21 – 40
Contrainte modérée	7 -21
Contrainte forte	< 7

Les valeurs du FTWS pour les différents sites et dates d'échantillonnages dans les deux vignobles sont présentées au Tableau 6.6. Lorsque la teneur en eau mesurée est plus élevée que celle à la capacité au champ, le FTSW est de 100% et lorsque la teneur en eau mesurée est inférieure à la teneur en eau au point de flétrissement, le FTSW est de 0%.

Tableau 6.6 - Valeur du FTSW aux dates d'échantillonnages au Château de Bousval et au Domaine W

Château de Bousval				
Date	HPs	Sab	BPs	BPp
25/02/19	97%	100%	92%	100%
11/03/19	100%	100%	100%	100%
23/03/19	100%	100%	100%	100%
30/04/19	0%	97%	40%	86%
31/05/19	0%	81%	30%	53%
25/06/19	0%	92%	39%	42%
27/06/19	0%	62%	40%	63%
03/07/10	0%	54%	0%	47%

Domaine W		
Date	Ws	Wp
6/03/19	100%	100%
9/04/19	100%	91%
30/04/19	60%	84%
31/05/19	28%	44%
25/06/19	52%	64%
27/06/19	36%	49%
3/07/19	12%	69%

La transition entre les teneurs en eau avant et après débourrement apparait clairement avec des FTSW de 100% ou proches de ce seuil avant la mi-avril, indiquant que la teneur en eau du sol est proche de celle de la capacité au champ. A partir de l'échantillonnage du 30 avril, des contraintes apparaissent.

- Au Château de Bousval, sur le haut de pente en surface, la teneur en eau étant systématiquement inférieure à la teneur en eau du point de flétrissement permanent, la contrainte est considérée comme forte. À cet endroit, les températures étaient plus élevées que dans le bas de pente (voir section 5.1.8). Cela accroît l'évapotranspiration du couvert plus importante et donc une consommation d'eau plus élevée. En profondeur dans le sable, la contrainte est absente mais les teneurs en eau restent très faibles étant donné la texture sableuse. Les vignes ont donc une réserve en eau assez faible à leur disposition pour se développer et sont donc bien soumises à une contrainte hydrique, surtout là où le sable affleure davantage. Cela corrobore les résultats de vigueur lors de

la pesée des sarments (voir section 5.1.2) indiquant que les vignes du haut de pente sont moins vigoureuses que celles du bas de pente.

- Au Château de Bousval, sur le bas de pente, la contrainte est également plus marquée en surface avec une contrainte faible pour les échantillonnages entre le 30 avril et le 27 juin et une contrainte forte lors du dernier échantillonnage du 3 juillet pendant la canicule de ce début d'été. En profondeur, le FTSW diminue à partir du débourrement mais il n'y a pas de contrainte.
- Au Domaine W, la situation est comparable avec le site en bas de pente du Château de Bousval : une contrainte faible en surface à partir du débourrement et une absence de contrainte en profondeur.

Comme expliqué dans le chapitre 5, entre l'échantillonnage du 25 juin et du 3 juillet, il n'a pas plu dans les deux vignobles et les températures étaient exceptionnellement élevées. Aux trois sites d'échantillonnage, la teneur en eau en surface est significativement différente entre les deux dates mais pas en profondeur. Au Château de Bousval en haut de pente, elle diminue de 0,113 à 0,074 g/g soit une diminution de 35%. En bas de pente, la teneur en eau en surface diminue de 0,159 à 0,108 g/g soit une diminution de 32%. Au Domaine W, elle diminue de 0,177 à 0,121 g/g soit une diminution de 32% également. La diminution étant légèrement plus importante en haut de pente, alors que les valeurs absolues de teneur en eau y sont considérablement plus faibles que sur les deux autres sites, ce site est plus propice à une évapotranspiration plus importante et à la création d'une contrainte hydrique. L'absence de diminution de la teneur en eau en profondeur entre le 25 juin et le 3 juillet met en exergue un effet tampon de la profondeur par rapport à la surface, où des variations plus importantes sont attendues.

Les résultats de mesure du potentiel matriciel ne permettent pas de connaître la teneur en eau du sol au moment de la mesure, mais pour un même sol, un potentiel plus faible indique une teneur en eau plus faible. Au Château de Bousval l'horizon de surface étant comparable en haut et bas de pente, il convient de comparer les valeurs de potentiel matriciel. Celles-ci suivent globalement la même tendance avec des valeurs moyennes comprises entre -15 et -70 kPa excepté pour les derniers jours de juin. Le potentiel est légèrement plus faible en haut de pente durant la durée de mesure et particulièrement à partir du 21 juin où le potentiel chute drastiquement en haut de pente mais pas en bas de pente. Cela confirme l'assèchement plus marqué du sol en surface en haut de pente, comme le révélaient les diverses mesures.

Au Domaine W, l'allure de la courbe est particulière car durant le mois de mai, le sol s'assèche légèrement passant d'une valeur de -25 à -50 kPa et n'augmente pas après les pluies. Les pluies durant le mois de mai n'ont jamais dépassé plus de 5 mm/h. En surface, le sol à une REU de 1,94 mm/cm de sol. Il est donc possible que l'apport d'eau en surface n'ait jamais atteint la profondeur des sondes de 15 cm et l'eau amenée au sol en surface a été

utilisée par l'évapotranspiration du couvert. C'est seulement après une pluie de 14 mm en une heure début juin que le potentiel croît. La première partie du mois de juin étant fortement pluvieuse, le potentiel reste élevé avec des valeurs moyennes comprises entre -25 et -10 kPa. Malheureusement, les données pour la fin du mois de juin, qui était très chaud et sec, manquent et la comparaison avec le Château de Bousval n'est pas possible pour cette période.
Même s'il n'est pas possible d'obtenir des valeurs de teneur en eau précisément avec les données de tension, celles-ci sont globalement assez élevées car comprises généralement entre un pF de 2 (-10 kPa) et un pF de 2,7 (-50 kPa). Pourtant, les échantillonnages en surface pendant cette période montraient des teneurs en eau assez faibles, parfois inférieures à la teneur en eau du point de flétrissement (pF 4,2). Les échantillonnages ont été effectués en surface entre 0 et 15 cm et les sondes mesurant le potentiel matriciel ont été placées entre 10 et 15 cm. Le sol étant plus sec sur les 15 premiers centimètres qu'entre 10 et 15 cm, il est normal d'obtenir des teneurs en eau plus sèches lors des échantillonnages.

L'enherbement de l'inter-rang provoque une diminution importante du système racinaire des ceps de vigne et surtout des racines de faible diamètre dans les horizons superficiels : afin de compenser la concurrence pour le prélèvement d'eau, la vigne développe alors des racines plus profondes pour explorer des horizons où elle n'est plus concurrencée par l'enherbement (Morlat *et al.*, 1987). Au Château de Bousval, le sable affleurant parfois déjà à 30 cm sur le haut de pente, la vigne ne peut pas compenser la concurrence en surface en explorant en profondeur. Avec la température, cela peut être une raison qui explique la présence d'une contrainte plus forte sur le site en haut de pente en comparaison du site en bas de pente, ou au Domaine W, où les vignes sont libres de développer des racines en profondeur.

Il est intéressant de considérer les espèces composant l'enherbement, car elles n'offrent pas toutes le même niveau de concurrence. La fétuque élevée (*Festuca arundinacea*) par exemple, est connue pour concurrencer fortement la vigne. Le ray-grass anglais, présent à 40% dans la strate herbacée de Bousval installe une concurrence moyenne à forte (Institut Français de la Vigne et du Vin, sans date). Les études effectuées sur les vignobles français et même ailleurs recherchent souvent, à l'inverse, des espèces peu concurrentielles. Par ailleurs, peu d'information est disponible sur les espèces présentes au Domaine W.

La densité de plantation est plus élevée à Bousval. En effet, au Domaine W, l'écartement entre les rangs est de 2,25m pour 1,60 au Château de Bousval et l'écartement des ceps est de 1m pour 0,75 m au Château de Bousval. Une densité de plantation plus élevée amène une consommation d'eau plus importante et une diminution de la réserve en eau du sol (Gérard, 2019).

7. Perspectives

Il faut garder à l'esprit que les deux vignobles étudiés dans le cadre de ce travail sont encore jeunes, comme c'est souvent le cas en Belgique. Sur les parcelles étudiées, les vignes ont été plantées en 2014 au Château de Bousval et en 2016 au Domaine W. Il a été montré que l'évapotranspiration augmente avec l'âge de la vigne depuis la plantation jusqu'au développement de la canopée et du système racinaire permettant d'atteindre leur pleine capacité à capter, respectivement, le rayonnement solaire et l'eau (Steduto *et al.*, 2012).

Une fois le vignoble planté, il est difficile de modifier la densité de plantation dans le but d'obtenir une plus grande concurrence entre les pieds de vigne, en particulier une compétition pour le prélèvement d'eau susceptible d'induire une contrainte hydrique chez la vigne. Cependant, il existe d'autres facteurs sur lesquels le viticulteur peut jouer afin d'induire cette contrainte. Une augmentation du feuillage, en augmentant sa largeur et/ou sa hauteur, engendre une transpiration plus importante. L'enherbement peut être amélioré en laissant une hauteur résiduelle de tonte plus haute. Un enherbement total, sous le rang et dans l'inter-rang permet également d'améliorer son efficacité pour la concurrence hydrique (Gérard, 2019).
Ces différents paramètres pourraient cependant avoir des impacts sur la culture tels que l'augmentation des parasites, le passage des engins agricoles, la fertilisation… qu'il faudrait également envisager dans le cadre de nouvelles études.

Plusieurs contraintes ont été rencontrées lors de la réalisation de ce travail. Tout d'abord, la période d'étude ne couvrait pas l'été. Aucune mesure n'a été effectuée entre la nouaison et la récolte. Il s'agit cependant des semaines où les raisins se forment et se gorgent d'eau et où la vigne est particulièrement sujette à subir une contrainte ou un stress hydrique. C'est également la période de l'année où les températures sont généralement les plus élevées. Si une faible contrainte est observée jusqu'en juillet, il est cependant possible que la contrainte apparaisse plus tard dans l'été mais l'absence de mesures ne permet pas de le confirmer. Ensuite, les deux parcelles étudiées présentaient des caractéristiques différentes (sol, topographie, densité de plantation, enherbement, cépage, âge des vignes…) qui rendaient la comparaison malaisée. Enfin, des mesures n'ont pas été effectuées sur une parcelle témoin, non-enherbée.

Afin d'étudier rigoureusement l'impact de l'enherbement sur la contrainte hydrique de la vigne, plusieurs dispositions devraient être prises. Premièrement, les parcelles étudiées devraient être semblables d'un point de vue pédologique ainsi qu'au niveau du matériel végétal planté et de la conduite du vignoble (densité de plantation, hauteur de tonde, type de taille, hauteur d'effeuillage….). Idéalement les parcelles se situeraient au sein d'un même vignoble de sorte que le climat soit strictement identique. Ensuite, trois parcelles devraient

être étudiées : une parcelle avec un enherbement semé, une parcelle avec un enherbement naturel et une parcelle témoin non-enherbée. Aussi, les mesures devraient couvrir la période de maturation, idéalement depuis le débourrement jusqu'à la fin de la récolte. Par ailleurs, des mesures de teneurs en eau plus régulières pourraient être prises, par exemple à l'aide de tensiomètres enregistrant la teneur en eau en continu et en temps réel à plusieurs profondeurs. Enfin, afin de mesurer l'état hydrique de la vigne, outre les mesures sur le sol, d'autres types de mesures sont disponibles : des mesures du potentiel hydrique foliaire et de tige qui se réalisent à l'aide d'une chambre à pression ou des mesures de la discrimination isotopique du carbone 13 (voir section 1.2 L'alimentation en eau de la vigne).

Conclusion

L'alimentation hydrique de la vigne est une caractéristique fondamentale pour tout vigneron qui doit veiller à ce que ces vignes ne soient pas en stress hydrique mais également à l'inverse, ne se développent pas dans un confort hydrique. Cependant, la réserve en eau utile élevée des sols limoneux combinée avec la pluviosité belge, n'aide pas les vignerons à soumettre leurs vignes à une contrainte hydrique, même modérée. Plusieurs stratégies peuvent dès lors être adoptées afin de contrer ce problème. L'enherbement en fait partie.

Les deux parcelles étudiées présentes des caractéristiques diverses. Au Château de Bousval, il convient de séparer le haut du bas de pente. En effet, bien que la texture (loam) soit comparable et les réserves en eau dans le limon (assez élevées) également, la topographie amène de larges différences. Tout d'abord, le haut de pente jouit d'une meilleure exposition et donc d'une température plus élevée que dans le bas de pente. Ensuite, la couche de limon recouvrant le sable y est peu épaisse, induisant une réserve en eau utile bien moindre sur le haut de pente. L'enherbement amenant une compétition en surface oblige les racines de la vigne à explorer le sol davantage en profondeur pour puiser de l'eau, ce qui n'est pas efficace lorsque le sable affleure dans les premiers décimètres. Pour ces raisons, en surface, la vigne serait davantage contrainte en haut de pente mais légèrement en bas de pente. Une transition progressive de la contrainte doit s'observer entre ces deux sites le long de la pente et à mesure que la couche de limon s'épaissit. Au-delà des aspects texturaux et topographiques, deux éléments dans ce vignoble sont favorables à la création d'une contrainte : une densité de plantation élevée (1,6 x 0,75 m), avec un enherbement dominé par le ray-grass. Au Domaine W, la texture limoneuse à réserve en eau utile élevée, le sol profond et la densité de plantation faible peinent à imposer une contrainte à la vigne. Les échantillonnages ont montré une contrainte légère en surface et une absence de contrainte en profondeur.

La viticulture belge n'est qu'à ces débuts, rares sont les vignobles qui existaient il y a 10 ans. Bien que les sols et le climat ne soient pas favorables à la mise en place d'une contrainte hydrique, le vin belge est apprécié et commence à faire parler de lui au-delà de nos frontières. Ce travail est une première étude de l'impact de l'enherbement dans le but d'induire une contrainte, et non de la minimiser. Ce sujet mérite d'être approfondi et d'autres méthodes d'entretien du sol peuvent être étudiées et exploitées afin de favoriser l'induction d'une contrainte hydrique. De plus, dans le contexte actuel de changement climatique, il me semble légitime d'approfondir les études sur l'installation de régions viticoles à des latitudes plus élevées, comme la Belgique. La viticulture belge a encore de beaux jours devant elle, j'en suis persuadée.

Bibliographie

1. Ageorges, A. et Terrier, N. (2014) « Impact du stress hydrique sur la qualité de la vendange : l'exemple des flavonoïdes », *Innovations Agronomiques*, 38, p. 87-95.
2. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. et Smith, M. (1998) *Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Édité par FAO. doi: 10.1016/j.eja.2010.12.001.
3. Apaq-W (sans date) *Les Appellations du secteur viti-vinicole wallon*. Disponible sur: http://www.apaqw.be/Productions/Le-vin/Les-appellations.aspx (Consulté le: 5 janvier 2019).
4. Baize, D. (2018) *Guide des analyses en pédologie - 3e édition revue et augmentée*. Editions Q.
5. Bielders, C. et Javaux, M. (2016) *LBRES2103 - Physique du sol*.
6. Boschman, E. et Vanel, M. (2015) *Vins d'artisans en Wallonie*. Édité par Racine.
7. Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R. et Jamagne, M. (1996) « Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente », *Etude et Gestion des Sols*, 31, p. 27-40.
8. Bruand, A., Duval, O. et Cousin (2004) « Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : Une première proposition combinant le type d ' horizon , sa texture et sa densité apparente », *Etude et Gestion des Sols*, 11, p. 323-334.
9. Celette, F. (2007) *Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté dans une vigne enherbée sous le climat méditerranéen*. Montepellier SupAgro.
10. Decagon Devices (2016) « Dielectric Water Potential Sensors ».
11. Delabays, N., Mermillod, G. et Spring, J.-L. (2006) « Essai d'enherbement de la vigne avec des espèces peu concurrentielles : aspects botaniques et malherbologiques », *Revue suisse de viticulture arboriculture horticulture*, 38(6), p. 343-354.
12. Deloire, A., Vaudour, E., Carey, V., Bonnardot, V. et Van Leeuwen, C. (2005) « Grapevine responses to terroir: A global approach », *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 39(4), p. 149-162. doi: 10.20870/oeno-one.2005.39.4.888.
13. Dienst, V. (2015) *Le potentiel viticole wallon : Approche cartographique et étude terroir*, *Non publié*. Montpellier SupAgro.
14. Des Gachons, C. P., van Leeuwen, C., Tominaga, T., Soyer, J. P., Gaudillère, J. P. et Dubourdieu, D. (2005) « Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of Vitis vinifera L cv Sauvignon blanc in field conditions », *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(1), p. 73-85. doi: 10.1002/jsfa.1919.
15. Gary, C. et Celette, F. (2009) « Enherbement et gestion du stress hydro-azoté de la vigne ».
16. Gérard, A. (2019) *La conduite du vignoble du domaine « Vin de Liège » peut-elle être adaptée en considération des résultats fournis par un calcul de bilan hydrique ?*, *Non*

publié. Haute Ecole de la Province de Namur.
17. Gobat, J.-M., Aragno, M. et Matthey, W. (2010) *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols*. 3e éd. Édité par PPUR.
18. Halkin, J. (1895) *Etude historique sur la culture de la vigne en Belgique*. Bulletin d. Liège.
19. Huglin, P. (1978) « Nouveau mode d'évaluation des possibilites héliothermiques d'un milieu viticole », *Comptes rendus de l'académie d'agriculture*.
20. IFV, INRA et Montpellier SupAgro (2008) *Catalogue des Variétés et clones de vigne cultivés en France*. 2ème éd. Édité par Vinifhor.
21. Institut Français de la Vigne et du Vin (2014) *Gestion du régime hydrique de la vigne*.
22. Institut Français de la Vigne et du Vin (sans date) *L'enherbement permanent*. Disponible sur: http://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/enherbement-permanent/ (Consulté le: 20 juillet 2019).
23. ITV-France (2002) « L'enherbement permanent de la vigne », *Les cahiers itinéraires d'ITV France*, 4, p. 1-8.
24. Jamagne, M., Betremieux, R., Begon, J. . et Mori, A. (1977) « Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols », *Bulletin Technique d'Information*, 324-325, p. 627-641.
25. Javaux, M. et Laurent, F. (2018) « Utilisation de la casserole à basse pression pour des courbes de rétention en kopeckis », *Non publié*, p. 1-10.
26. Jones, G. et Davis, R. (2000) « Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. », *American Journal of Enology and Viticulture*, 51 (3)(January), p. 249-261.
27. L'Echo (2018) « La production belge de vin a augmenté de 12% en 2017 ».
28. Lacape, M. J., Wery, J. et Annerose, D. J. M. (1998) « Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton (Gossypium hirsutum L.) cultivars », *Field Crops Research*, 57(1), p. 29-43. doi: 10.1016/S0378-4290(97)00111-1.
29. Morlat, R., Venin, A. et Jacquet, A. (1987) « Influence du mode d'entretien du sol sur l'alimentation en eau de la vigne en Anjou. Conséquences agronomiques ».
30. Morlat, R. et Venin, G. (1981) « Effets comparés de deux techniques d'entretien du sol sur l'enracinement de la vigne et sur le milieu édaphique », *Agronomie*, 1(10), p. 887-896. doi: 10.1051/agro:19811010.
31. Pellegrino, A., Lebon, E., Voltz, M. et Wery, J. (2004) « Relationships between plant and soil water status in vine (Vitis vinifera L .) », *Plant and Soil*, 266, p. 129-142.
32. Pl@ntGrape (sans date) *Le catalogue des vignes cultivées en France*. Disponible sur: http://plantgrape.plantnet-project.org/fr/catalogues (Consulté le: 21 mai 2019).
33. Questions à la Une (2018) *Wallonie, nouvel eldorado du vin?*
34. La Revue du vin de France (sans date) *Découvrir le vin de Belgique*. Disponible sur: https://www.larvf.com/,vin-vignoble-belgique,13186,4268255.asp (Consulté le: 5 janvier 2019).
35. Richards, D. (1983) « The Grape Root System », *Horticultural Reviews*, p. 127-168. doi:

10.1002/9781118060728.ch3.
36. Riou, C. et Payan, J. . (2001) « Outils de la gestion de l'eau en vignoble méditerranéen : application du bilan hydrique au diagnostic du stress hydrique de la vigne », *GESCO XIIéme journées du groupe européen d'études des systèmes de conduite de la vigne*, 3, p. 125-133.
37. Ritchie, J. T. (1981) « Water dyanmics in the soil-plant-atmosphere system », *Plant and Soil*, 58, p. 81-96.
38. RTBF (2018) *La viticulture belge: un secteur en plein boom*. Disponible sur: https://www.rtbf.be/info/economie/detail_la-viticulture-belge-un-secteur-en-plein-boom?id=9892703 (Consulté le: 3 janvier 2019).
39. Seguin, G. (1972) « Répartition dans l'espace du système radiculaire de la vigne », *Compte Rendus Academe Science Paris*, p. 2178-2180.
40. Service public fédéral Economie (2018) *La viticulture belge en chiffres*.
41. Sinclair, T. et Ludlow, M. (1986) « Influence of Soil Water Supply on the Plant Water Balance of Four Tropical Grain Legumes », *Australian Journal of Plant Physiology*, 13(3), p. 329-341.
42. Le Soir (2018) *Le vin wallon bat tous les records: une production abondante et de qualité*. Disponible sur: https://www.lesoir.be/189270/article/2018-11-10/le-vin-wallon-bat-tous-les-records-une-production-abondante-et-de-qualite (Consulté le: 5 janvier 2019).
43. Sosnowski, H. (2018) *Propriétés hydriques et hydrodynamiques de quatre parcelles viticoles à contraintes hydriques contrastées*, *Non publié*. UCLouvain.
44. Spring, J.-L. et Delabays, N. (2006) « Essai d'enherbement de la vigne avec des espèces peu concurrentielles : aspects agronomiques », *Revue suisse de viticulture, arboriculture, horticulture*, 38(6), p. 355-359.
45. Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E. et Raes, D. (2012) *Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66*. Édité par FAO. Rome.
46. USDA (sans date) *General Guide for Estimating Moist Bulk Density*. Disponible sur: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2_074844 (Consulté le: 23 juin 2019).
47. Vander Linden, C. (2015) *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*, *Non publié*. UCLouvain.
48. van Leeuwen, C., Friant, P., Choné, X., Tregoat, O., Koundouras, S. et Dubourdieu, D. (2004) « Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir », *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(3), p. 1-8.
49. van Leeuwen, C. (2009) « Soils and Terroir Expression in Wines », *Soil and Culture*, p. 453-465. doi: 10.1007/978-90-481-2960-7.
50. van Leeuwen, C., Gaudillère, J. P. et Tregoat, O. (2001) « L'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique 13C/12C », *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 35, p. 195-205.

51. van Leeuwen, C. et Roby, J. P. (2001) « Choix du porte-greffe », *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 35(SPEC. ISS.), p. 61-66.
52. van Leeuwen, C. et Seguin, G. (2006) « The concept of terroir in viticulture », *Journal of Wine Research*, 17(1), p. 1-10. doi: 10.1080/09571260600633135.
53. van Leeuwen, C. et Vivin, P. (2008) « Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins », *Innovations Agronomiques*, 2, p. 159-167.
54. Vin de Liège (sans date) *La vigne en Belgique, l'histoire*. Disponible sur: https://www.vindeliege.be/la-vigne-en-belgique/l-histoire/ (Consulté le: 2 janvier 2019).
55. White, R. (2003) *Soils for Fine Wines*. Oxford Uni. New-York.
56. White, R. (2006) *Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource*, *Blackwell Publishing*. doi: 10.1002/msj.20251.

Annexe

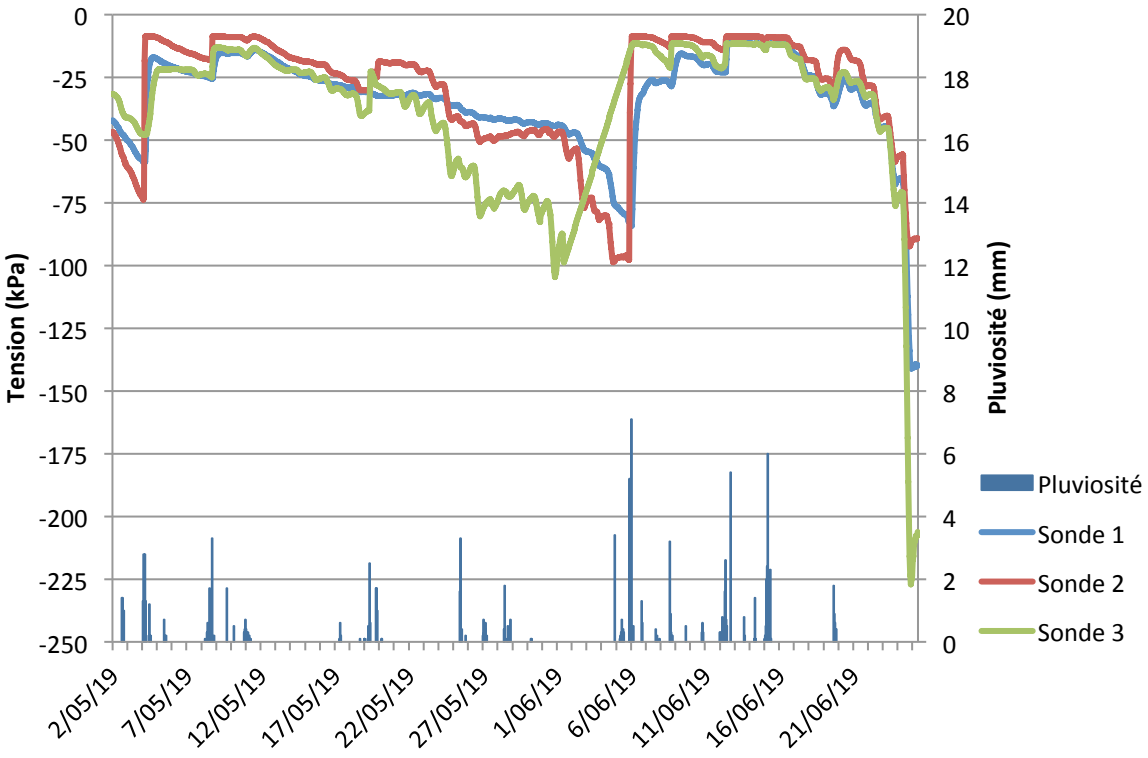


Figure 7.1 - Évolution du potentiel matriciel mesuré par les sondes en haut de pente au Château de Bousval

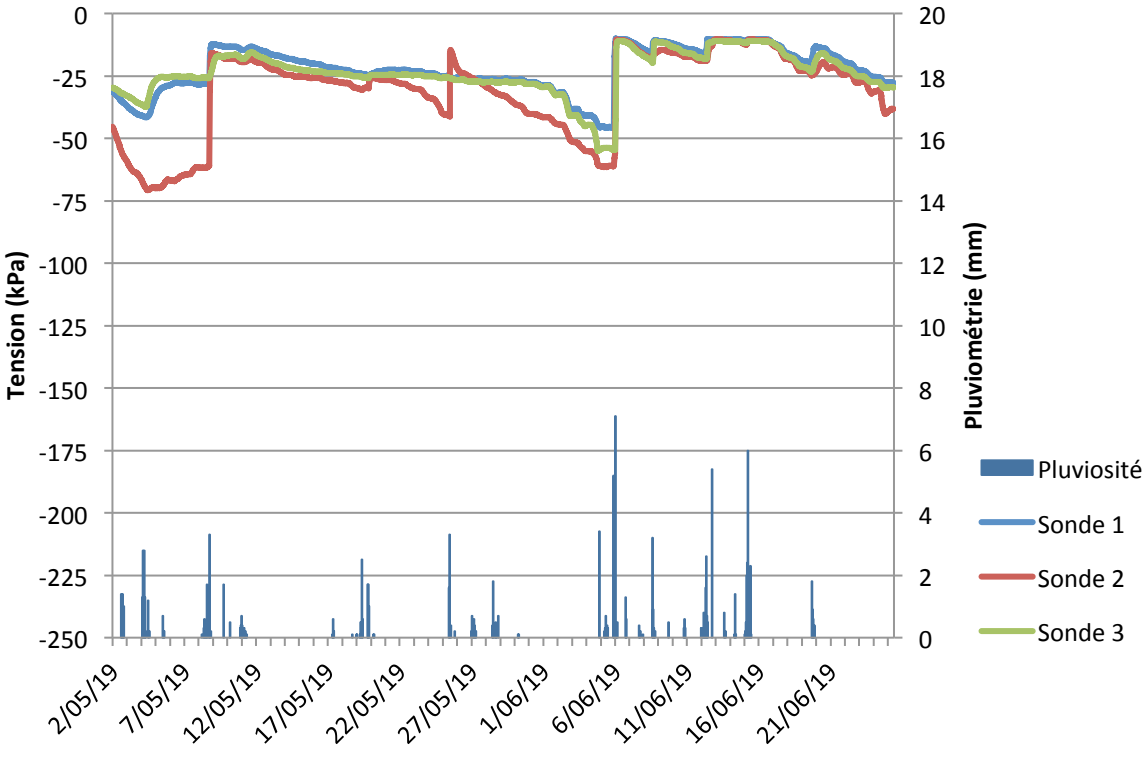


Figure 7.2 - Évolution du potentiel matriciel mesuré par les sondes en bas de pente au Château de Bousval

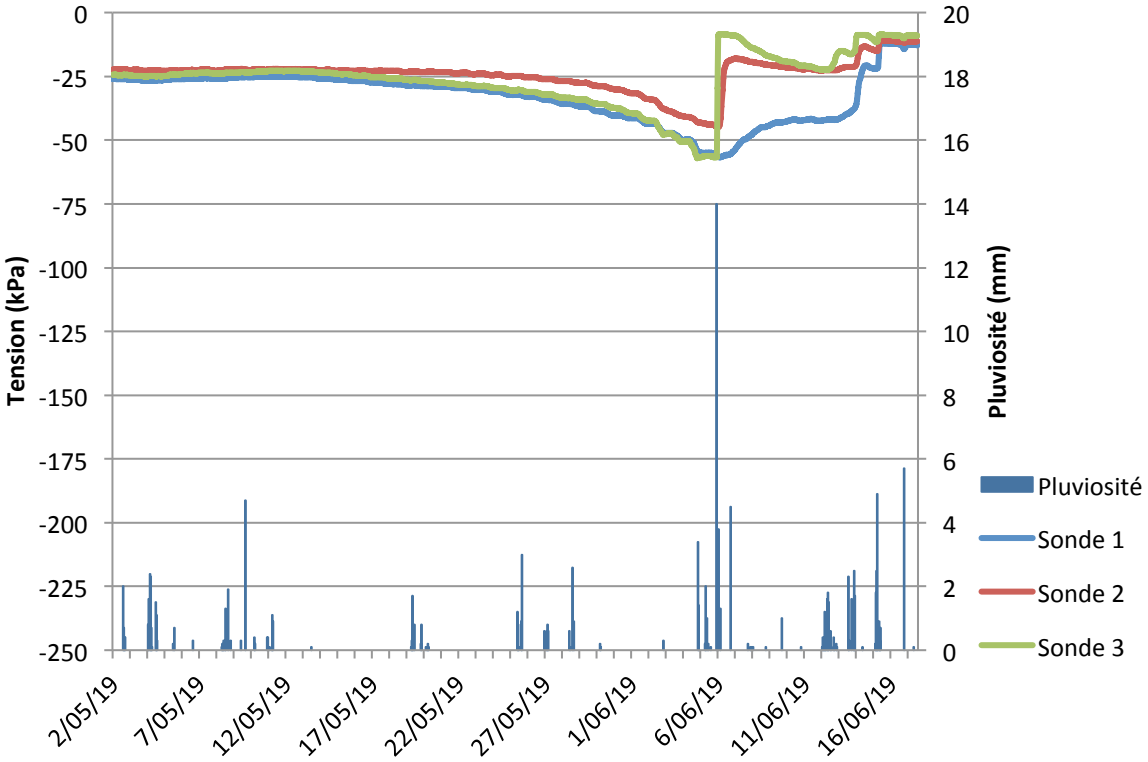


Figure 7.3 - Évolution du potentiel matriciel mesuré par les sondes au Domaine W

Dynamique de la teneur en eau dans deux vignobles wallons enherbés dans l'inter-rang

Présenté par Clémence Becker

La vigne, contrairement à la majorité des productions végétales, est cultivée en deçà de son optimum agronomique. Une contrainte hydrique limite sa vigueur et son rendement mais favorise le potentiel œnologique du raisin et la qualité du vin. L'objectif de ce mémoire est d'analyser les propriétés hydriques des sols de deux parcelles viticoles wallonnes et de déterminer si la vigne y est soumise à une contrainte hydrique. Les deux parcelles sont enherbées dans l'inter-rang, ce qui est une manière de concurrencer la vigne pour le prélèvement d'eau. L'enherbement est semé dans la première parcelle et naturel dans la seconde. La première parcelle étudiée appartient au vignoble du Château de Bousval et présente une pente de 8%. Le sol est composé d'une couche de limon recouvrant du sable bruxellien. La topographie cause des variations dans l'épaisseur de cette couche qui est plus importante en bas de pente. Ces différences ont conduit à considérer deux sites d'étude sur la même parcelle : un site en haut et un site en bas de pente. En haut de pente, le sable bruxellien affleure généralement dans le premier mètre. La réserve en eau utile (REU) de celui-ci étant faible (0,9 mm/cm), moins d'eau utile est disponible pour les vignes du haut de pente. Ceci est corrélé avec une vigueur des sarments (poids de sarment/pied de vigne) plus faible en haut de pente. Des mesures régulières de la teneur en eau sur les deux sites au cours de la saison ont montré qu'en surface (entre 0 et 15 cm) en haut de pente, la teneur en eau est inférieure à la teneur en eau au point de flétrissement après le débourrement. En bas de pente, une diminution importante de la teneur en eau est également observée après le débourrement mais celle-ci reste tout de même supérieure à la teneur en eau au point de flétrissement. Ces mesures de teneur en eau ont permis de calculer la « *fraction of transpirable soil water* » (FTSW) et de quantifier l'intensité de la contrainte hydrique. Les résultats indiquent que la contrainte après le débourrement est forte en haut de pente et faible en bas de pente. La seconde parcelle étudiée est située au Domaine W. La texture est également limoneuse mais il n'y a pas la présence de sable bruxellien en profondeur. La REU est élevée (1,94 mm/cm) et les échantillonnages de teneur en eau ont révélé une contrainte faible en surface, à partir du débourrement. Pour les deux parcelles étudiées, une absence de contrainte a été conclue en profondeur (40-55 cm).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs
Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/agro**