



Développement d'une méthode de diagnostic des systèmes de drainage dans la production de canneberges

Mémoire

Diane Bulot

Maîtrise en sols et environnement
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Diane Bulot, 2016

Développement d'une méthode de diagnostic des systèmes de drainage dans la production de canneberges

Mémoire

Diane Bulot

Sous la direction de :

Silvio J. Gumiere, directeur de recherche

Résumé

Contrairement à la croyance populaire, la canneberge ne pousse pas dans l'eau et la gamme de potentiel matriciel de l'eau dans le sol optimale pour la croissance des plants se situe entre -3.0 et -7.5 kPa. Un sol gorgé d'eau et mal aéré diminue la capacité des plants à prélever les nutriments dans le sol et peut augmenter les maladies racinaires. Il est donc primordial d'entretenir un système de drainage efficace afin de maintenir les plants dans un environnement optimal. L'objectif de ce projet était le développement d'une méthode de diagnostic des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges. Les hypothèses étaient : (a) les variabilités spatiales verticale et horizontale des propriétés hydrodynamiques du sol influence l'efficacité d'un système de drainage et (b) l'étude de données tensiométriques et de l'évolution de la hauteur de la nappe en fonction du temps permet de déterminer l'efficacité d'un système de drainage. Aux étés 2013 et 2014, un dispositif expérimental de suivi de la nappe (puits d'observation, tensiomètres, sondes de pression) a été mis en place sur 21 champs. En parallèle, 960 échantillons de sol ont été prélevés sur huit champs et rapportés en laboratoire afin d'estimer la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol. Les analyses des données obtenues de vitesse de rabattement de la nappe, conductivité hydraulique à saturation, masse volumique, porosité, rendement, granulométrie, paramètres de rétention en eau et teneurs en eau du sol ont permis de mettre en évidence leur influence sur le rendement et l'efficacité de drainage. En se basant sur des courbes de rabattement de la nappe, la vitesse de rabattement de la nappe et le profil de charge, une charte de diagnostic a pu être développée. Cette charte de diagnostic, à l'issue de quatre grandes questions directrices, permet l'identification d'un possible problème de drainage.

Abstract

Efficient drainage systems are essential in the development of more intelligent precision irrigation methods in cranberry production. Most cranberry fields are equipped with subsurface drainage systems used for excess water removal and water table control. In fact, cranberry reveals high sensitivity to wet conditions with an important decrease in crop yields caused almost exclusively by dysfunctional drainage systems. Previous works have highlighted the need to improve existing drainage systems. The main objective of this study was to develop a real-time method for assessment of subsurface drainage system performance. The hypotheses were : (a) the vertical and horizontal spatial variability of the hydrodynamic soil properties influence underground drainage system efficiency and (b) the study of tensiometric data and changes in the water table height versus time, allows us to assess drainage system efficiency. During the 2013 and 2014 crop seasons, real-time experimental devices (observation wells, tensiometers, and pressure sensors) were installed in 21 fields (13 in Manseau and eight in the Lac-St-Jean region, Québec, Canada) in order to monitor the water table and soil matric potential. In order to assess the relationship between drainage efficiency and soil properties, 960 undisturbed soil cores were collected over eight fields and brought back to the laboratory for hydrodynamic soil properties characterization. Data obtained from water table drawdown speed, saturated hydraulic conductivity, bulk density, porosity, granulometry, water retention parameters and water contents allowed to highlight their influence on crop yields and drainage efficiency. Based on water table drawdown curve, water table drawdown speed and water height profile, a diagnostic diagram was developed. This diagnostic charter, based on four guiding questions, allows for the identification of drainage problems.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Remerciements.....	x
Avant-propos.....	xi
Introduction générale.....	1
Bibliographie.....	4
Chapitre 1 Revue de littérature.....	5
1.1 La culture de la canneberge	6
1.1.1 La physiologie et la culture de <i>Vaccinium macrocarpon</i> Ait.....	6
1.1.2 <i>Vaccinium macrocarpon</i> Ait. au Québec	7
1.1.3 L'importance de l'eau dans une cannebergière : une régie d'irrigation optimale ne peut être appliquée qu'en présence d'un système de drainage adéquat	8
1.2 Les potentiels de l'eau dans le sol	11
1.2.1 Les potentiels de l'eau dans le sol.....	12
1.2.2 Le tensiomètre et la sonde de pression.....	13
1.3 Les paramètres des modèles de drainage	13
1.3.1 Le régime permanent.....	14
1.3.2 Le régime variable.....	15
1.4 Les différentes causes de mal fonctionnement des systèmes de drainage souterrain.....	16
Bibliographie.....	18
Chapitre 2 Impact of soil hydrodynamic parameters on drainage efficiency and cranberry yields	21
Résumé	22
Abstract.....	23
2.1 Introduction	24
2.2 Materials and Methods	25
2.2.1 Experimental sites	25
2.2.2 Water table drawdown	26
2.2.3 Soil sampling and spatial variability of hydrodynamic properties	27
Soil sampling.....	27
Saturated hydraulic conductivity.....	28
Bulk density, porosity and particle-size analysis.....	28
Water retention	28
2.2.4 Statistical analysis	30
Principal component analysis	30
Cluster analysis	30
2.3 Results and discussion.....	31
2.3.1 Water retention model.....	31
2.3.2 Principal component analysis.....	32

2.2.3 Cluster analysis	33
2.4 Conclusion.....	41
References.....	42
Chapitre 3 Développement d'une charte de diagnostic des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges	44
3.1 Introduction	45
3.2 Matériel et méthode	45
3.2.1 Choix des champs, recherche des drains et installation des puits d'observation	45
3.2.2 Installation du dispositif expérimental et lancement des irrigations contrôlées	46
3.2.3 Utilisation du logiciel Irrolis™. Exploitation des données.	48
Calcul de la profondeur de la nappe phréatique à l'aide des données de pression de la sonde de pression et de tension du tensiomètre	49
Évaluation de la vitesse de rabattement de la nappe phréatique	50
Évaluation du profil de charge de la nappe phréatique.....	51
Linéarité de la relation entre le tensiomètre et la sonde de pression	51
3.3 Résultats et discussion.....	53
3.3.1 Comparaison des données automatiques et manuelles de profondeur de nappe (sondes Hortau® versus relevés manuels).....	54
3.3.2 Charte de diagnostic des systèmes de drainage souterrain	55
Exemple 2 : Champ K6 Transept 2	63
Exemple 3 : Champ W7 Transepts 1 et 2	66
Exemple 4 : Champ E15 Transept 1	68
Exemple 5 : Champ U8 Transept 2	70
3.4 Conclusion.....	71
Bibliographie.....	73
Conclusion générale.....	74
Bibliographie générale	77
Annexe 1 : Calcul de la profondeur de la nappe phréatique à l'aide des données de pression de la sonde de pression	82
Annexe 2 : Calcul de la profondeur de la nappe phréatique à l'aide des données de tension du tensiomètre	84
Annexe 3 : Évaluation de la vitesse de rabattement de la nappe phréatique.....	85
Annexe 4 : Évaluation du profil de rabattement de la nappe phréatique	86
Annexe 5 : Résumé des diagnostics plausibles pour les systèmes de drainage des 21 champs à l'étude	88

Liste des tableaux

Tableau 1 Séries de sol retrouvées dans les champs de canneberges du partenaire Canneberges Bieler, Québec, Canada	8
Tableau 2 Liste des vitesses de rabattement de la nappe, attendues, en fonction des références	10
Tableau 3 Les différentes causes de mal fonctionnement des systèmes de drainage souterrain	17
Tableau 4 General informations about Site 1 and Site 2	26
Tableau 5 Initial parameter values of the van Genuchten model describing the hydraulic properties of soil samples (Jury et al. 2004).....	29
Tableau 6 Residual sum of squares for samples with van Genuchten water retention model	32
Tableau 7 Median values of physical soil parameters, hydraulic soil parameters, and parameters of soil water retention model (van Genuchten) for Cluster 1 and 2, for each situation	35

Liste des figures

Figure 1 Schéma de présentation du mémoire	1
Figure 2 Location of experimental sites in Canada.....	25
Figure 3 Water table monitoring setup.....	27
Figure 4 Principal component analysis results for the surface drainage and the surface capillary rise case	32
Figure 5 Dendrogram with the result of Ward's agglomerative hierarchical cluster analysis of scaled physical soil parameters, hydraulic soil parameters, and parameters of van Genuchten model for each case (a) surface drainage, (b) deep drainage, (c) surface capillary rise and (d) deep capillary rise	33
Figure 6 Distribution of physical soil parameters, hydraulic soil parameters and parameters of the soil water retention models for Cluster 1 and 2, for the surface drainage case	36
Figure 7 Distribution of physical soil parameters, hydraulic soil parameters and parameters of the soil water retention model for Cluster 1 and 2, for the deep drainage case.....	37
Figure 8 Distributions of physical soil parameters, hydraulic soil parameters and parameters of the soil water retention model for Cluster 1 and 2, for the surface capillary rise case.....	38
Figure 9 Distributions of physical soil parameters, hydraulic soil parameters and parameters of the soil water retention model for Cluster 1 and 2, for the deep capillary rise case.....	39
Figure 10 Characteristic water retention curves based on median calibrated parameter values of the van Genuchten model, for the four cases	40
Figure 11 Mise en place du dispositif expérimental de suivi de la nappe phréatique dans un champ de canneberges à deux drains	47
Figure 12 Représentation schématique du dispositif expérimental de suivi de la nappe phréatique pour un puits.....	48
Figure 13 Évolution des données brutes de tension (issues du tensiomètre) et de pression (issues de la sonde de pression) en fonction du temps, à la suite d'une irrigation	49
Figure 14 Profil de rabattement de la nappe phréatique au niveau d'un puits, à la suite d'une irrigation	49
Figure 15 Représentation de la vitesse de rabattement de la nappe phréatique en cm/h, pour un transept de trois puits, à une des extrémités du champ.....	50
Figure 16 Représentation du profil de charge de la nappe phréatique à la suite d'une irrigation.....	51
Figure 17 Comparaison entre les données de profondeur de nappe issues de la sonde de pression avec les données de profondeur de nappe issues du tensiomètre : (a) puits proche du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains	52
Figure 18 Représentation schématique de la comparaison entre les données de profondeur de nappe issues de la sonde de pression et du tensiomètre (a) le tensiomètre indique que la nappe est élevée et la sonde de pression indique que la nappe est basse et (b) le tensiomètre indique que la nappe est basse et la sonde de pression que la nappe est élevée	53
Figure 19 Représentation schématique de la comparaison entre les données de profondeur de nappe issues de la sonde de pression et du tensiomètre	53
Figure 20 Relation entre les données de profondeur de nappe prises manuellement et les données prises par la sonde de pression	54
Figure 21 Distribution des mesures de profondeur de nappe prises manuellement et avec la sonde de pression	55
Figure 22 Représentation schématique de la charte de diagnostic des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges	56
Figure 23 Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ U18, Transept 1 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains.....	60

Figure 24	Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ U18, Transept 1	60
Figure 25	Profils de rabattement de la nappe pour le champ U18, Transept 1 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains	61
Figure 26	Profil de charge de la nappe pour le champ U18, Transept 1	62
Figure 27	Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ K6, Transept 2 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains.....	63
Figure 28	Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ K6, Transept 2	64
Figure 29	Profils de rabattement de la nappe pour le champ K6, Transept 2 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains	64
Figure 30	Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ W7, Transept 1 (en haut) et Transept 2 (en bas) : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains	66
Figure 31	Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ W7 : (a) Transept 1 et (b) Transept 2	67
Figure 32	Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ E15, Transept 1 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains.....	68
Figure 33	Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ E15, Transept 1	69
Figure 34	Profils de rabattement de la nappe pour le champ E15, Transept 1 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains	69
Figure 35	Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ U8, Transept 2 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains.....	70
Figure 36	Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ U8, Transept 2	70

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Dr. Silvio J. Gumiere pour la chance qu'il m'a donnée de réaliser cette maîtrise, son immense patience et sa gentillesse.

Un grand merci à Jonathan Lafond pour tout ce qu'il a réalisé pour moi au cours de ces deux années, et également à Marie-Hélène St-Gelais et Pierre-Alexandre Papillon. Sans ces trois personnes, je serais encore dans le laboratoire à faire des tests de conductivité hydraulique ou des tables de tension...

Je remercie mes deux grandes amies Amélie Beauregard et Audrey Begin qui m'ont toujours soutenue même dans les temps les plus durs, merci de tout cœur d'avoir été là.

Pour finir, merci à mon cher Jérôme Cauchy, à ma sœur Blandine Bulot, à mes parents et à mes beaux-parents pour avoir su m'encourager et me motiver tout au long de cette maîtrise. Je n'aurai pas pu réussir sans vous.

Avant-propos

Ce mémoire de maîtrise est divisé en trois chapitres. Suite à l'introduction générale, le premier chapitre expose (a) une revue de littérature portant sur la culture de la canneberge *Vaccinium macrocarpon* Ait., (b) la notion des potentiels de l'eau dans le sol et de leur utilisation via le tensiomètre et la sonde de pression, (c) les paramètres des modèles de drainage et pour finir (d) les différentes causes de mal fonctionnement des systèmes de drainage.

Le deuxième chapitre est présenté sous forme d'un article scientifique rédigé en anglais dont je suis l'auteure principale. L'article s'intitule « Impact of soil hydrodynamic parameters on drainage efficiency and cranberry yield » et sera soumis à la revue *Canadian journal of soil science* au cours du mois de janvier 2016. Dr. Silvio J. Gumiere et Dr. Jean Caron, professeurs au département des sols et de génie agroalimentaire (SGA) de l'Université Laval (Québec, Qc, Canada), Dr. Jonathan Lafond, professionnel de recherche au département SGA, Vincent Pelletier (M.Sc.), Yann Périard (M.Sc) et Marie-Hélène Armaly St-Gelais (B.Sc.) sont les co-auteurs de cet article. Leur contribution fut tant au niveau de l'aide à la gestion de l'expérience qu'au niveau de l'assistance à l'écriture et de la révision tout au long de la rédaction de l'article.

Le troisième chapitre porte sur le développement et la présentation d'une charte de diagnostic des problèmes de fonctionnement des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberge. Le mémoire s'achève sur une conclusion générale résumant les Chapitres 1 et 2.

Introduction générale

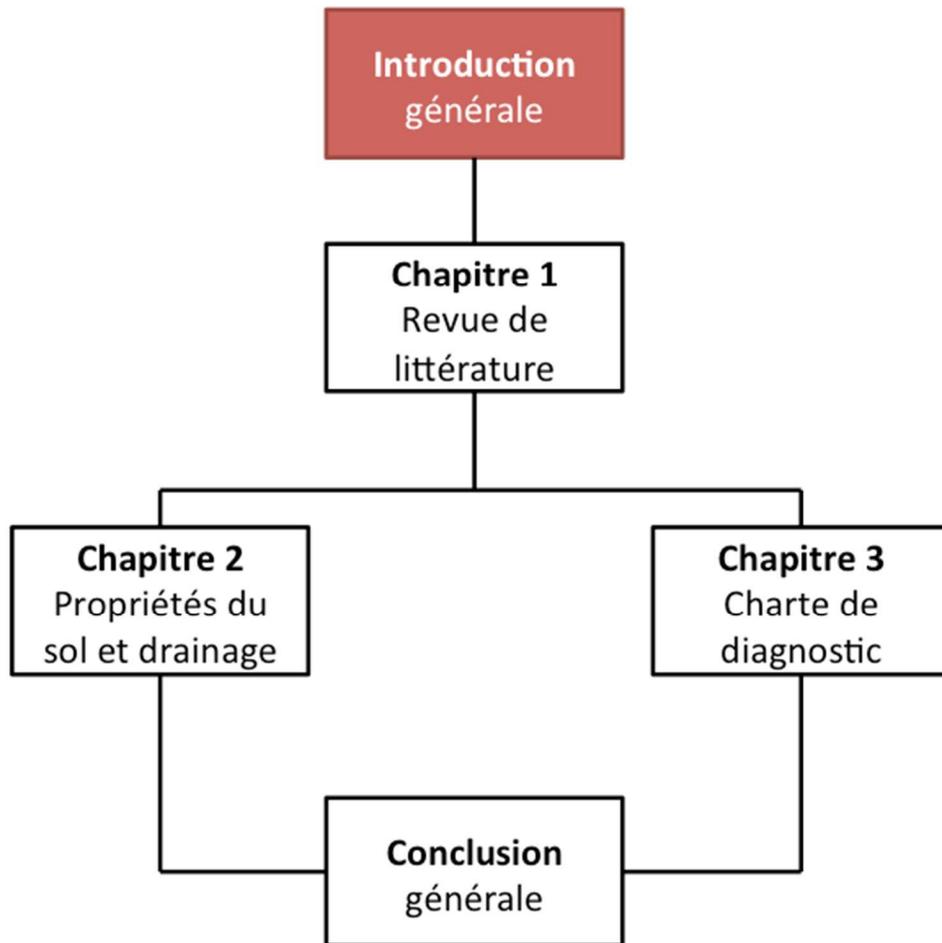


Figure 1 Schéma de présentation du mémoire

L'élaboration d'une régie d'irrigation de précision ciblant l'optimisation de l'utilisation des ressources en eau ne peut être complète sans la caractérisation et la solution des problèmes de drainage. En effet, la gestion de l'irrigation est très influencée par la performance du système de drainage existant. Dans la production de canneberges, la plupart des champs possèdent un système de drainage souterrain, ayant pour but le contrôle du niveau de la nappe d'eau et l'évacuation de l'eau excédentaire (Pelletier 2013). Les travaux des dernières années sur l'optimisation des méthodes d'irrigation dans la production de canneberges (Pelletier 2013; Laurent 2014), l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols (Gumiere et al. 2014) et le diagnostic des systèmes de drainage (Juneau et al. 2009) ont permis de mettre en évidence l'importance majeure des effets du drainage sur la canneberge. Les producteurs, soumis au stress d'obtenir un bon rendement, irriguent souvent en trop grande quantité et un mauvais drainage de l'eau dans le champ peut conduire à l'effet inverse de celui recherché (Bonin 2009). Pour illustrer l'importance d'un système de drainage optimal, il a été montré que sur cinq champs étudiés au cours des années 2011 et 2012, des pertes de rendement de 30% en moyenne étaient imputables à un drainage inefficace, représentant un impact économique allant de 400 000\$ à 1,5 M\$ année⁻¹ pour un seul producteur (Rapport annuel aux producteurs 2014). De précédents travaux ont mis en évidence la grande sensibilité de la canneberge aux variations de potentiel matriciel de l'eau dans le sol (Bonin 2009) et que la gamme optimale pour la croissance des plants se situe entre -3.0 (Bonin 2009; Laurent 2014) et -7.5kPa (Pelletier et al. 2015; Pelletier et al. 2013). De plus un sol gorgé d'eau et mal aéré diminue la capacité des plants de canneberges à prélever les nutriments dans le sol et augmente les maladies racinaires (Sandler & DeMoranville 2008). Il est alors primordial d'avoir un système de drainage efficace et optimal qui permet un rabattement de la nappe rapide pour que les plants restent au maximum dans leur gamme optimale de potentiel matriciel.

Les causes de mauvais fonctionnement d'un système de drainage vont des plus simples, comme la mauvaise conception du système lui-même, aux plus complexes liées à la dynamique de l'eau dans le sol. Le fonctionnement d'un système de drainage souterrain peut être analysé à l'aide d'observations du niveau de la nappe phréatique et de données sur le débit de sortie au drain. Cependant, dans la production de canneberges, la sortie des drains est très souvent submergée et est donc inaccessible pour une évaluation du débit au drain. De plus, il serait très intéressant d'avoir une méthode de diagnostic plus locale, en allant voir directement ce qu'il se passe dans le sol, en observant les interactions sol-plants-eau. Il serait donc plus pertinent de mesurer dans un premier temps des propriétés hydrodynamiques du sol qui sont reliées à l'efficacité de drainage. Dans un

deuxième temps, l'étude du rabattement de la nappe phréatique pourrait être un très bon indicateur de l'état d'un système de drainage souterrain.

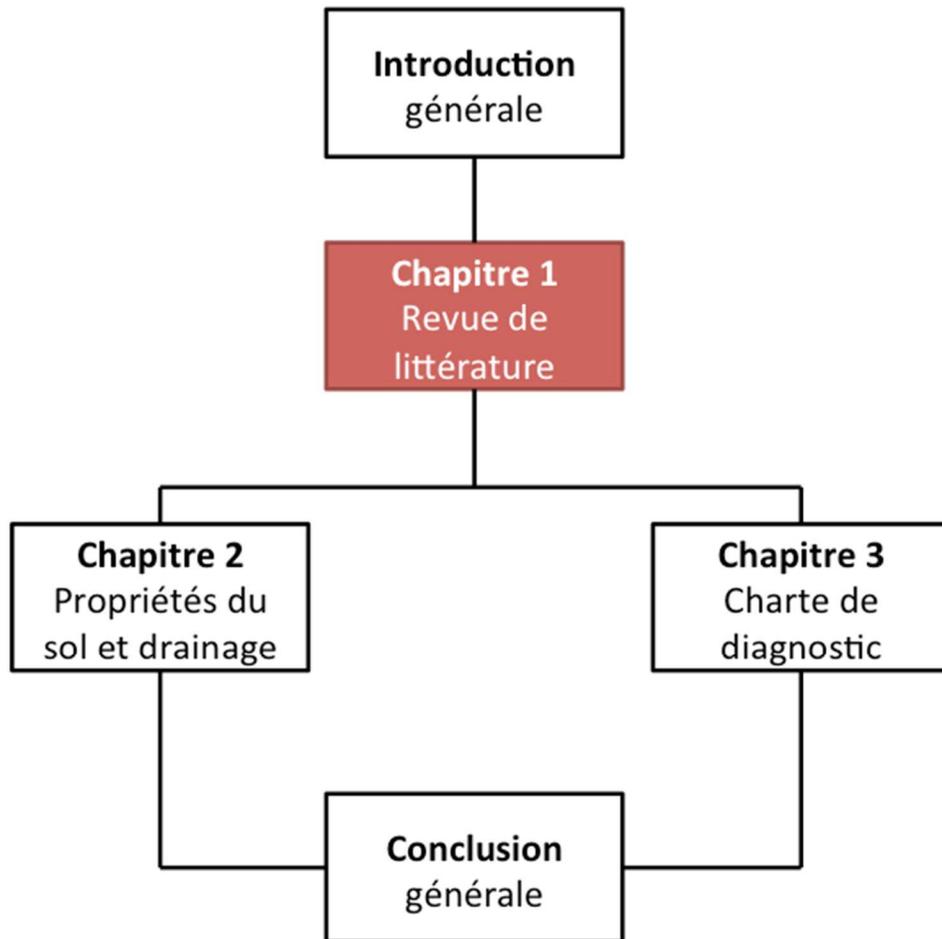
L'objectif principal de ce projet de maîtrise était le développement d'une méthode d'évaluation de la performance des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges. Les deux hypothèses étaient que : (1) les variabilités spatiales verticale et horizontale des propriétés hydrodynamiques du sol influence l'efficacité d'un système de drainage et (2) l'étude de données tensiométriques et de l'évolution de la hauteur de la nappe phréatique en fonction du temps après une irrigation permet de déterminer l'efficacité d'un système de drainage.

Le partenaire Canneberge Bieler (à Manseau et au Lac-St-Jean) a montré beaucoup d'intérêt dans ce projet sur le diagnostic des problèmes de drainage puisque celui-ci possède approximativement 200 champs de canneberges sur tous les types de sol et de tous les âges ; de 5 à 35 ans. Les drains sur les sites de Canneberge Bieler sont parmi les plus anciens retrouvés au Québec dans la culture de la canneberge et suivent des patrons variables d'espacement et de profondeur. Les sols dans lesquels se trouvent ces drains sont aussi variables sur le plan de la composition et de l'épaisseur de leurs horizons. Il est donc possible de mesurer l'impact de différentes installations de drains et de superpositions de couches de sols (sol d'origine, sol organique et sable remanié) sur le comportement et l'efficacité d'un système de drainage. Les particularités des sites de Canneberge Bieler permettront de tester des situations où la variabilité intra-champ est très prononcée. De plus, sur les sites de Canneberges Bieler, les drains sont tous reliés à un collecteur, rendant ainsi la mesure du débit à la sortie du drain impossible.

Bibliographie

- Bonin, S., 2009. *Régie agroenvironnementale de l'irrigation dans la production de canneberges (Vaccinium macrocarpon Ait.)*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Gumiere, S.J., Lafond, J. & Hallema, D., 2014. Mapping soil hydraulic conductivity and matric potential for water management of cranberry: Characterisation and spatial interpolation methods. *Biosystems engineering*, 128, pp.29–40.
- Juneau, V., Caron, J. & Gallichand, J., 2009. Évaluation de l'efficacité des systèmes de drainage dans la production de canneberges. , p.37.
- Laurent, T., 2014. *Réponse de la canneberge (Vaccinium macrocarpon Ait.) à l'aération du sol*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Pelletier, V., Gallichand, J. & Caron, J., 2015. Critical irrigation threshold and cranberry yield components. *Agricultural Water Management*, 56, pp.1325–1332.
- Pelletier, V., 2013. *Irrigation de la canneberge basée sur des seuils de tension de l'eau dans le sol*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, Canada.
- Pelletier, V., Gallichand, J. & Caron, J., 2013. Effect of soil water potential threshold for irrigation in cranberry yield and water productivity. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 56(6), pp.1325–1332.
- Rapport annuel aux producteurs, 2014. Chaire de recherche industrielle CRSNG-Hortau en irrigation de précision.
- Sandler, H. & DeMoranville, C., 2008. Cranberry Production: A Guide for Massachusetts. *UMass Amherst Cranberry Station*, p.37. Available at: <http://books.google.com/books?id=U0K4jwEACAAJ>.

Chapitre 1 Revue de littérature



1.1 La culture de la canneberge

La canneberge nord-américaine (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) est une plante vivace de la famille des *Ericaceae*. Le genre *Vaccinium* est divisé en plusieurs sous-genres et le sous-genre *Oxycoccus* comprend quatre espèces, dont les deux espèces de canneberges, *Vaccinium macrocarpon* et *Vaccinium oxycoccos*, étroitement apparentées (AAC 2013). *V. oxycoccos* se retrouve naturellement dans des sols bourbeux ou tourbeux (AAC 2013). Les fruits, plus petits que ceux de *V. macrocarpon*, ont peu de valeur commerciale et l'espèce n'est pas cultivée (Marie-Victorin et al. 2002). *V. macrocarpon* pousse en terrain ouvert préférant les tourbières acides non boisées (AAC 2013) et est également retrouvée dans des dépressions de dunes littorales (Marie-Victorin et al. 2002).

1.1.1 La physiologie et la culture de *Vaccinium macrocarpon* Ait.

V. macrocarpon Ait. possède deux types de tiges : des tiges érigées verticales dites 'upright' et des stolons (Eck 1990). Les stolons rampent sur le sol et ne produisent pas de fruits. Les bourgeons axillaires des stolons donnent naissance aux tiges verticales sur lesquelles se développent les fruits (Eck 1990). Les fleurs apparaissent à la fin du mois de juin et au début du mois de juillet puis la période de nouaison se déroule de la mi-juillet à début août (AAC 2013). La croissance et la maturation des fruits ont ensuite lieu jusqu'à la fin septembre ou la mi-octobre (AAC 2013). *V. macrocarpon* est une plante bisannuelle, elle ne produit donc des fleurs qu'une année sur deux. Les rendements sont stabilisés pour un équilibre entre le nombre de tiges fructifères et le nombre de tiges végétatives (Baumann & Eaton 1986). La variété « Stevens » retrouvée dans les champs de notre partenaire Canneberge Bieler est très répandue au Québec, elle a l'avantage de fournir de bons rendements et de produire de gros fruits qui se conservent bien (AAC 2013).

En raison de l'obtention de meilleurs rendements de *V. macrocarpon* Ait sur un sol minéral et des contraintes liées à la préservation des milieux humides (Demoranville 2006), la majorité des cannebergières sont implantées sur des sols sableux (>90% de sable) (Poirier 2010). Un bon sol présenterait un rapport de sable de 20% de sable très fin, 20% de sable fin, 20% de sable moyen, 20% de sable grossier et 20% de sable très grossier (Lapierre 2011). La proportion de limon et d'argile ne devrait pas dépasser les 10% (Tremblay 2012). Les conditions optimales de croissance de la canneberge sont : un pH acide entre 4 et 5, un climat frais, un sol bien drainé et une fertilisation contrôlée selon le stade de croissance (Eck 1990). Cette culture permet de valoriser les sols les plus pauvres au Québec. Étant une plante pérenne qui peut vivre une centaine d'années, les

sols sont recouverts de façon permanente et ne sont jamais mis à nu (Poirier 2010). En sol sableux, la majorité des racines se retrouvent dans les dix premiers centimètres de sol (Davenport & DeMoranville 1993).

En complément, il est maintenant bien établi que *V. macrocarpon* possède de nombreuses vertus santé. Elle dispose notamment de pro-anthocyanidines qui ont un effet anti-adhérent sur les bactéries (Poirier 2010) contribuant à la lutte contre les organismes responsables des ulcères, des maladies des gencives et des infections urinaires (AAC 2015). La canneberge contribue également à la santé cardiovasculaire en réduisant les taux sanguin de cholestérol et ses propriétés anti-inflammatoires jouent un rôle dans la promotion de la santé en général (AAC 2015).

1.1.2 *Vaccinium macrocarpon* Ait. au Québec

La culture de la canneberge est assez récente au Québec. Elle est apparue dans les années 1930 et a véritablement débuté dans les années 1980. En 1994, l'Association des producteurs de canneberges du Québec (APCQ) a été créée pour défendre et promouvoir les intérêts des producteurs de canneberges du Québec, auprès du public, des organismes et des instances gouvernementales (Poirier 2010). Ces dernières années, la culture de la canneberge a connu une croissance soutenue. De nombreux nouveaux producteurs ont été attirés par les prix intéressants et leur nombre est passé de 40 en 2004 à 84 en 2014 (APCQ 2014). Au Québec, la région Centre-du-Québec demeure une région de prédilection pour l'implantation de nouvelles cannebergières, suivie par les régions de Lanaudière, de la Côte-Nord, du Lac-Saint-Jean, de la Mauricie et des Maritimes (Poirier 2010). En 2015, le Québec s'est hissé au 1^{er} rang mondial pour son volume de production de canneberges biologique et au 2^{ème} rang pour son volume total de canneberges (productions conventionnelles et biologiques), précédé par l'État du Wisconsin aux États-Unis (APCQ 2015). La superficie totale de la culture de canneberges au Québec est passée de 3717 acres en 2005 à 9789 acres en 2014. De même, le volume total des récoltes de canneberges est passé de 24 945 T en 2005 à 109 566 T en 2014 (APCQ 2014). Au Québec, l'implantation d'un champ de canneberges coûte en moyenne \$ 42 000 CAD par acre (Poirier 2010).

Les champs de notre partenaire Canneberges Bieler au Québec au Site 1 près de Manseau et au Site 2 près d'Alma, Qc, Canada se retrouvent sur différentes séries de sol, présentées dans le Tableau 1 (Rompre et al. 1984) et (Raymond et al. 1965) :

Tableau 1 Séries de sol retrouvées dans les champs de canneberges du partenaire Canneberges Bieler, Québec, Canada

Abréviation	Nom de la série	Type de sol	Drainage
Site 1			
Vy	Villeroy	Sable mince sur till	Drainage bon à modérément bon
Dt	Dosquet	Dépôts de tills	Drainage bon à modérément bon
Ma	Mawcook	Dépôts de tills	Dainage mauvais à très mauvais
Ro	Rosaire	Sable graveleux	Drainage excessif à bon
Pi	Des Pins	Dépôts de tills	Drainage modérément bon à imparfait
Sp	Sainte-Sophie	Sable	Drainage bon à excessif
Sm	Saint-Samuel	Sable	Drainage très mauvais
J	Saint-Jude	Sable	Drainage imparfait à modérément bon
Site 2			
	Marécages	Sur argiles, limons, sables, saturés d'eau	Drainage très mauvais
T/S	Tourbes	Accumulations tourbeuses sur sables ou limons sableux ou sables limoneux	Drainage très mauvais
D	Dunes	Dépôts récents éoliens sables très fins	Drainage excessif
Lf	Série l'Afrique	Dépôts éoliens sables très fins	Drainage bon

1.1.3 L'importance de l'eau dans une cannebergière : une régie d'irrigation optimale ne peut être appliquée qu'en présence d'un système de drainage adéquat

Contrairement à la croyance populaire, la canneberge ne pousse pas dans l'eau et sa croissance n'en nécessite que très peu. Cependant, au printemps et à l'automne, les champs sont arrosés pour les protéger du gel. Durant la saison de végétation, l'irrigation sert à prévenir les stress hydriques pendant les périodes très sèches et les champs sont inondés durant les récoltes pour faciliter la cueillette mécanique des fruits. Le besoin le plus critique en eau se manifeste au moment de l'inondation hivernale (Poirier 2010), pour la protection contre la dessiccation en présence de températures froides et de grands vents (Tremblay 2012). L'eau peut également être utilisée comme moyen de lutte contre des maladies ou des invasions d'insectes ravageurs (Sandler & DeMoranville 2008). Les pratiques d'aménagement évoluent avec un souci de protection de l'environnement touchant plus particulièrement la gestion de l'eau. Les plans d'aménagement sont conçus de façon à

limiter la consommation d'eau et à obtenir un meilleur contrôle des réserves d'eau (Tremblay 2012). Les étapes de la préparation du terrain sont : le creusage des canaux de drainage, le défrichage, le décapage, la construction des digues, la confection des bassins, le creusage des canaux d'irrigation, l'installation des structures de contrôle de nappe phréatique de l'irrigation souterraine et finalement la construction des réserves d'eau. L'idéal est d'avoir 1.2 m de sable avec une granulométrie permettant une percolation rapide de l'eau. Les productions de canneberges sont moins bonnes dans un sol humide et donnent de meilleurs rendements dans les sols secs; un bon drainage est donc essentiel à cette production (Tremblay 2012).

La production en circuit fermé permet de limiter la consommation d'eau nécessaire à la culture de la canneberge. La consommation annuelle d'eau d'une exploitation aménagée en circuit fermé est estimée entre 13 000 et 16 000 m³ ha⁻¹, sans compter l'apport d'eau annuel en précipitation. Ces chiffres représentent une efficacité d'utilisation de l'eau de 60 à 75%. En tenant compte de la pluviométrie et du fait que l'eau est remise en circulation de façon efficace, il est possible de considérer que la réserve en eau suffisante est de 8000 m³ ha⁻¹ année⁻¹ (Tremblay 2012). Afin de réduire les quantités d'eau utilisées tout en maintenant ou en augmentant le rendement, l'optimisation de la gestion de l'eau pendant la saison de croissance est primordiale. Cette optimisation de la gestion de l'eau va de pair avec l'optimisation des systèmes d'irrigation et de drainage. Une régie d'irrigation optimale ne peut être appliquée correctement qu'en présence d'un système de drainage adéquat et opérationnel.

Il existe deux types d'irrigation sur les exploitations : (a) l'irrigation dite 'de surface' qui fait remonter la nappe phréatique (utilisée pour l'inondation, la glaciation et la récolte) et (b) l'irrigation dite 'par aspersion' (utilisée pour combler les besoins ponctuels en eau, refroidir les plants lors des grandes chaleurs et créer en début et fin d'hiver une protection contre le gel) (Tremblay 2012). Lorsque les précipitations sont insuffisantes pour combler les besoins en eau de la culture pendant la saison de croissance, l'irrigation par aspersion est utilisée (Sandler et al. 2004).

Suite à l'aménagement du terrain, des fossés de drainage de 60 cm de profondeur encerclant l'ensemble des bassins de culture doivent être creusés. Ces fossés forment un canal de drainage qui se déverse dans le réservoir de récupération. Un système de drainage souterrain complète le réseau et permet le contrôle de la hauteur de la nappe phréatique dans les bassins (Tremblay 2012). La conception du système de drainage devrait permettre d'atteindre une vitesse de rabattement de nappe attendue (Tableau 2). La largeur d'écartement des drains est évaluée en fonction de la

conductivité hydraulique du sol et de la profondeur de la couche de sol imperméable. Les drains doivent être enrobés d'une gaine filtrante afin d'éviter le colmatage et la sédimentation de particules de sable dans le drain (Tremblay 2012).

Tableau 2 Liste des vitesses de rabattement de la nappe, attendues, en fonction des références

Date	Référence, cité par	Rabattement	Vitesse
1949	(Kidder & Lytle 1949),(Cox & McFarlane 1995)	30 cm/24 h ou 50 cm/48 h	Entre 1.0 cm h ⁻¹ et 1.25 cm h ⁻¹
1978	Norme CPVQ, (Asselin 1980)	30 cm/24 h	1.25 cm h ⁻¹
1984	Norme CPVQ pour les sondes de pression, (Pelletier 2012)	30 cm à 50 cm/24 h	Entre 1.25 cm h ⁻¹ et 2.1 cm h ⁻¹
1996	(Smedema et al. 1996)	30 cm en 24 h à 48 h	Entre 0.625 cm h ⁻¹ et 1.25 cm h ⁻¹
2007	(FAO 2007)	40 cm en 6 h à 12 h	Entre 3.3 cm h ⁻¹ et 6.7 cm h ⁻¹
2012	(Pelletier 2012) Norme pour les tensiomètres	40 cm en 24 h à 48 h	Entre 0.8 cm h⁻¹ et 1.7 cm h⁻¹
2014	(Pelletier 2014)	40 cm en 1 h à 24 h	Entre 0.8 cm h ⁻¹ et 40 cm h ⁻¹

Pour nos expériences, c'est la norme de vitesse de 40 cm en 24 h à 48 h, soit une vitesse attendue entre **0.8 cm h⁻¹ et 1.7 cm h⁻¹** qui a été retenue (Pelletier 2012) pour les raisons suivantes : (1) les sites d'études étaient sur la même ferme que (Pelletier 2012) et (2) la vitesse de rabattement de la nappe est également calculée à partir de mesures d'hauteur d'eau équivalente obtenues par tensiométrie.

L'efficacité d'un système de drainage peut influencer plusieurs paramètres de croissance de la canneberge. Un sol gorgé d'eau et mal aéré diminue la capacité des plantes à prélever les nutriments dans le sol et augmente les maladies racinaires. À l'inverse, un sol drainé efficacement favorise la profondeur d'enracinement, la productivité et l'efficacité des fertilisants (Sandler & DeMoranville 2008). Il est alors important de bien comprendre la relation entre la profondeur de la nappe et le potentiel matriciel de l'eau dans le sol, parfois appelé tension de l'eau dans le sol, au niveau de la zone racinaire (Juneau et al. 2009). En l'absence de nappe perchée, la tension de l'eau dans le sol est reliée à la profondeur de la nappe. Il a été démontré que la relation entre le potentiel

matriciel dans la mi-zone racinaire (environ 10 cm de profondeur) et la différence d'élévation entre cette zone et la nappe se rapproche d'une relation théorique linéaire. Pour chaque 10 cm d'éloignement entre la nappe et la mi-zone racinaire, il y a une diminution du potentiel matriciel de 10 cm (-1 kPa) (Juneau et al. 2009). Pour amener le potentiel à -5.0 kPa aux alentours des racines après saturation du profil, il faut ainsi rabattre la nappe à 60 cm sous la surface (50 cm sous la couche d'enracinement) (Juneau et al. 2009).

De précédents travaux de recherche ont mis en évidence la grande sensibilité de la canneberge aux variations de potentiel matriciel de l'eau dans le sol (Bonin 2009). La gamme optimale de potentiel matriciel pour la croissance des plants se situe entre -3.0 (Laurent 2014; Bonin 2009) et -7.5 kPa (Pelletier et al. 2015a; Pelletier et al. 2013), dans des conditions retrouvées au Québec ou au Wisconsin (Pelletier 2013). Il a été montré que pour de meilleurs rendements et une moindre utilisation de l'eau, l'irrigation par aspersion des champs de canneberges devait être lancée quand le potentiel matriciel du sol se situait entre -7.0 et -8.0 kPa (Pelletier 2013). En conditions de subirrigation, une profondeur de nappe de 60 cm permet de maximiser le rendement, la teneur en sucre des fruits, le nombre total de fruits et le nombre de fruits par 'upright' (Pelletier et al. 2015b). À la suite de tests de submersion en environnement contrôlé sur des plants de canneberges, il a été montré que la photosynthèse déclinait de 28% après une journée de submersion et de 46% après le cinquième jour, durant le stade d'allongement des bourgeons (Pelletier et al. 2015c).

Il est donc très important de mettre en place une méthode de diagnostic des problèmes de drainage rapide et efficace, pour que les plants de canneberges restent au maximum de leur productivité et que le sol fournisse l'eau dans une gamme optimale de potentiel matriciel pour la canneberge.

1.2 Les potentiels de l'eau dans le sol

Le paramètre qui permet de décrire et de prévoir les transferts d'eau dans le sol est le potentiel de l'eau, représentant la quantité d'énergie contenue dans une quantité unitaire d'eau (J kg^{-1}).

1.2.1 Les potentiels de l'eau dans le sol

L'état énergétique de l'eau dans le sol peut se décomposer en énergie potentielle de position dans un champ de force et en énergie cinétique due à la vitesse de déplacement du liquide. Cette dernière est négligeable devant le terme d'énergie potentielle dans les sols. Il est ainsi considéré que l'énergie potentielle ou « potentiel » suffit à décrire l'état énergétique de l'eau dans le sol (Lal & Shukla 2004; Bruand & Coquet 2005).

Le potentiel total de l'eau (φ_T) correspond au travail nécessaire pour déplacer de façon réversible une unité de quantité d'eau de l'état énergétique de référence à celui de l'eau dans le volume de sol considéré. À l'équilibre, le potentiel total de l'eau est identique en tout point de l'espace. Toute variation dans l'espace du potentiel de l'eau entraînera un déplacement de l'eau dans le sens des potentiels décroissants (Bruand & Coquet 2005).

Dans le sol, l'eau est soumise au champ de force lié à la gravité et à des interactions dues aux phases solides et gazeuses ainsi qu'à la présence de solutés dans la phase liquide. Le potentiel total (φ_T) est représenté par la somme du potentiel tensiométrique (φ_t), du potentiel osmotique (φ_s) et du potentiel gravitationnel (φ_z) (Musy & Soutter 1991) :

$$\varphi_T = \varphi_t + \varphi_s + \varphi_z \quad [1.1]$$

Lorsque la concentration de sels dans la solution du sol est faible, le potentiel osmotique est négligeable et le potentiel total peut alors être exprimé comme suit :

$$\varphi_T = \rho gh + \rho gz \text{ [Pa]} \quad [1.2]$$

où ρ (1000 kg m^{-3}) représente la masse volumique de l'eau, g (9.81 m s^{-2}) la constante gravitationnelle, h (m) la charge de pression et z (m) la charge de gravité. Le potentiel gravitationnel représente la distance verticale séparant un point donné d'un point de référence (Lal & Shukla 2004).

Le potentiel total de l'eau peut aussi être décrit par la notion de charge hydraulique totale H , qui est définie par :

$$H = h + z \text{ [cm]} \quad [1.3]$$

L'état de pression de l'eau dans le sol est différent selon que le sol soit saturé ou non saturé en eau. Il est possible de distinguer deux types de potentiel tensiométrique : le potentiel de pression hydrostatique et le potentiel matriciel (Bruand & Coquet 2005). Lorsque le sol est saturé, l'eau est soumise à la pression exercée par la colonne d'eau qui la surmonte au point considéré. Le potentiel de pression hydrostatique est alors positif et correspond à la hauteur de la colonne d'eau (Bruand & Coquet 2005) ; il peut être mesuré à l'aide d'une sonde de pression insérée dans un puits. Lorsque le sol n'est pas saturé, il existe des forces de tension superficielle aux interfaces entre les phases gazeuse, liquide et solide. Les forces d'adsorption exercées par les particules de sol y retiennent l'eau. Ce potentiel matriciel dans un sol non saturé est toujours négatif (Bruand & Coquet 2005) et peut être mesuré par un tensiomètre (en kPa). Lorsque le sol s'assèche, la valeur du potentiel matriciel diminue (-5kPa sol humide et -100kPa sol sec) et augmente lorsque le sol s'humidifie (Pelletier 2013).

1.2.2 Le tensiomètre et la sonde de pression

Le tensiomètre (ici, HXM-80 Hortau, Lévis, Québec, Canada) est un instrument de mesure qui permet d'obtenir la force avec laquelle l'eau est retenue par les particules de sol et les interstices entre celles-ci, c'est-à-dire le potentiel matriciel. Le tensiomètre comporte une bougie poreuse en céramique qui est remplie d'eau avant d'être insérée dans le sol (Bonin 2009). L'eau dans la céramique se retrouve ainsi en contact avec l'eau du sol et un équilibre est atteint à travers les pores de la céramique (Pelletier 2013). Lorsque le sol est saturé en eau, l'eau de la bougie poreuse y demeure car la tension exercée est nulle. Lorsque le sol s'assèche, l'eau tend à sortir de la bougie car les particules de sol exercent une tension sur l'eau à l'intérieur du tensiomètre. La tension résultante est proportionnelle à la profondeur de la nappe lorsque l'eau du sol forme un continuum, jusqu'à la nappe et que la vitesse de remontée capillaire de l'eau est plus grande que le taux d'évapotranspiration (Bonin 2009). Les nouvelles sondes de pression développées par Hortau® (ici, HXM Hortau, Lévis, Québec, Canada) seront testées ici.

1.3 Les paramètres des modèles de drainage

Les modèles de drainage souterrain peuvent être classifiés selon deux régimes d'écoulement : le régime permanent et le régime variable ou transitoire. Le régime permanent existe lorsque la nappe est stable, le débit de drainage étant en équilibre avec la réalimentation de la nappe. Le régime variable existe lorsque la nappe fluctue en fonction de son alimentation par les précipitations (Dieleman & Trafford 1976; Lagacé 2013). La situation en régime permanent n'est

pas facilement satisfaite mais sera cependant effective lorsque les systèmes d'irrigation par gicleurs sont utilisés ou pendant des périodes de pluie soutenue (Dieleman & Trafford 1976). Les modèles en régime variable existent principalement pour décrire le rabattement de la nappe après une précipitation (Lagacé 2013).

Les paramètres importants des systèmes de drainage qui sont souvent nécessaires aux calculs d'efficacité de ces systèmes sont les suivants : la profondeur des drains d (m), la profondeur de sol perméable sous les drains Z (m), l'écartement entre les drains E (m), le rayon du drain r (m), les conductivités hydrauliques des couches de sol au-dessus et au-dessous des drains K_1 et K_2 ($m\ j^{-1}$), la porosité de drainage, l'évolution de la hauteur de la nappe au-dessus des drains h (m), le débit unitaire du drain q ($m\ j^{-1}$).

1.3.1 Le régime permanent

Le modèle de Hooghoudt pour le régime permanent est basé sur l'hypothèse de Dupuit-Forcheimer et son développement est le suivant (Lagacé 2013):

$$\vec{q}_x \approx -K_x \frac{dh}{dx} \quad [1.4]$$

Où q est le débit unitaire du drain ($m\ j^{-1}$), K est la conductivité hydraulique de la couche de sol ($m\ j^{-1}$) et h est la hauteur de la nappe au-dessus du niveau d'eau dans le drain et à une distance x de l'origine des axes (à mi-chemin entre deux drains) (m).

Après intégration il est possible d'en retirer trois équations importantes (Dieleman & Trafford 1976; Lagacé 2013):

L'écartement E attendu entre deux drains:

$$E(m) = 4 \frac{Kh^2}{q} + 8 \frac{Kdh}{q} \quad [1.5]$$

Le débit unitaire q_i (débit par mètre de drain) :

$$q_i (m\ j^{-1}) = 4 \frac{Kh^2}{E} + 8 \frac{Kdh}{E} \quad [1.6]$$

Le débit d'infiltration q_c (coefficient de drainage) :

$$q_c \text{ (m j}^{-1}\text{)} = \frac{q_i}{E} \quad [1.7]$$

Les critères de design sont des objectifs de performances à atteindre. Dans le cas du régime permanent, le coefficient de drainage q_c est fixé pour une hauteur de nappe au-dessus des drains de sorte que la zone des racines ne soit pas saturée. Dans les climats humides, il est courant de fixer un coefficient de drainage de 9 à 12 mm j^{-1} pour une nappe à 30 cm de la surface du sol. Dans les sols irrigués, les coefficients de drainage varient de 2 à 6 mm j^{-1} pour des nappes à plus de 60 cm de profondeur (Lagacé 2013).

1.3.2 Le régime variable

Le modèle de Guyon (Guyon 1966; Guyon 1972) pour le régime variable, pour des nappes rabattues par tranchées drainantes a été construit avec les hypothèses suivantes : la loi de Darcy est valide, la sol est homogène et isotrope, les tranchées drainantes sont remblayées par des éléments grossiers et se comportent comme des fossés à ciel ouvert, le sous-sol imperméable est horizontal et l'écoulement est plan.

Les équations suivantes sont obtenues (Dieleman & Trafford 1976; Lagacé 2013) :

Le débit au drain $q(h)$ en fonction de la hauteur de la nappe à mi-chemin entre les deux drains entre le temps 0 et le temps t:

$$q(h) \text{ (m}^2 \text{ j}^{-1}\text{)} = 2 \frac{P K}{N E} h^2(0, t) + 4 \frac{P K}{N E} dh(0, t) \quad [1.8]$$

Où $q(h)$ est le débit unitaire en fonction de la hauteur de la nappe ($m^2 j^{-1}$), $h(0,t)$ est la hauteur de la nappe au-dessus du niveau d'eau dans le drain au temps t et à la distance $x=0$ de l'origine des axes (à mi-chemin entre deux drains) (m), t est le temps (j), K est la conductivité hydraulique du sol ($m j^{-1}$), E est l'écartement entre les lignes de drains (m), d est la profondeur dans le fossé (m) et P et N sont des coefficients adimensionnels dépendant de la forme de la nappe.

Le temps de rabattement t_1 de la nappe entre le temps 0 et 1:

$$t_1(j) = \frac{N \mu E^2}{4 K d} \ln \left[\left(\frac{2d + h_1}{2d + h_0} \right) \frac{h_0}{h_1} \right] \quad [1.9]$$

où μ est la porosité de drainage.

L'écartement E entre les drains :

$$E(m) = \frac{4 Kd}{N \mu} \frac{t_1}{\ln \left[\left(\frac{2d + h_1}{2d + h_0} \right) \frac{h_0}{h_1} \right]} \quad [1.10]$$

Dans le cas du régime variable, les facteurs ayant une influence lors du design d'un système de drainage sont la profondeur des drains et le taux de rabattement de la nappe phréatique (Lagacé 2013).

En périodes humides, les meilleurs rendements des cultures en général sont obtenus en maintenant les nappes basses, à plus de 1.0 m de profondeur. En périodes sèches, les meilleurs rendements sont obtenus en maintenant les nappes de 60 à 70 cm de la surface du sol pour la majorité des plantes cultivées. La profondeur minimale de la nappe doit permettre la circulation des machines et est reconnue comme devant être supérieure à 50-60 cm de profondeur. Compte tenu qu'il doit y avoir un gradient hydraulique entre cette nappe et le drain pour qu'elle atteigne rapidement cette profondeur, la profondeur minimale des drains recommandée est de 90 cm (Lagacé 2013). La profondeur maximale des drains est contrôlée par la profondeur maximale à laquelle les machines peuvent installer les drains. Au Québec, la profondeur maximale généralement acceptée est de 1.50 m. Au Québec, les drains sont généralement installés à des profondeurs de 1.0 à 1.2 m de profondeur (Lagacé 2013). Concernant le taux de rabattement de la nappe phréatique, se référer au Tableau 2, et notamment à la norme de **0.8 cm h⁻¹ et 1.7 cm h⁻¹** qui a été retenue (Pelletier 2012).

1.4 Les différentes causes de mal fonctionnement des systèmes de drainage souterrain

Les causes de mauvais fonctionnement des systèmes de drainage vont des plus simples, liées directement au système de drainage (mauvaise pose, mauvais design de base, manque de normes codifiées), aux plus complexes, liées à la dynamique de l'eau dans le sol et sont présentées dans le tableau 3.

Mais également, et pour conclure cette liste on retrouve l'absence de mesures incitant les exploitants agricoles à bien connaître et à utiliser correctement leurs systèmes de drainage (Smedema et al. 1996; Gaaloul 1996; Knops et al. 1996).

Tableau 3 Les différentes causes de mal fonctionnement des systèmes de drainage souterrain

Les causes de mal fonctionnement liées au sol et à l'environnement	Les causes de mal fonctionnement liées au système de drainage		
Une préparation initiale du sol inadéquate (Smedema et al. 1996)	Liées à un mauvais design de base	Liées à la pose du système de drainage	Autres
La présence de dépression dans le champ (Lagacé 2014)	Un écartement trop grand entre les drains (Bouthillier-Grenier 2013; Savoie 2014; Lamarre 2014; Gaaloul 1996; Lagacé 2014) ou un nombre drains inadéquats (Pelletier 2012)	Une mauvaise pose des drains , des méthodes de pose déficientes ou une pose dans des conditions trop humides conduisant à un drain brisé, écrasé ou étiré (Lamarre 2014; Savoie 2014; Gaaloul 1996; Smedema et al. 1983; Lagacé 2014)	Un drain en colmatage interne (Lamarre 2014; Gaaloul 1996; Smedema et al. 1983; Lagacé 2014)
La présence d'une couche de labour compacte, d'un horizon induré (Lagacé 2014; Bouthillier-Grenier 2013; Lamarre 2014; Smedema et al. 1983)	Un collecteur sous-dimensionné (Savoie 2014; Lamarre 2014; Lagacé 2014)	L'utilisation de matériaux inadéquats, peu optimaux (Smedema et al. 1996)	Un drain en colmatage externe (Smedema et al. 1983; Lagacé 2014) ou une mauvaise enveloppe textile (Eissa et al. 1996) ou une enveloppe textile oubliée (Smedema et al. 1983)
La présence d'une couche imperméable plus haute que prévue dans le profil de sol (Smedema et al. 1983)	Une mauvaise orientation des drains selon la pente (Lamarre 2014; Savoie 2014; Gaaloul 1996)	Un mauvais raccordement entre les drains ou entre les drains et le collecteur (Lamarre 2014; Gaaloul 1996)	Un drain installé dans une tranchée devenue quasiment imperméable (Lagacé 2014)
La présence d'une couche imperméable très profonde causant un drainage excessif (Pelletier 2012)	Une conductivité hydraulique surestimée (Smedema et al. 1983)		
Un sol gelé (Lagacé 2014)	Un drain installé trop proche de la surface du sol (Bouthillier-Grenier 2013; Savoie 2014; Lamarre 2014; Gaaloul 1996; Lagacé 2014)		
Un cours d'eau peu profond avec la sortie des drains sous le niveau de l'eau (Lagacé 2014)	Un drain installé dans un horizon imperméable ou de faible conductivité hydraulique (Lagacé 2014)		
Un enherbement des fossés (Gaaloul 1996) ou des fossés trop peu profonds (Smedema et al. 1983)	Un coefficient de drainage sous-estimé (Smedema et al. 1983)		
Un problème au niveau de l'exutoire du drain (Lamarre 2014; Potvin 2008; Gaaloul 1996)			

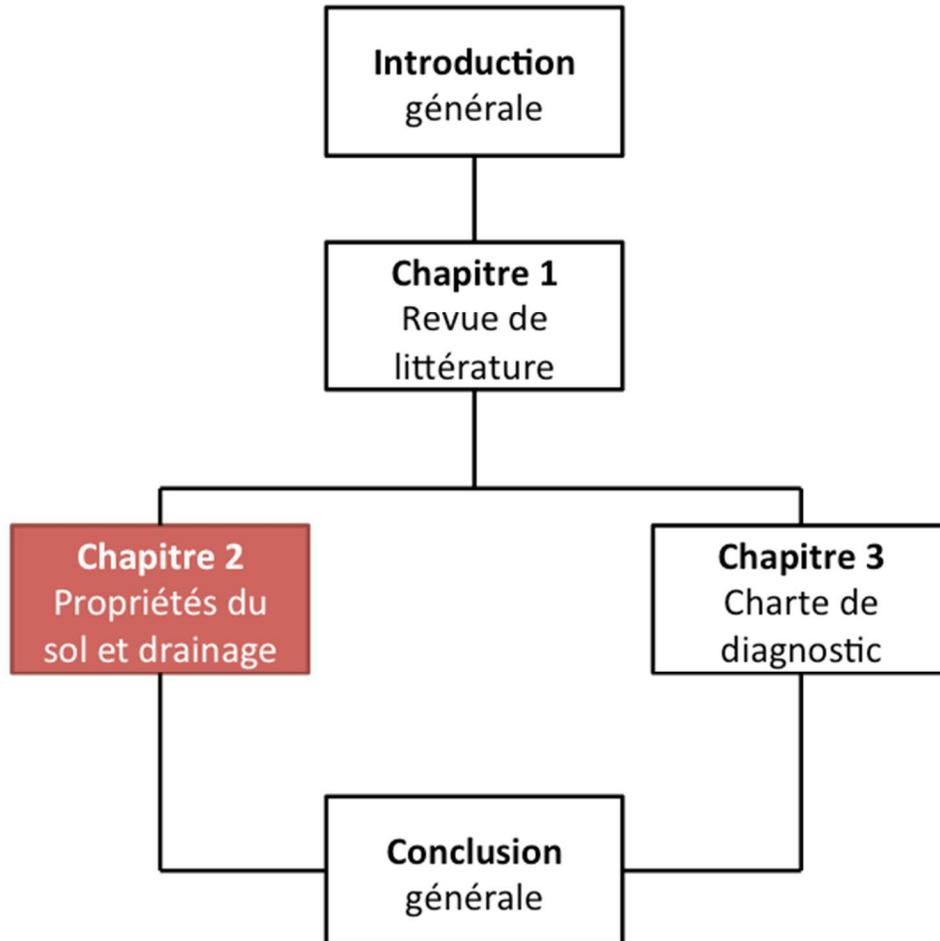
Bibliographie

- AAC, 2015. Canneberge canadienne. *Agriculture et agroalimentaire Canada*. Available at: <http://www.agr.gc.ca/fra/industrie-marches-et-commerce/aide-a-l-exportation-a-l-importation-et-a-l-achat/acheter-des-produits-canadiens/canneberge-canadienne/?id=1426172190727>.
- AAC, 2013. Vaccinium macrocarpon Ait. (Canneberge à gros fruit). *Agriculture et agroalimentaire Canada*. Available at: <http://www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/publications-scientifiques-et-ressources/ressources/cultures-medicinales-canadiennes/cultures-medicinales/vaccinium-macrocarpon-ait-canneberge-a-gros-fruit/?id=1301436717750>.
- APCQ, 2015. Partenariat transpacifique (PTP) : Un accord espéré pour le secteur de la canneberge. Available at: <http://www.notrecanneberge.com/APCQ-Publications/Revue-de-presse/partenariat-transpacifique-ptp-un-accord-espere-pour-le-secteur-de-la-canneberge.html>.
- APCQ, 2014. *Statistiques de la culture de la canneberge au Québec*, Available at: <http://www.notrecanneberge.com/Industrie/Infos/statistiques.html>.
- Asselin, R., 1980. *Analyse de l'efficacité de deux réseaux de drainage souterrain de la région de Nicolet*. Université McGill, Montréal, Québec, Canada.
- Baumann, T.E. & Eaton, G.W., 1986. Competition among berries on the cranberry upright. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 111(6), pp.869–872.
- Bonin, S., 2009. *Régie agroenvironnementale de l'irrigation dans la production de canneberges (Vaccinium macrocarpon Ait.)*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Bouthillier-Grenier, V. (Clubs conseils en agroenvironnement), 2013. *Diagnostic drainage souterrain et étude de cas.*,
- Bruand, A. & Coquet, Y., 2005. Les sols et le cycle de l'eau. *Science du Sol et Environnement*, (1), pp.1–23. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00090203/>.
- Cox, J.W. & McFarlane, D.J., 1995. The causes of waterlogging in shallow soils and their drainage in southwestern Australia. *Journal of Hydrology*, 167(1-4), pp.175–194.
- Davenport, J.R. & DeMoranville, C.J., 1993. A survey of several soil physical characteristics of cultivated cranberry bob soils in North America. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 24((13-14)), pp.1769–1773.
- Demoranville, C., 2006. Cranberry best management practice adoption and conservation farm planning in Massachusetts. *Hort Technology*, 16(September), pp.393–397.
- Dieleman, P.J. & Trafford, B.D., 1976. *Drainage Testing*. *FAO Irrigation and Drainage paper no. 28*. Food and Agricultural Organization, ed., Rome, Italy.
- Eck, P., 1990. *The american cranberry* Rutgers University Press.

- Eissa, M., Hoogenboom, P. J., Abdel Ghany, M. & Tahun, A., 1996. Determination of q-h relations of field drains under Egyptian conditions. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- FAO, 2007. Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems. In p. 233.
- Gaaloul, N., 1996. Evaluation of drainage systems in the lower Medjerda valley, Tunisia. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Guyon, G., 1966. *Considérations sur l'hydraulique du drainage des nappes*, Antony, France.
- Guyon, G., 1972. Les formules de l'hydraulique des nappes rabattues par tranchées drainantes. *Bulletin technique d'information*, 271-272 (Ministère de l'agriculture, France), pp.859–865.
- Juneau, V., Caron, J. & Gallichand, J., 2009. Évaluation de l'efficacité des systèmes de drainage dans la production de canneberges. , p.37.
- Kidder, E.H. & Lytle, W.F., 1949. Drainage investigations in the plastic till soils of northern Illinois. *Agricultural Engineering*, 30, pp.384–386.
- Lagacé, R., 2014. Drainage Chapitre 13 L'identification des problèmes de drainage. In Université Laval.
- Lagacé, R., 2013. Drainage Chapitre 7 Les modèles de drainage souterrain. In Université Laval.
- Lal, R. & Shukla, M.K., 2004. *Principles of soil physics* M. Dekker, ed., New York.
- Lamarre, G., 2014. Améliorer l'égouttement. *Fiche technique*, (MAPAQ).
- Lapierre, H., 2011. *Compte rendu de l'activité de transfert de connaissances sur l'aménagement d'une cannebergière sur sable du 18 mai 2010*,
- Laurent, T., 2014. *Réponse de la canneberge (Vaccinium macrocarpon Ait.) à l'aération du sol*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Marie-Victorin, F., Rouleau, E. & Brouillet, L., 2002. *Flore laurentienne 3ème édition* G. Morin, ed., Montréal, Québec, Canada.
- Musy, A. & Soutter, M., 1991. *Physique du sol, 1ère édition* Presses po., Lausanne.
- Pelletier, V., Gallichand, J., Caron, J., Jutras, S. & Marchand, S., 2015a. Critical irrigation threshold and cranberry yield components. *Agricultural Water Management*, 56, pp.1325–1332.
- Pelletier, V., Gallichand, J., Gumiere, S. J., Pepin, S. & Caron, J., 2015b. Water Table Control for Increasing Yield and Saving Water in Cranberry Production. *Sustainability*, 7, pp.10602–10619.
- Pelletier, V., Pepin, S., Laurent, T. Gallichand, J. & Caron, J., 2015c. Cranberry gas exchange under short-term hypoxic soil conditions. *HortScience [In review]*.

- Pelletier, V., 2013. *Irrigation de la canneberge basée sur des seuils de tension de l'eau dans le sol*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, Canada.
- Pelletier, V., 2012. Problématique de drainage en production de canneberges. In *INPACQ Canneberges 2012*.
- Pelletier, V., Gallichand, J. & Caron, J., 2013. Effect of soil water potential threshold for irrigation in cranberry yield and water productivity. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 56(6), pp.1325–1332.
- Poirier, I., 2010. La canneberge au Québec et au Centre-du-Québec - Un modèle de développement durable, à la conquête de nouveaux marchés. , p.37.
- Potvin, R., 2008. Aménagement des sorties de drains. *Fiche technique*, (MAPAQ), pp.1–6.
- Raymond, R., Mailloux, A. & Dubé, A., 1965. *Pédologie de la région du Lac-Saint-Jean* MAPAQ, ed.,
- Rompere, M., Laflamme, G., Ouellet, L., Carrier, D., Bubé, J.-C. & Pagé, F., 1984. *Étude pédologique du comté d'Arthabaska* MAPAQ, ed.,
- Sandler, H. & DeMoranville, C., 2008. Cranberry Production: A Guide for Massachusetts. *UMass Amherst Cranberry Station*, p.37. Available at: <http://books.google.com/books?id=U0K4jwEACAAJ>.
- Sandler, H., DeMoranville, C. & Lampinen, B., 2004. Cranberry Irrigation Management. *UMass Amherst Cranberry Station*.
- Savoie, V., 2014. Améliorer le réseau hydraulique, le nivellement et le drainage souterrain d'un champs : des solutions au mauvais rendement. *Fiche technique*, (MAPAQ).
- Smedema, L.K., Abdel Dayen, S. M., Vlotman, W. F., Abdel Aziz, A. & Van Leeuwn, H., 1996. Performance assessment of land drainage systems. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Smedema, L.K., Vlotman, W.F. & Rycroft, D.W., 1983. *Modern land drainage* A. A. Balk.,
- Tremblay, F., 2012. Feuillet technique sur l'aménagement de cannebergières biologiques sur sable. *Agrinova*, pp.1–28.

Chapitre 2 Impact of soil hydrodynamic parameters on drainage efficiency and cranberry yields



Résumé

Contrairement à la croyance populaire, la canneberge ne pousse pas dans l'eau et la gamme de potentiel matriciel de l'eau dans le sol optimale pour la croissance des plants se situe entre -3.0 et -7.5 kPa. Un sol gorgé d'eau et mal aéré diminue la capacité des plants à prélever les nutriments dans le sol et peut augmenter les maladies racinaires. Il est donc primordial d'entretenir un système de drainage efficace afin de maintenir les plants dans un environnement optimal. L'objectif de cette étude était de déterminer l'impact des paramètres hydrodynamiques du sol sur l'efficacité de drainage et le rendement dans la production de canneberges. Durant les étés 2013 et 2014, 960 échantillons de sol intact ont été récoltés sur huit champs, à deux profondeurs, dans la région de Québec et dans la région du Lac-St-Jean (Québec, Canada). Les champs ont également été équipés d'un dispositif expérimental de suivi de la nappe phréatique (puits d'observation, tensiomètres, sondes de pression). Les échantillons de sol ont été analysés en laboratoire afin d'étudier les variabilités spatiales verticale et horizontale des propriétés hydrodynamiques du sol. Les données obtenues de vitesses de rabattement de nappe, de conductivités hydrauliques, de masses volumiques, de porosités, de rendements, de granulométries, de paramètres de rétention en eau, de teneurs en eau du sol ont été analysées à l'aide d'une analyse de cluster et d'une analyse en composantes principales. Ces deux analyses ont permis de mettre en évidence l'importance de la granulométrie et de la teneur en eau du sol sur les rendements, et ultimement sur l'efficacité de drainage. Dans le cadre d'une méthode de diagnostic des systèmes de drainage, il serait alors pertinent de commencer le diagnostic en classant les champs par classes de granulométrie.

Abstract

Efficient drainage systems are essential in the development of precision irrigation methods in cranberry production. Most cranberry fields are equipped with subsurface drainage systems used for water table control and excess water removal. In fact, cranberries are very sensitive to wet conditions with an important decrease in crop yields caused almost exclusively by dysfunctional drainage systems. Previous works have demonstrated that the optimum matric potential for plant growth ranges between -3.0 and -7.5 kPa. The goal is to preserve an effective drainage system in order to maintain cranberries under optimal growth conditions, while minimizing water utilization. The main objective of this study was to find the soil properties that are most influential on drainage efficiency. During the 2013 and 2014 crop seasons, real-time monitoring devices (observation wells, tensiometers, and pressure sensors) were installed in 8 fields (four in Manseau and four in the Lac-St-Jean region, Québec, Canada) in order to monitor the water table. To assess the relationship between drainage efficiency and soil properties, 960 undisturbed soil cores were collected over 8 fields and brought back to the laboratory for hydrodynamic soil properties characterization. Four cases were studied: surface drainage, deep drainage, surface capillary rise and deep capillary rise. Data obtained from water table drawdown, saturated hydraulic conductivity, bulk density, porosity, particle size distribution, water retention parameters and soil water content were analysed using cluster analysis and principal component analysis. These two analyses highlighted the importance of the particle size distribution and soil water content on crop yield and drainage efficiency. As part of a drainage diagnostic, classify fields by granulometry would be appropriate as first assessment of drainage conditions.

2.1 Introduction

Soil drainage may affect many biophysical processes such as plant growth, water transfer, trace gas fluxes and solute transport in soils. Soil drainage is also an environmental component which affects irrigation and soil reclamation, land capacity for agriculture, flood control systems and hydrologic engineering (Kilic 2009; Cialella et al. 1997). In cranberry production, wet conditions as a result of inadequate drainage could lead to increase root rot and fruit rot diseases, inhibition of root development, reduced fruit retention and reduced productivity (Demoranville 2012). Previous works have demonstrated the high sensitivity of cranberries to soil matric potential (Bonin 2009) and that the optimum matric potential for plant growth range between -3.0 (Bonin 2009; Laurent 2014) and -7.5kPa (Pelletier et al. 2013; Pelletier et al. 2015). Starting irrigation in cranberry production is recommended when soil water potential is between -7.0 and -8.0kPa (Pelletier et al. 2013). Efficient drainage systems are essential in the development of precision irrigation methods in cranberry production. The objective is to preserve an effective drainage system in order to maintain cranberries under optimal growth conditions, while minimizing water utilization. Therefore, a good drainage diagnostic method is required.

The overall functioning of a pipe drainage system may be checked by watertable observations (average water table depth, rate of drawdown or water table fluctuations overtime) (Smedema et al. 1996; Gallichand et al. 1996; Eissa et al. 1996). Individual malfunctioning drains are usually identified by observing the drain discharges over time (Dieleman & Trafford 1976; Eissa et al. 1996; Gaaloul 1996) or the collector discharges (Gallichand et al. 1996), as recommended in FAO paper no. 28 (Dieleman & Trafford 1976). Remote sensing data have been used for soil drainage classification. Similarly, few logistic models have been developed for mapping waterlogging or salinity (Vincent et al. 1996) using a LANDSAT-5 Thematic Mapper image (Campling et al. 2002) or from a LANDSAT-7 Enhanced Thematic Mapper image (Kilic 2009). Specifically in cranberry production, the comparative analysis of the soil water tension in the root zone by tensiometers and water table drawdown data from observation wells, coupled with pressure sensors, has been recognized as an effective framework to diagnose drainage systems (Juneau et al. 2009; Pelletier et al. 2013).

Most diagnostic methods are based on drain discharge. In cranberry production, drain outlets are often submerged, therefore inaccessible. It would be more relevant to measure soil properties, which are related to drainage efficiency. Hence, we want to see if the vertical and horizontal spatial variability of the hydrodynamic soil properties influence underground drainage

system efficiency. The main objective of this study was to determine the soil properties that are most influential on crop yields and drainage efficiency.

2.2 Materials and Methods

2.2.1 Experimental sites

During the 2013 and 2014 crop seasons, real-time monitoring instruments (observation wells, tensiometers, and pressure sensors) were installed in 8 fields covering two experimental sites: 4 fields at Manseau (site 1) and 4 fields at Lac-St-Jean region (site 2), Québec, Canada (Figure 2; Table 4).



Figure 2 Location of experimental sites in Canada

Table 4 General information about Site 1 and Site 2

Site	1	2
General information		
Location	Manseau, Québec	Lac St-Jean, Québec
Latitude	46°16'49.87"N	48°49'51.28"N
Longitude	71°57'45.15"W	71°53'01.55"W
Production	Conventional	Conventional
Cultivar	Stevens	Stevens
Average temperatures (°C)		
June	16.5	15
July	19.2	17.5
August	17.8	16.1
September	12.5	10.8
Average precipitation (mm)		
Total	1191	1064
Liquid	901	791
Soil series	Villeroy, Dosquet, Mawcook, Rosaire, Des Pins, Sainte-Sophie, Sainte-Samuel, Sainte-Jude	Wetlands Peatlands l'Afrique Sand Dunes

2.2.2 Water table drawdown

First, subsurface drains were located in each field using a Ground Penetrating Radar (GPR) model SIR 3000 (from Geophysical Survey Systems Inc., Salem, NH, United States). Once drains were located, two transects of observation wells were installed 110 m apart from both ends of the field. Each transect was equipped with three observation wells of 1.5 m-long by 7.6 cm-diameter PVC pipes perforated with 0.025 cm-wide slots, and fitted with stoppers at both ends. A pressure sensor (model HXM, Hortau Inc., Lévis, Canada) was installed in each well, and a tensiometer (model HXM-80, Hortau Inc., Lévis, Canada) was installed in the root zone, i.e. 10 cm below the soil surface, two meters away from each well. Water pressure head and soil matric potential readings were automatically collected in real-time by TX3 dataloggers (Hortau Inc., Lévis, Canada) and visualized through the Irrolis-Web software (www.hortau.com, Lévis, Canada) every 15 minutes. Figure 3 shows the water table monitoring setup.

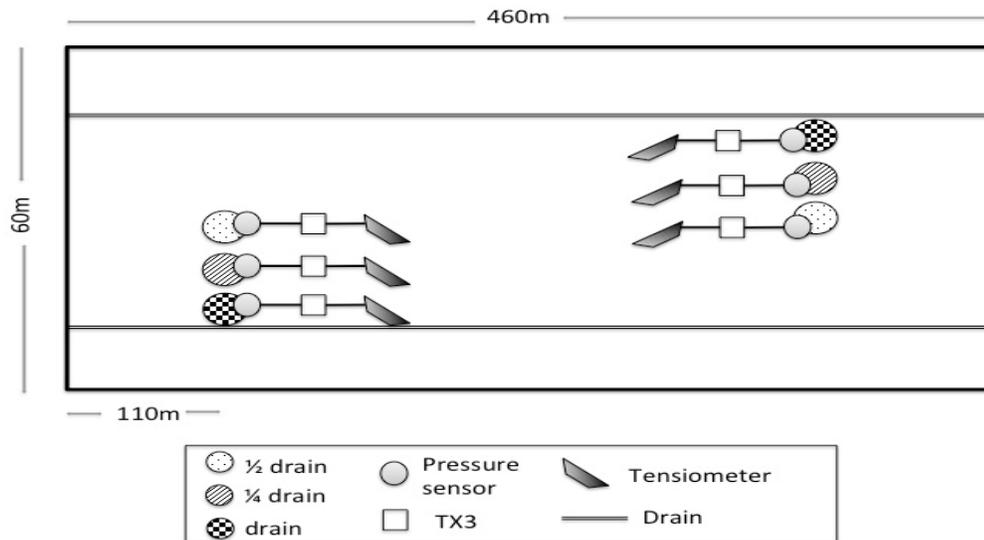


Figure 3 Water table monitoring setup

Once instrumented, the fields were submitted to 6 hours of sprinkler irrigation, corresponding to 24 mm of applied water. That was considered as the initial condition for water table drawdown measurements as it saturated the soil surface and offered an important rise of the water table.

The water table drawdown was then calculated using the tensiometer readings (kPa) converted in equivalent water height (cm) in the soil profile, and by measuring the time necessary to lower the water table by 40cm. According to Pelletier (2012), the ideal drawdown is 40 cm within 24 h to 48 h (giving a range of drawdown velocity between 1.7 and 0.8 cm/h) following irrigation or precipitation.

2.2.3 Soil sampling and spatial variability of hydrodynamic properties

Soil sampling

In order to assess the relationship between drainage efficiency and soil properties, 960 undisturbed soil cores were collected over the 8 fields and brought back to the laboratory for hydrodynamic soil properties characterization. For each field, 60 points were selected following a regular pattern for sampling of soil cores (cylinders 5 cm-long \times 6 cm-inner diameter) at 7.5 cm (surface) and 22.5 cm (deep) below surface, for a total of 120 soil cores ($8 \times 120 = 960$ soil cores).

The cylinders, with a cutting edge at the bottom, were pushed into the soil by hand in order to reduce smearing along the edge of the cores and minimize disruption of the soil and sampler. All soil samples underwent a saturated hydraulic conductivity test. Soil cores corresponding to 18 locations (at two depths, for a total of 36 soil cores per field) then also underwent moisture retention measurements. Crop yields were measured just before harvesting using a sampling square of 30 cm by 30 cm.

Saturated hydraulic conductivity

The hydraulic conductivity at saturation was measured using the constant-head method (Elrick et al. 1981; Reynolds 1993). First, soil cores were covered at the bottom with a nylon cloth, after which they were placed on a grill inside an empty tank. Next, the samples were gradually saturated over 24 h and placed in another tank where a constant head was maintained by a Mariotte reservoir while measuring the outflow recovered in a second reservoir with pressure transducers calibrated for measuring water volume (Omega PX26, Laval, Canada). The saturated hydraulic conductivity was then calculated as the steady-state outflow divided by the cross-section area and the hydraulic gradient across the height of the sample using Darcy's equation.

Bulk density, porosity and particle-size analysis

The soil samples were oven dried at 105°C for 24 to 48 h and weighed. Using the volume occupied by the soil in each cylinder, the bulk density (g of dry soil per cm³ of total soil volume) was obtained. Porosity was calculated as one minus the ratio of bulk density to particle density, assuming a particle density of 2.65 g cm⁻³ for the mineral fraction (Verdonck et al. 1978). The particle-size analysis of each sample was performed by a Mastersizer 2000 particle size analyzer, leading to particle-size distribution: D10, D50 and D90. D90 (µm) is the grain size for which 90% of the particles are smaller (10% for D10 et 50% for D50) (Pazdro & Kozerski 1990).

Water retention

Soil water retention characteristics were determined for 36 soil cores per field (18 surface and 18 deep samples). Water-saturated soil samples were placed on glass beads suction tables subjected to gravity potential. A series of static equilibria was established in desorption and thereafter in capillary rise. At each equilibrium level, the volumetric soil water content θ (cm³ cm⁻³) and the related matric head h (cm) were determined. These pairs of measured θ and h values represent data points of the soil water retention curve (Romano et al. 2002).

After obtaining the matric head-water content (h, θ) pairs, we estimated for each sample the parameters of the van Genuchten water retention model in drainage situation and in capillary rise situation. The van Genuchten model is formulated as (van Genuchten 1980):

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + \alpha|h|^n)^{-m} \quad [2.1]$$

where h is the matric head (cm), θ_r is the residual water content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_s is the water content at saturation ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), and α (cm^{-1}), n and m are empirical parameters. Parameter m in the initial equation received an initial value calculated as $1-1/n$ but was treated as an independent parameter in the calibration. Initial values are listed in Table 5. We also obtained $\theta_{-3\text{kPa}}$, $\theta_{-7.5\text{kPa}}$, which are the water contents associated with the optimum irrigation thresholds of matric potential for best cranberry yields.

Table 5 Initial parameter values of the van Genuchten model describing the hydraulic properties of soil samples (Jury et al. 2004)

Parameter	Initial value
Residual water content (θ_r) $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.05
Saturation water content (θ_s) $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.5
van Genuchten shape parameter α cm^{-1}	0.2
van Genuchten shape parameter n	1.2

Soil hydraulic properties were obtained by calibrating the model of van Genuchten (1980) using the optim of R stats library (The R Development Core Team, 2008) and the BFGS quasi-Newton method (Byrd et al. 1995) on retention curves obtained from suction tables. The performance of the fitting was evaluated using the objective function that minimizes the root mean square error (RMSE) of the retention model fitted against the retention data obtained with the suction table, using

$$\text{RMSE}(\hat{\theta}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2}{N}} \quad [2.2]$$

where $\sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2$ is the sum of squared deviation between predicted water content $\hat{\theta}_i$ and observed water content θ_i for N data points.

2.2.4 Statistical analysis

Principal component analysis

We performed a principal component analysis on the soil samples in order to find which soil properties were the most influential on crop yields. Principal component analysis can summarize in a few dimensions, most of the variability of a dispersion matrix of a large number of descriptors. It also provides a measure of the amount of variance explained by the two independent principal axes (Legendre & Legendre 2003). The variables used for this analysis are the physical soil parameters (drainage velocity, bulk density, porosity, particle-size), hydraulic soil parameters (hydraulic conductivity at saturation), yields, parameters of the soil water retention models (van Genuchten θ_r , θ_s , a , n) and the water contents $\theta_{-3\text{kPa}}$, $\theta_{-7.5\text{kPa}}$ (the optimum matric potential range in the root zone for cranberries growth). Two cases were tested: surface drainage (for the surface samples at 7.5 cm) and surface capillary rise (for the surface samples at 7.5 cm).

Cluster analysis

In order to group the soil samples according to their similarities, we performed an agglomerative hierarchical cluster analysis to the soil properties and characteristic curve fitted parameters (Gnatowski et al. 2010). Cluster analysis provides a way to subdivide a set of objects into groups of objects with similar characteristics (i.e., homogenous). The choice of initial number of clusters may be very arbitrary. In this work, we tried to access a proper number of clusters by grouping the samples based on their vertical position in the soil profile and their water flux characteristics. Thus, four cases were tested: surface drainage, deep (or depth) drainage, surface capillary rise, deep capillary rise (for the samples at 7.5 cm-depth and 22.5 cm-depth in drainage and capillary rise cases, respectively) Each of the physical soil parameters (water table drawdown, bulk density, porosity, particle-size), hydraulic soil parameters (hydraulic conductivity at saturation), yields, parameters of the soil water retention models (van Genuchten θ_r , θ_s , a , n) and the water contents $\theta_{-3\text{kPa}}$, $\theta_{-7.5\text{kPa}}$ were logarithmically transformed, centered by subtracting the means of the log-transformed parameters, and subsequently scaled by division through the standard deviation of the log-transformed parameters.

The next step was to calculate the $n \times n$ distance matrix with, for all sample pairs, a measure of dissimilarity defined as

$$d(i,j) = \sqrt{\sum_{m=1}^p (x_{im} - x_{jm})^2} \quad [2.3]$$

where $d(i,j)$ is the Euclidian distance between the i th and j th samples calculated as the square root of the sum of squared differences between i and j for the value x of soil parameters m through p .

Finally, clustering was performed according to the Ward's minimum variance method (Ward 1963). To form clusters, the method minimizes an objective function which is, in this case, the same squared error criterion as that used in multivariate analysis of variance (Legendre & Legendre 2003). This error is calculated as

$$E_k = \sum_{m=1}^p \sum_{i=1}^{n_k} (x_{im} - \hat{x}_{m(k)})^2, i \in k \quad [2.4]$$

where n_k soil samples are assigned to the k th cluster and $\hat{x}_{m(k)}$ is the mean of m soil parameter in the k th cluster. The cluster analysis started with a total of n clusters equal to the number of samples.

The clustering algorithm formed $n-1$ clusters that were most similar in terms of the physicals soil parameters, hydraulic soil parameters, yields, and parameters of the soil retention models. At each progressive iteration, clusters were merged based on a minimum increase in E_k . Slicing the resulting dendrogram at k_c clusters allowed to determine median values for the soil parameters per cluster and subsequently define characteristic water retention curves for the soil samples (Hallema et al. 2015).

2.3 Results and discussion

2.3.1 Water retention model

The van Genuchten water retention model was fitted to the data obtained with the suction table for 238 soil samples. For the surface drainage case the median RMSE is $1.23 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and the average RMSE is $1.75 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. For the deep drainage case the median RMSE is $1.45 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and the average RMSE is $2.39 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. For the surface capillary rise case the median RMSE is $7.42 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and the average RMSE is $1.01 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. For

the deep capillary rise case the median RMSE is $8.54 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and the average RMSE is $1.27 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Table 6).

Table 6 Residual sum of squares for samples with van Genuchten water retention model

	Surface drainage	Deep drainage	Surface capillary	Deep capillary
Median RMSE $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	1.23×10^{-2}	1.45×10^{-2}	7.42×10^{-3}	8.54×10^{-3}
Average RMSE $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	1.75×10^{-2}	2.39×10^{-2}	1.01×10^{-2}	1.27×10^{-2}

2.3.2 Principal component analysis

Figure 4 shows that particle size and crop yield are inversely correlated. It means that there may be a relationship between particle-size distribution and cranberry yield. Also, it could be observed a relationship between crop yields and drainage velocity. Moreover, the water content vectors at -3kPa and -7.5kPa were found near the crop yield vector (Figure 4), which highlighted once more the importance of the soil water content and suction on the growth of cranberry plants, and also confirms the results of Pelletier et al. (2015) and Bonin (2009).

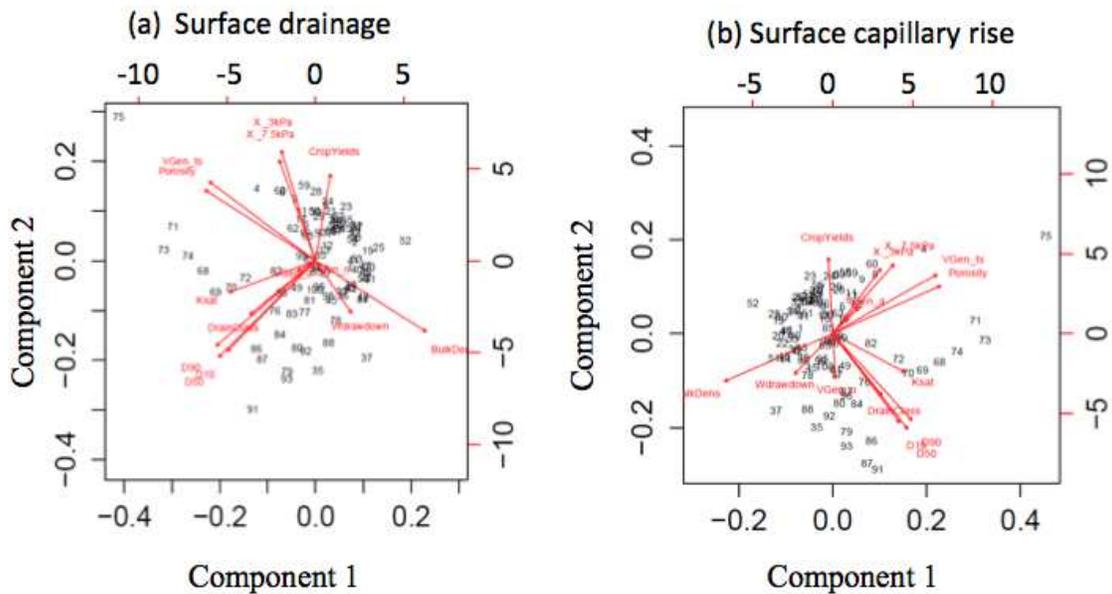


Figure 4 Principal component analysis results for (a) the surface drainage and (b) the surface capillary rise case

2.2.3 Cluster analysis

The agglomerative cluster analysis was performed on the log-transformed parameters of 100 and 101 soil samples from the surface and depth respectively, for which a large number of parameters were known (Table 7). The resulting dendrograms are plotted in figure 5 with the individual soil samples along the x axis and the Euclidian distance between clusters based on the scale values of these soil parameters along the y axis. Number 1 represents Cluster 1, and 2, Cluster2.

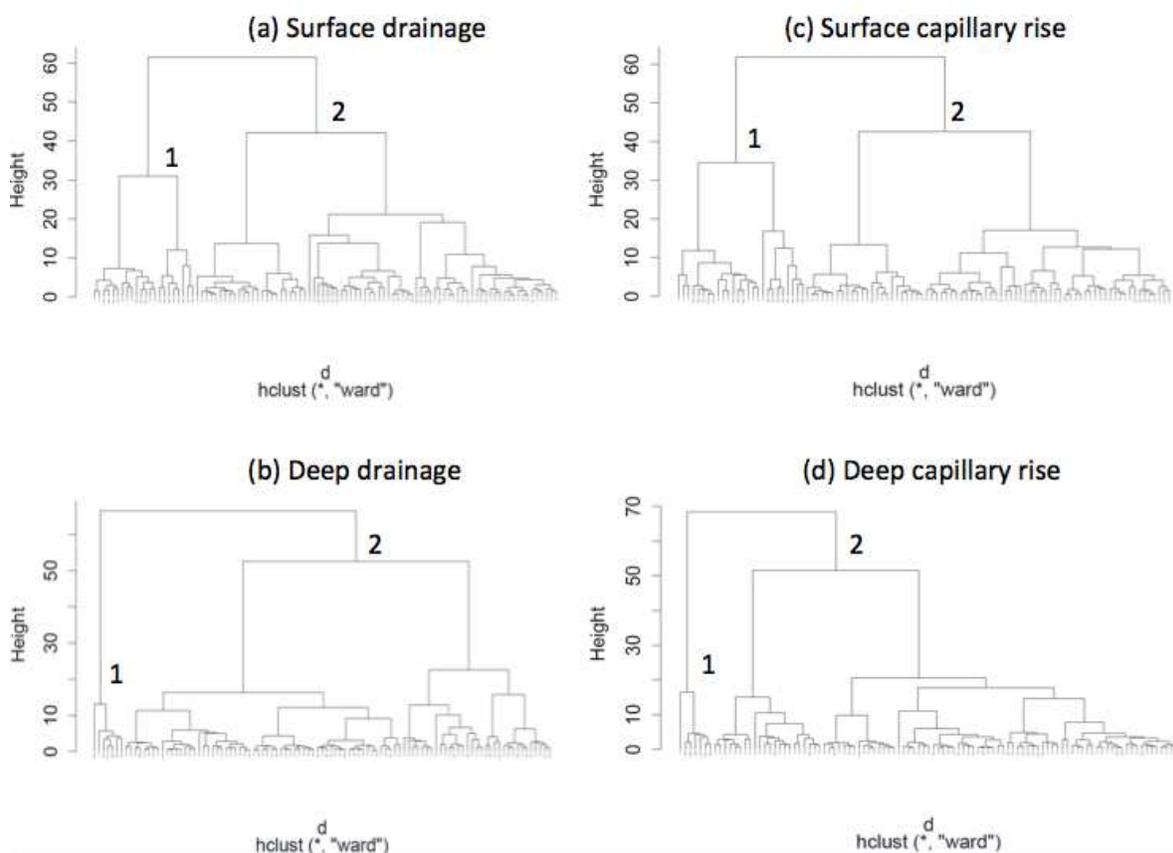


Figure 5 Dendrogram with the result of Ward's agglomerative hierarchical cluster analysis of scaled physical soil parameters, hydraulic soil parameters, and parameters of van Genuchten model for each case (a) surface drainage, (b) deep drainage, (c) surface capillary rise and (d) deep capillary rise

For the surface drainage, the first critical level was found at distance 61.5 where two main clusters can be distinguished. Cluster 2 contains the greatest number of samples, 76, while Cluster 1 contains 24 samples. For the deep drainage, the first critical level was found at distance 66.8.

Cluster 2 contains 94 samples and Cluster 1, 7 samples. For the surface capillary rise the first critical level was found at distance 57.2. Cluster 2 contains 56 samples, while Cluster 1 contains 44 samples. For the deep capillary rise the first critical level was found at distance 69.3. Cluster 2 contains 94 samples and Cluster 1, 7 samples.

Table 7 and figures 6, 7, 8, 9 and 10 show the differentiation between Cluster 1 and Cluster 2 for each four case.

For the surface drainage case, hydraulic conductivity at saturation, particle size and water contents at -3kPa and -7.5kPa are the most important parameters in order to differentiate Cluster 1 and Cluster 2 as shown in figure 6. For the deep drainage case, bulk density, porosity, water content at -3kPa and -7.5kPa , water content at saturation and particle size are the most important parameters to differentiate the two Clusters as shown in figure 7. For the surface capillary rise case, water table drawdown speed, crop yield, water content at saturation and particle size are the most important parameters as shown in figure 8. For the deep capillary rise case, bulk density, porosity, water content at -3kPa and -7.5kPa , saturation water content and particle size are the most important parameters as shown in figure 9. In figure 10 we can see that the curves are quite different for each cluster, in each case, indicating different hydraulic behaviour for each soil family.

Table 7 Median values of physical soil parameters, hydraulic soil parameters, and parameters of soil water retention model (van Genuchten) for Cluster 1 and 2, for each case

	Surface Drainage		Deep Drainage		Surface Capillary Rise		Deep Capillary Rise	
Observations, no.	100		101		100		101	
Parameter	Cluster1	Cluster2	Cluster1	Cluster2	Cluster1	Cluster2	Cluster1	Cluster2
First critical level	61.458		66.793		57.213		69.316	
Observation, no.	24	76	7	94	44	56	7	94
Water table drawdown velocity, cm h ⁻¹	0.737	1.064	0.737	1.064	0.592	1.258	0.592	1.258
Saturated hydraulic conductivity, cm h ⁻¹	56.149	13.388	4.290	18.896	16.815	17.866	4.290	18.896
Bulk density, g cm ⁻³	1.5175	1.521	0.437	1.585	1.375	1.560	0.437	1.585
Total Porosity	0.427	0.426	0.835	0.402	0.481	0.411	0.835	0.402
D10, μm	232.069	127.876	215.503	142.207	127.178	158.273	215.503	142.207
D50, μm	456.566	279.815	467.088	286.889	269.723	375.733	467.088	286.889
D90, μm	934.539	528.651	852.919	533.215	501.050	725.233	852.919	533.215
Crop yields, kg m ⁻²	2.2404	3.515	-	-	4.564	1.629	-	-
Saturated water content (θ _s), cm ³ cm ⁻³	0.446	0.453	0.839	0.384	0.477	0.411	0.836	0.397
van Genuchten model								
Residual water content (θ _r), cm ³ cm ⁻³	0.0719	0.0696	0	0.01673	0.01	0.0549	0.319	0.0388
Shape parameter α, cm ⁻¹	0.0407	0.0238	0.029	0.024	1.020	0.182	9.206	0.126
Shape parameter <i>n</i>	3.175	2.766	1.373	3.317	1.291	1.692	1.121	1.808
Water content at -3kPa, cm ³ cm ⁻³	0.275	0.386	0.701	0.334	0.219	0.221	0.593	0.199
Water content at -7.5kPa, cm ³ cm ⁻³	0.136	0.226	0.578	0.156	0.174	0.163	0.562	0.130

Surface drainage

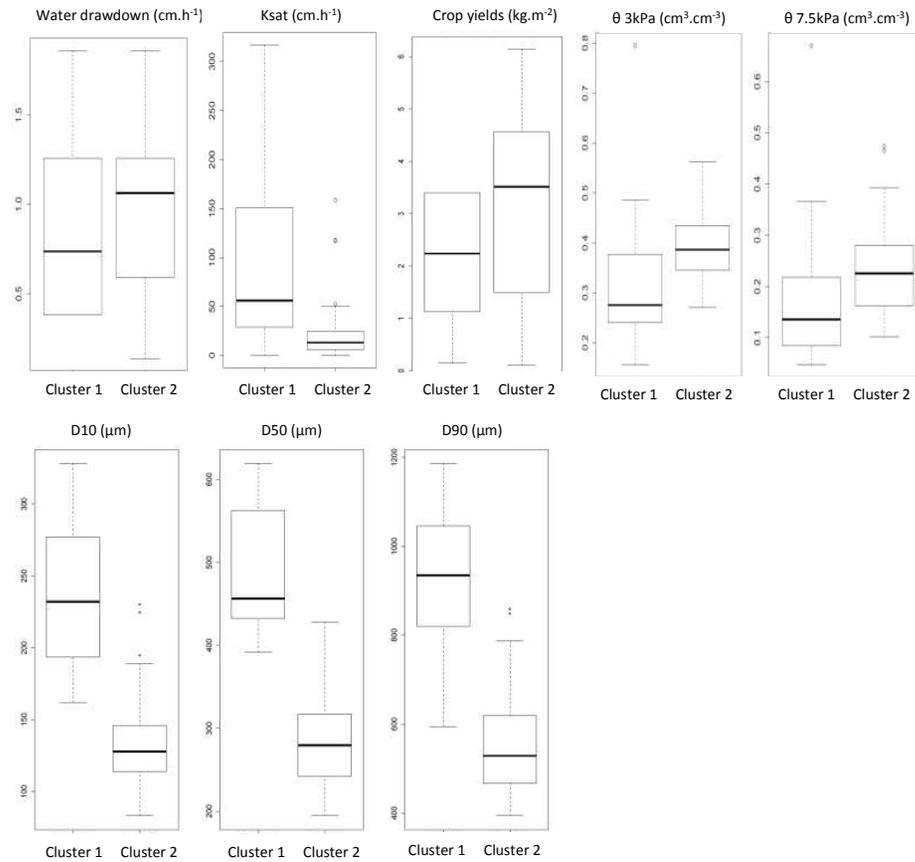


Figure 6 Distribution of physical soil parameters, hydraulic soil parameters and parameters of the soil water retention models for Cluster 1 and 2, for the surface drainage case

Deep drainage

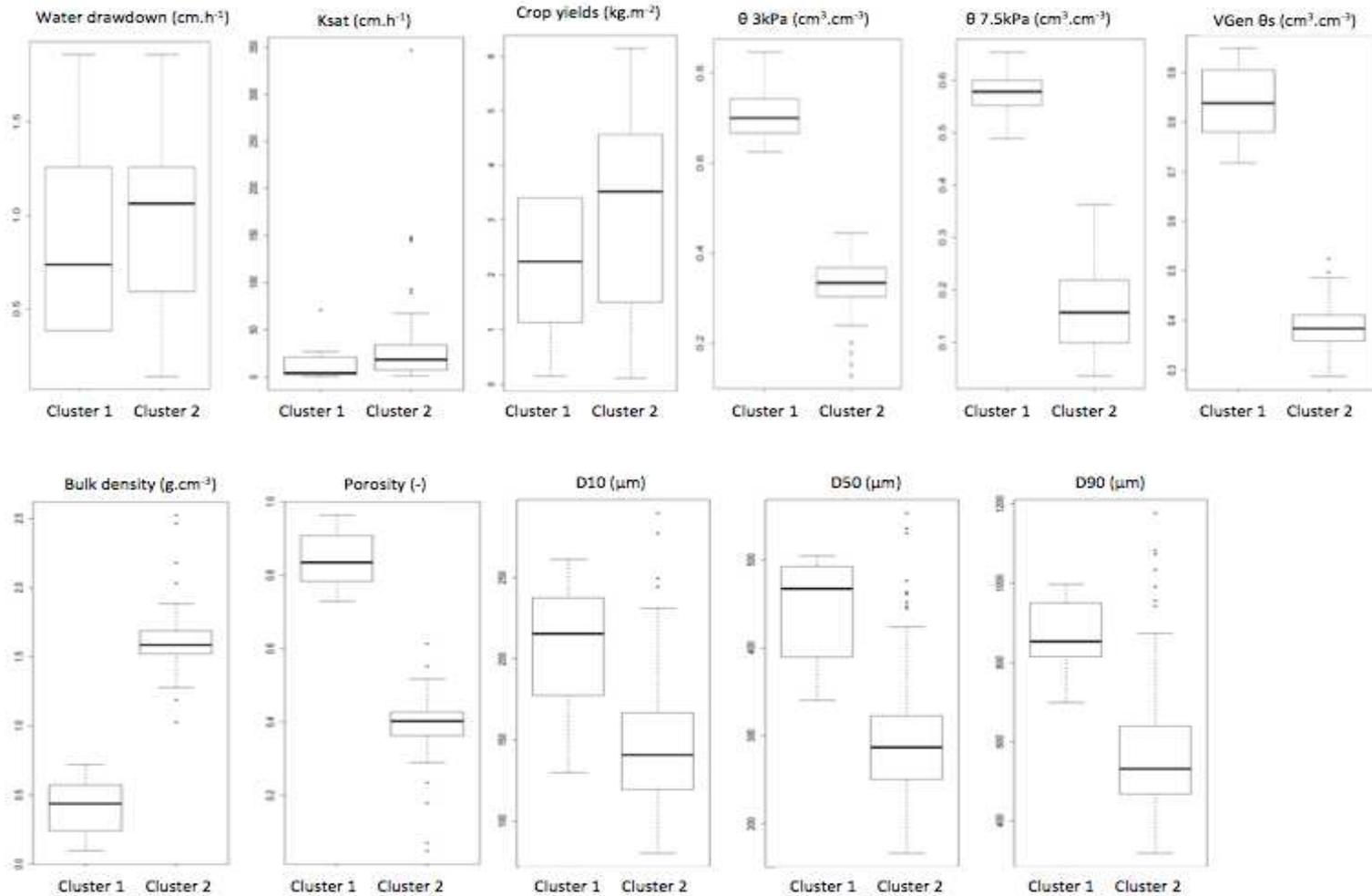


Figure 7 Distribution of physical soil parameters, hydraulic soil parameters and parameters of the soil water retention model for Cluster 1 and 2, for the deep drainage case

Surface capillary rise

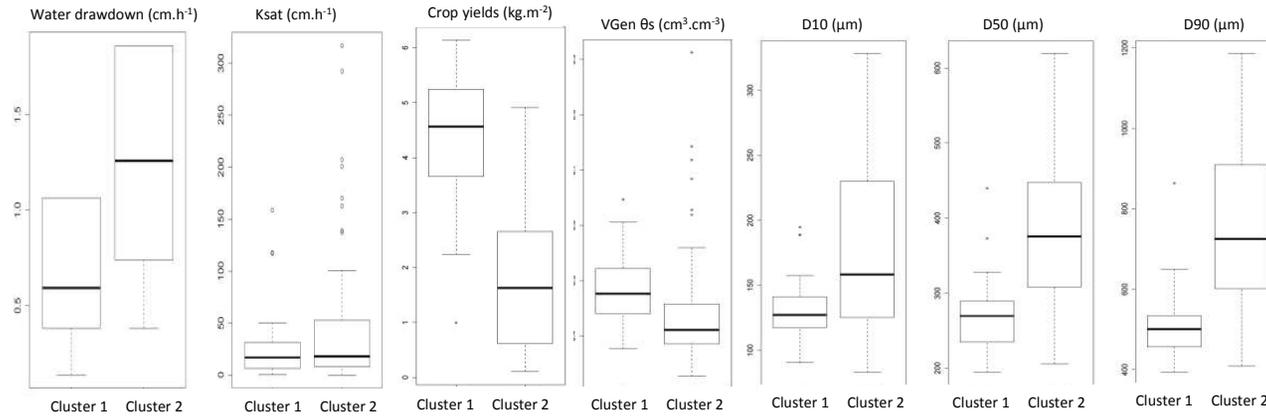


Figure 8 Distributions of physical soil parameters, hydraulic soil parameters and parameters of the soil water retention model for Cluster 1 and 2, for the surface capillary rise case

Deep capillary rise

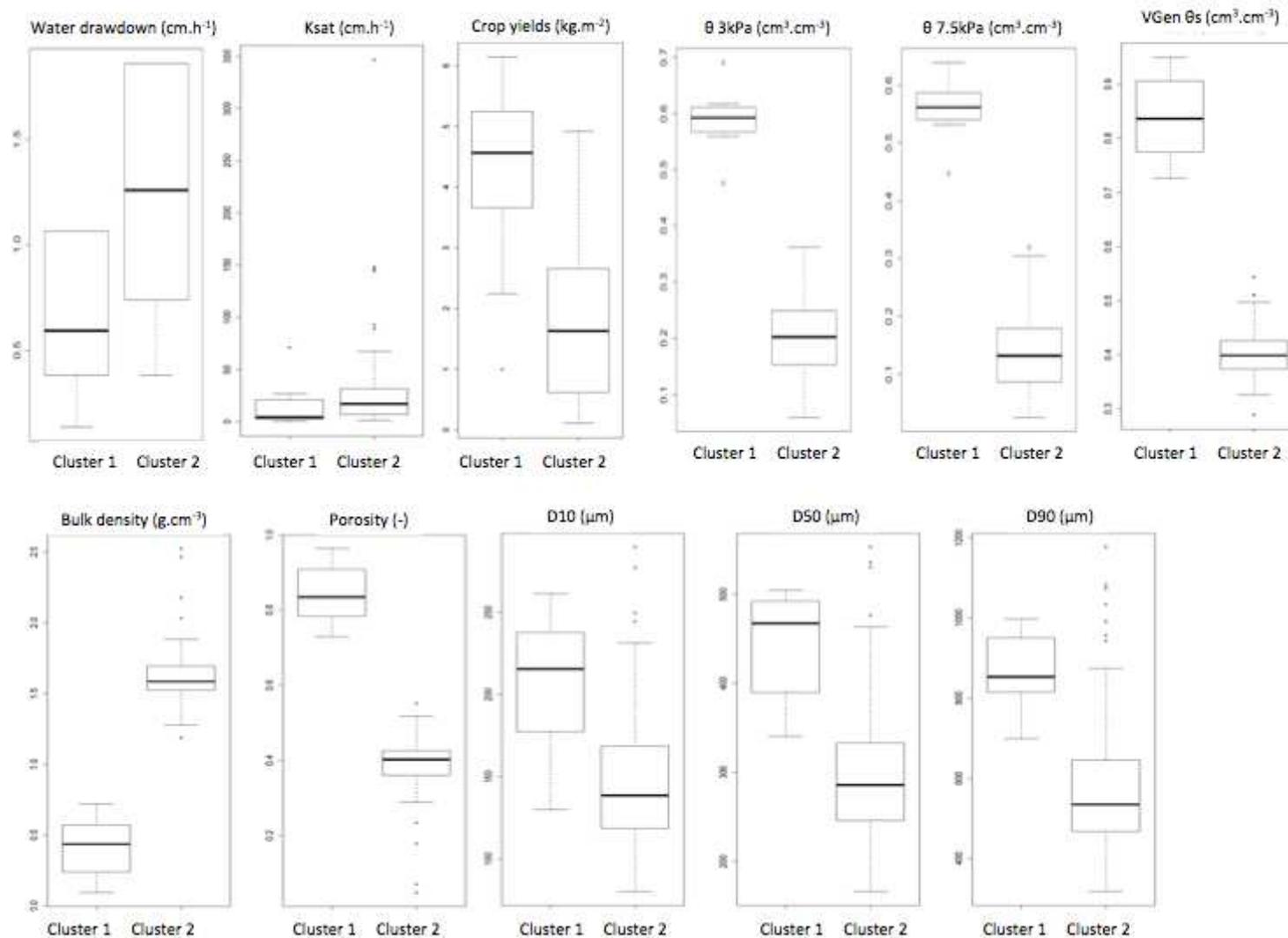


Figure 9 Distributions of physical soil parameters, hydraulic soil parameters and parameters of the soil water retention model for Cluster 1 and 2, for the deep capillary rise case

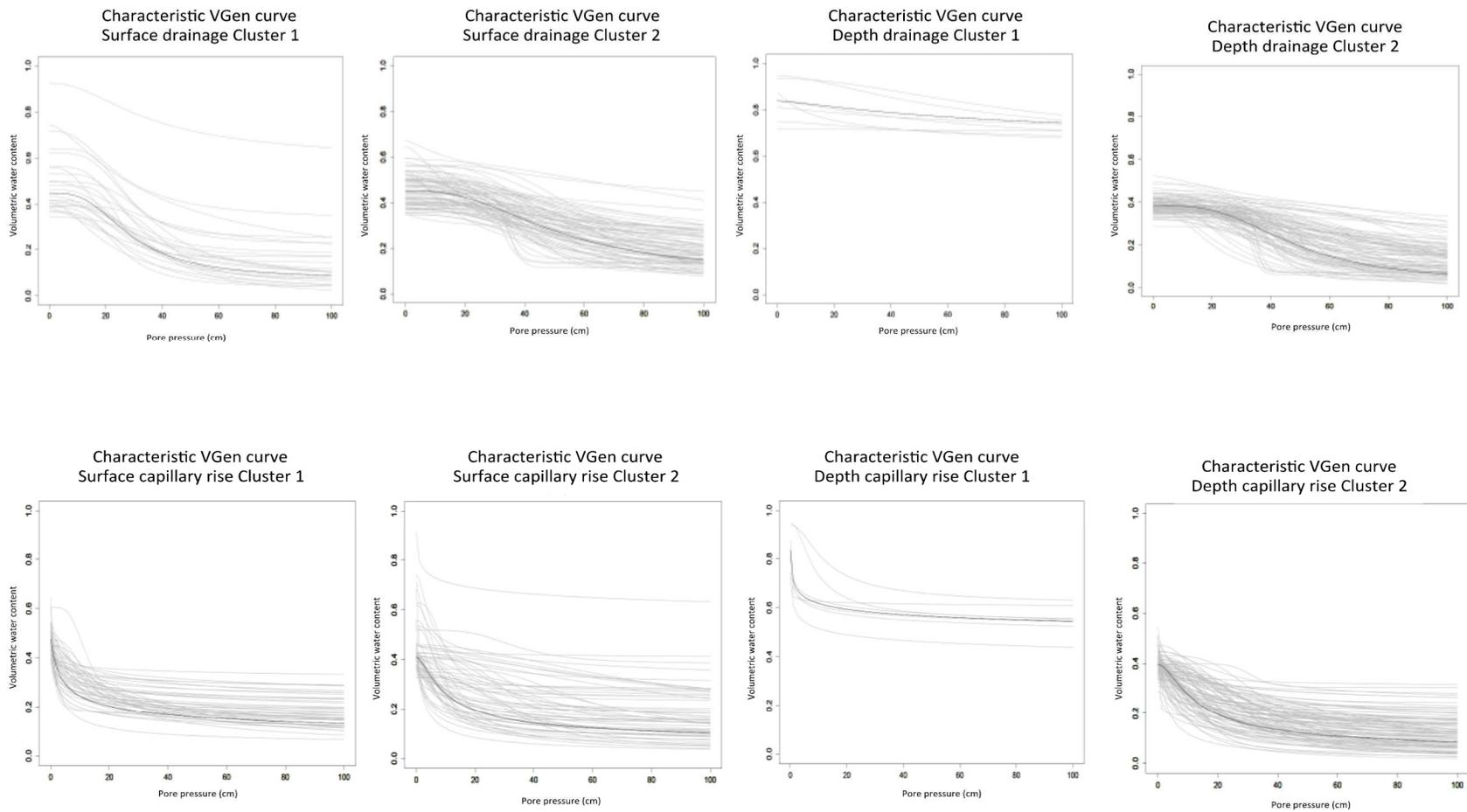


Figure 10 Characteristic water retention curves based on median calibrated parameter values of the van Genuchten model, for the four cases

2.4 Conclusion

In order to assess the relationship between drainage efficiency and soil properties, 960 undisturbed soil cores were collected over 8 fields and brought back to the laboratory for hydrodynamic soil properties characterization. Four cases were processed: surface drainage, deep drainage, surface capillary rise and deep capillary rise.

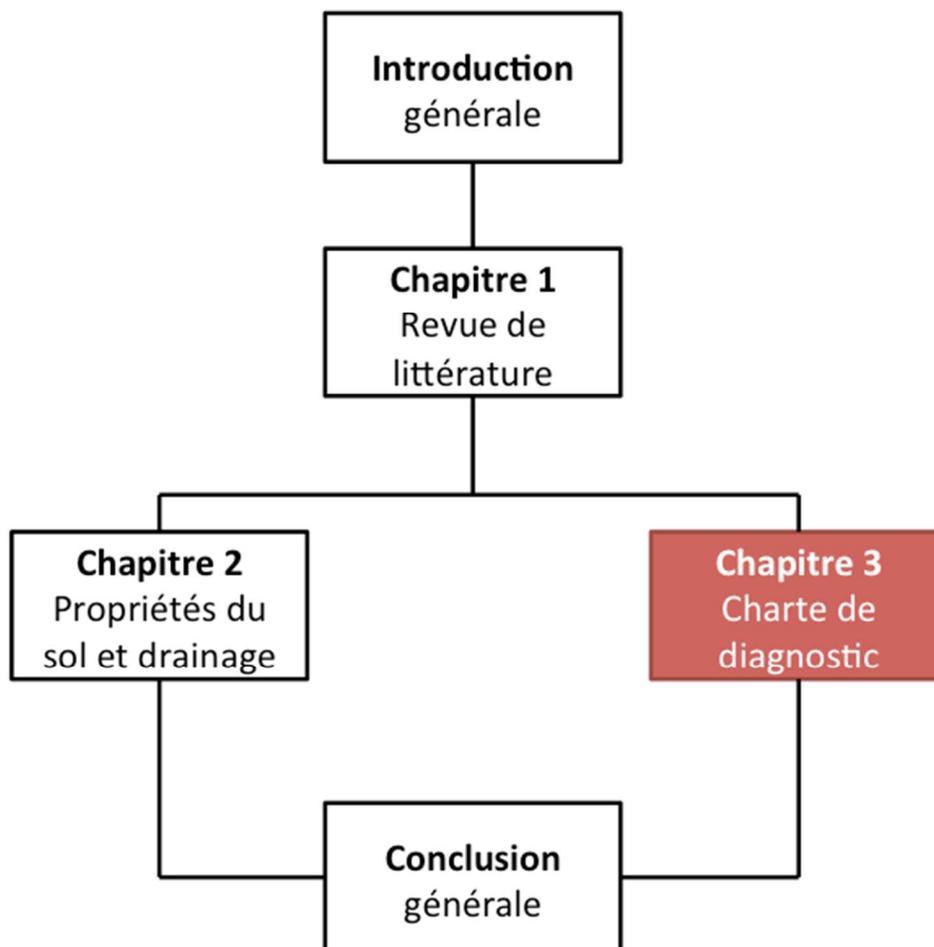
Data obtained from water table drawdown velocity, saturated hydraulic conductivity, bulk density, porosity, particle size, water retention parameters and soil water content were analysed using principal component analysis and cluster analysis. These two analyses highlighted the importance of particle size and soil water content on crop yield and drainage efficiency. As part of drainage diagnostic, classifying fields by particle-size distribution would be appropriate. This would also help to know what are the soil profiles (and their properties), which tend to have drainage problems. This cranberry soil profile characterization allows for a multitude of applications, including parameterization of water dynamic models for irrigation and drainage simulation scenarios.

References

- Bonin, S., 2009. *Régie agroenvironnementale de l'irrigation dans la production de canneberges (Vaccinium macrocarpon Ait.)*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Byrd, R., P. Lu, J. Nocedal and C. Zhu. 1995. A limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization. *SIAM Journal on Scientific Computing* 16: 1190-1208.
- Campling, P., Gobin, a. & Feyen, J., 2002. Logistic Modeling to Spatially Predict the Probability of Soil Drainage Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 66, p.1390.
- Cialella, A., Dubayah, R., Lawrence, W. & Levine, E., 1997. Predicting soil drainage class using remotely sensed and digital elevation data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 63(2), pp.171–177. Available at: http://beta.asprs.org/a/publications/pers/97journal/february/1997_feb_171-178.pdf.
- Demoranville, C., 2012. *Tile drainage in Massachusetts cranberry production : Implementation and best management practices*,
- Dieleman, P.J. & Trafford, B.D., 1976. *Drainage Testing. FAO Irrigation and Drainage paper no. 28*. Food and Agricultural Organization, ed., Rome, Italy.
- Eissa, M., Hoogenboom, P. J., Abdel Ghany, M. & Tahun, A., 1996. Determination of q-h relations of field drains under Egyptian conditions. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Elrick, D.E., Sheard, R.W. & Baumgartner, N., 1981. A simple procedure for determining the hydraulic conductivity and water retention of putting green soil mixtures. *Proceedings of the 4th International Turfgrass Society Research Conference, Guelph, ON, Canada*, pp.189–200.
- Gaaloul, N., 1996. Evaluation of drainage systems in the lower Medjerda valley, Tunisia. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Gallichand, J., Ghany, M. B. A., Elbadry, O. A. A. & Broughton, R. S., 1996. Performance of two drainage experimental plots in the Nile Delta. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Gnatowski, T., Szatyłowicz, J. & Brandyk, T., 2010. Hydraulic properties of fen peat soils in Poland. *Geoderma*, 154(3-4), pp.188–195.
- Hallema, D.W., Périard, Y., Lafond, J. A., Gumiere, S.J. & Caron, J., 2015. Characterization of Water Retention Curves for a Series of Cultivated Histosols. *Vadose Zone Journal*, 14(6), p.0. Available at: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/abstracts/14/6/vzj2014.10.0148>.
- Juneau, V., Caron, J. & Gallichand, J., 2009. Évaluation de l'efficacité des systèmes de drainage dans la production de canneberges. , p.37.
- Kilic, S., 2009. Mapping soil drainage classes of Amik Plain using Landsat images. *African Journal of Agricultural Research*, 4(September), pp.847–851.

- Laurent, T., 2014. *Réponse de la canneberge (Vaccinium macrocarpon Ait.) à l'aération du sol*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Legendre, P. & Legendre, L., 2003. *Numerical Ecology* E. S. B.V., ed.,
- Pazdro, Z. & Kozerski, B., 1990. *General hydrogeology* Wydawnictw., Warszawa.
- Pelletier, V., Gallichand, J., Caron, J., Jutras, S. & Marchand, S., 2015. Critical irrigation threshold and cranberry yield components. *Agricultural Water Management*, 56, pp.1325–1332.
- Pelletier, V., 2012. Problématique de drainage en production de canneberges. In *INPACQ Canneberges 2012*.
- Pelletier, V., Gallichand, J. & Caron, J., 2013. Effect of soil water potential threshold for irrigation in cranberry yield and water productivity. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 56(6), pp.1325–1332.
- Reynolds, W.D., 1993. *Physical properties of organic soils. Soil sampling and methods of analysis*. M. R. Carter, ed., Boca Ration, FL: Lewis Publ.
- Romano, N.J., Hopmans, J.W. & Dane, J.H., 2002. *Suction table. Methods of soil analysis Part 4 Physical methods* J. H. Dane & G. C. Topp, eds.,
- Smedema, L.K., Abdel Dayen, S. M., Vlotman, W. F., Abdel Aziz, A. & Van Leeuwn, H., 1996. Performance assessment of land drainage systems. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- The R Development Core Team, R., 2008. R : a language and environment for statistical computing.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils I. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), p.892.
- Verdonck, O.F., Cappaert, T.M. & De Boodt, M.F., 1978. Physical characterization of horticultural substrates. *Acta. Hortic.*, 82, pp.191–200.
- Vincent, B., Vidal, A., Tabbet, D., Baqria, A. & Kupper, M., 1996. Use of satellite remote sensing for the assessment of waterlogging or salinity as an indication of the performance of drained systems. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Ward, J.H.J., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.*, 58, pp.236–244.

Chapitre 3 Développement d'une charte de diagnostic des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges



3.1 Introduction

Le Chapitre 1 a permis de mettre en évidence l'importance de préserver un système de drainage souterrain efficace afin de maintenir les plants de canneberges dans leur gamme de potentiel matriciel optimale. Dans cette continuité, le Chapitre 2 a donné un aperçu des différentes méthodes de diagnostic des systèmes de drainage existantes, mais aussi de leurs lacunes. Également, il a été montré dans le Chapitre 2, l'importance de la granulométrie et de la teneur en eau du sol pour les rendements et ainsi pour l'efficacité de drainage. La première étape d'un diagnostic serait alors de classer les champs par classe de granulométrie, donnant une première indication sur l'état du drainage.

L'objectif de ce projet de maîtrise était le développement d'une méthode d'évaluation de la performance des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges. Ainsi, la question discutée dans ce Chapitre 3 est la suivante : l'étude de données tensiométriques et de l'évolution de la hauteur de la nappe en fonction du temps permet-elle de déterminer l'efficacité d'un système de drainage souterrain ?

Nous verrons dans un premier temps toutes les étapes nécessaires à la mise en place du dispositif expérimental de suivi de la nappe phréatique, à la récolte et à l'exploitation des données prises par les tensiomètres et les sondes de pression du partenaire Hortau®. Ces dernières seront testées pour la première fois, et comparées à des relevés manuels. Nous détaillerons ensuite les calculs nécessaires à l'obtention de la profondeur de la nappe phréatique, de sa vitesse de rabattement et de son profil de charge. La linéarité de la relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et celles mesurées par la sonde de pression sera abordée. Pour terminer, la charte de diagnostic des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberge sera présentée et décrite en détails. Une étude de cas sera également présentée afin de vérifier la validité de la charte proposée.

3.2 Matériel et méthode

3.2.1 Choix des champs, recherche des drains et installation des puits d'observation

Ce sont 21 champs de canneberges qui ont été sélectionnés au cours des étés 2013 et 2014 en collaboration avec le producteur Bieler et le personnel d'expérience de la ferme, afin de couvrir

l'ensemble de la ferme. L'objectif était de sélectionner certains champs avec des problèmes de drainage et d'autres étant connus par le producteur comme ayant un bon drainage.

Dans chaque champ sélectionné, les drains souterrains ont été détectés. Durant l'été 2013, c'est de manière manuelle avec une tige de fer, et à l'aide d'indication des employés de la ferme (nombre de drains, profondeur relative), que les drains ont été repérés. Pour l'été 2014, une technique récente en agriculture a été utilisée : celle du géoradar. Le géoradar (Type SIR 3000 GSSI, Geophysical Survey Systems Inc., Salem, NH, États-Unis) est une technique de prospection géophysique non destructive fondée sur l'analyse des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques hautes fréquences (10 MHz à 2 GHz) dans le sous-sol. L'utilisation du géoradar est fondée sur l'excitation du sous-sol, à partir d'une antenne d'émission, par un train d'impulsions de courte durée, afin de détecter, à l'aide d'une antenne de réception, les échos successifs associés aux contrastes de permittivités ou de conductivités électriques rencontrés par les ondes électromagnétiques au cours de leur propagation (Sagnard & Rejiba 2010). Il est ainsi possible de détecter très rapidement des zones de changements de milieu comme des zones d'eau, des drains pleins d'eau, ou même juste un fond d'eau à l'intérieur des drains.

Une fois les drains trouvés, des puits d'observation ont été mis en place. Il s'agit de tuyaux en plastique PVC de 1.50 m (5 pieds) de long et de 7.6 cm (3 pouces) de large et pourvus de fentes de 0.025 cm (0.010 pouces) de largeur ouvertes sur le pourtour pour laisser passer l'eau, mais pas le sol sableux, et fermés à l'aide de bouchons aux deux extrémités. Les puits ont été déposés dans des trous creusés à la tarière à essence. La hauteur exacte de la section de puits au-dessus du sol a été mesurée à l'aide d'un GPS différentiel (LEICA® Viva CGR10). De la bentonite a été utilisée pour colmater le contour entre le puits et la surface du sol afin de prévenir une infiltration préférentielle de l'eau de surface. Trois puits ont été disposés pour former un transept par chaque extrémité des champs sélectionnés : un puits à 15 cm du drain pour ne pas avoir l'influence du drain directement ou encore interférer avec son fonctionnement, un puits au quart et un puits à la moitié de l'écartement entre deux drains.

3.2.2 Installation du dispositif expérimental et lancement des irrigations contrôlées

Chaque puits d'observation a été équipé d'un dispositif expérimental de suivi de la nappe phréatique comprenant un tensiomètre, une sonde de pression et un module d'acquisition des données tous les trois provenant du partenaire Hortau®. Ce dispositif permettait d'évaluer la forme

et la vitesse du profil de rabattement de la nappe d'eau dans le sol en fonction du temps. Un sous-objectif du projet consistait à tester les nouvelles sondes de pression du partenaire Hortau® et à comparer les données prises par ces dernières, à des relevés manuels.

L'acquisiteur de données TX3 est un appareil compact avec un écran, qui peut être utilisé dans n'importe quelle production agricole. Chaque TX3 peut recevoir de l'information de trois capteurs à la fois (ici, un tensiomètre et une sonde de pression) et l'écran permet de suivre en temps réel l'acquisition de données. Ces données sont ensuite transmises par voie sans fil à la station de base web d'Hortau®. Elles sont ensuite visualisables sur un ordinateur grâce au logiciel Irrolis™.

À l'intérieur de chaque puits d'observation a été placée une sonde de pression accrochée à un filin métallique d'une longueur qui peut varier d'une sonde à l'autre, mais qui est connue. À une distance de 2 m du puits, un tensiomètre a été placé dans le sol à une profondeur approximative de 10 cm, correspondant à la mi-zone racinaire des plants de canneberges, avec un angle d'inclinaison entre 10° et 30°. Le tensiomètre et la sonde de pression ont finalement été branchés au TX3. Les figures 11 et 12 résument l'installation du dispositif expérimental dans un champ de canneberges à deux drains.

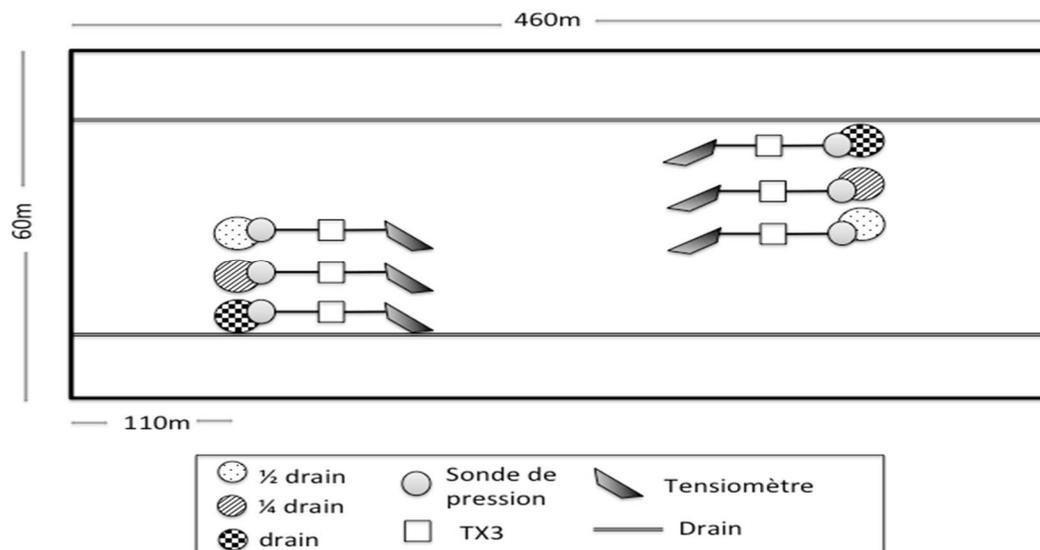


Figure 11 Mise en place du dispositif expérimental de suivi de la nappe phréatique dans un champ de canneberges à deux drains

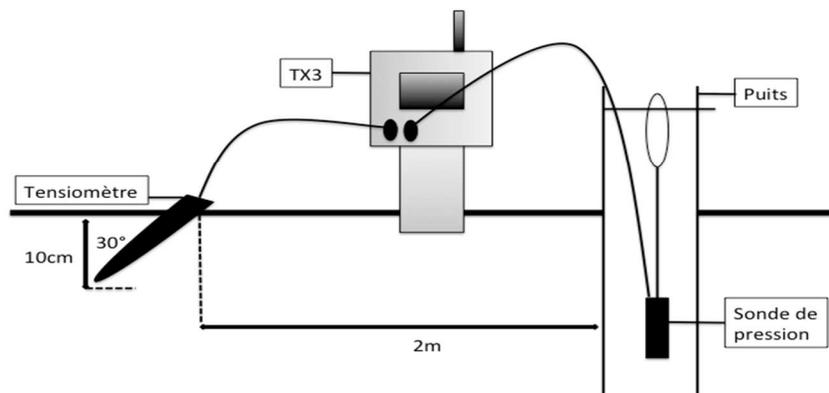


Figure 12 Représentation schématique du dispositif expérimental de suivi de la nappe phréatique pour un puits

À l'été 2013, ce sont 10 champs qui se sont vus attribuer ce dispositif expérimental et à l'été 2014, 11 nouveaux champs ont été expérimentés pour un total de 21 champs différents ayant, ou non, des problèmes de drainage. Une fois chaque champ équipé de son dispositif, une irrigation de 6 heures a été lancée avec l'aide du producteur, correspondant à 24 mm d'apport en eau (1 heure d'irrigation apporte environ 4 mm d'eau). L'objectif avec l'irrigation de 6 heures était d'obtenir une remontée de la nappe de 40cm environ, afin qu'il soit possible de bien suivre son rabattement. Cette irrigation contrôlée permettait de suivre la durée et la forme du profil de rabattement de la nappe phréatique en vue de diagnostiquer le fonctionnement des systèmes de drainage. À l'été 2013, la mesure de la profondeur de la nappe phréatique a été mesurée manuellement à l'aide d'un ruban à mesurer, immédiatement avant et après l'irrigation, afin de valider les données prises par les nouvelles sondes de pression d'Hortau®.

3.2.3 Utilisation du logiciel Irrolis™. Exploitation des données.

La station de base web d'Hortau® est le centre de réception et de communication du système. Elle reçoit les données des acquiseurs TX3 et transmet l'information au serveur d'Hortau® qui peut ensuite être visualisée en temps réel grâce au logiciel en ligne Irrolis™ (www.irrolisweb.hortau.com). À la fin des irrigations, l'ensemble des données enregistrées par la sonde de pression et le tensiomètre a été récupéré sur Irrolis™.

Calcul de la profondeur de la nappe phréatique à l'aide des données de pression de la sonde de pression et de tension du tensiomètre

À partir des données brutes de tension (issues du tensiomètre) et de pression (issues de la sonde de pression) (Figure 13), il a été possible de calculer la profondeur de la nappe d'eau (en hauteur d'eau équivalente pour le tensiomètre) et ainsi d'obtenir une courbe du profil de rabattement de la nappe pour chaque puits dans le champ (Figure 14, Annexes 1 et 2).

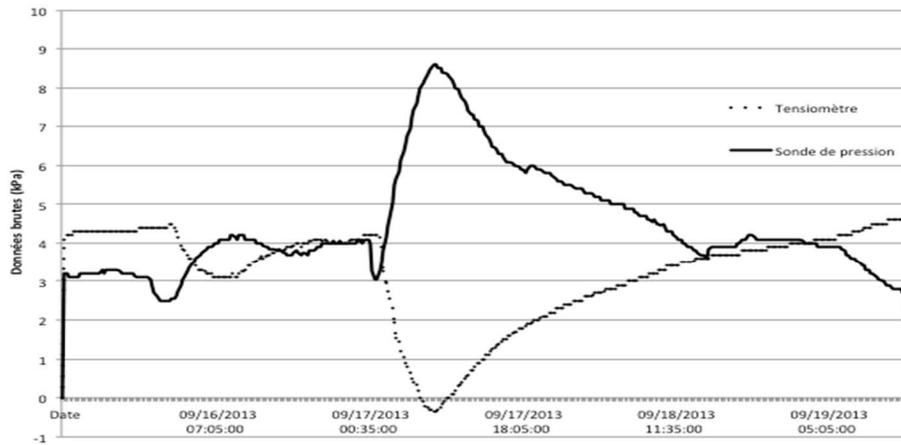


Figure 13 Évolution des données brutes de tension (issues du tensiomètre) et de pression (issues de la sonde de pression) en fonction du temps, à la suite d'une irrigation

Pour un champ à deux drains avec trois puits à chaque extrémité, six profils de rabattement de la nappe, comme celui présenté à la figure 14, ont ainsi été obtenus.

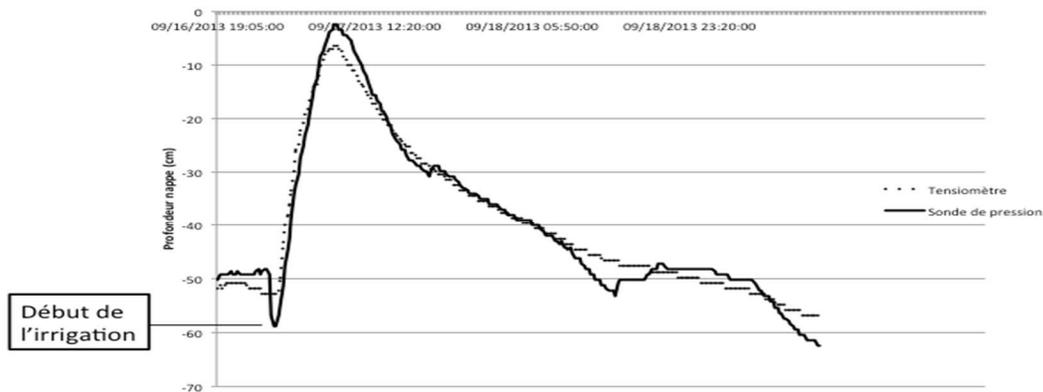


Figure 14 Profil de rabattement de la nappe phréatique au niveau d'un puits, à la suite d'une irrigation

Évaluation de la vitesse de rabattement de la nappe phréatique

Il s'agissait ensuite d'évaluer la vitesse de rabattement de la nappe au niveau de chaque puits, puis de la présenter par transept. Autrement dit : en combien de temps la nappe retrouve-t-elle son niveau initial suite à une irrigation? La norme utilisée, telle que présentée dans le Chapitre 1 recommande un rabattement de la nappe de 40 cm en 24 à 48 heures (Pelletier 2012) soit une vitesse de rabattement de 1.7 cm à 0.8 cm par heure. Les données prises par le tensiomètre ont ici été utilisées. Il s'agissait de calculer le coefficient directeur de la droite déterminée par deux de ses points (Annexe 3).

La figure 15 présente ce qui a été obtenu pour un transept de trois puits (drain, un quart drain et ½ drain mis en symétrie pour simuler cinq puits) à une des deux extrémités du champ. Les positions 1 et 5 correspondent aux puits proches du drain, les positions 2 et 4, aux puits situés au quart de l'écartement entre les deux drains et la position 3, au puits placé à la moitié de l'écartement entre deux drains. La norme de rabattement de la nappe est représentée par la bande rosée. Pour chaque champ, deux graphiques de ce genre ont été créés, un pour chaque transept aux deux extrémités du champ.

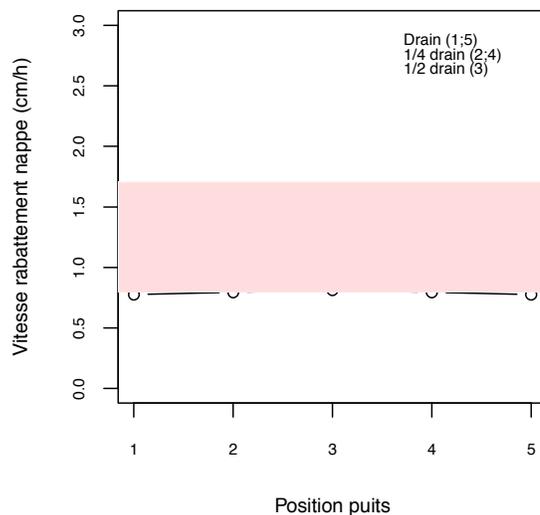


Figure 15 Représentation de la vitesse de rabattement de la nappe phréatique en cm/h, pour un transept de trois puits, à une des extrémités du champ

Évaluation du profil de charge de la nappe phréatique

Il s'agissait ensuite d'obtenir le profil de charge de la nappe phréatique en utilisant la notion de charge hydraulique (Annexe 4). Le profil de charge représentant l'évolution de H la charge d'eau sur 25 h, à chaque puits (Figure 16) pour chaque transept a ainsi été obtenu :

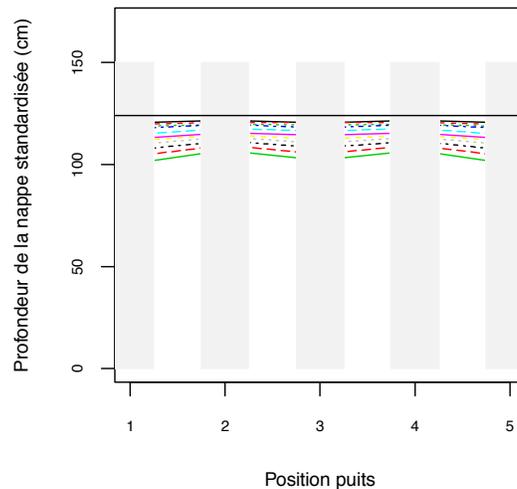


Figure 16 Représentation du profil de charge de la nappe phréatique à la suite d'une irrigation

La ligne noire représente la surface du sol. Le niveau 0 correspond au bas des puits dans le sol. Toutes les profondeurs de puits ont été standardisées par rapport au puits le plus profond, par transept et par champ. Chaque courbe de couleur représente un temps de rabattement de la nappe, avec 2 h 30 entre chaque temps et onze temps (temps 0 à temps 10) pour un total de 25 heures.

Linéarité de la relation entre le tensiomètre et la sonde de pression

Une dernière manipulation des données du tensiomètre et de la sonde de pression a également été réalisée. Il s'agissait, à l'aide du logiciel R (R Development Core Team 2012) de comparer les données de profondeur de nappe prises par la sonde de pression à celles prises par le tensiomètre au niveau de chaque puits. Ceci a permis l'obtention des graphiques suivants (Figure 17).

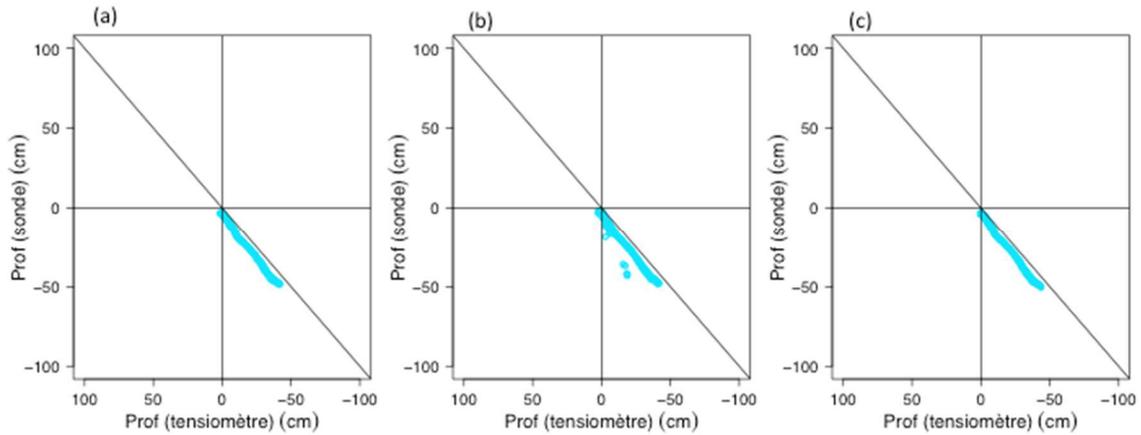


Figure 17 Comparaison entre les données de profondeur de nappe issues de la sonde de pression avec les données de profondeur de nappe issues du tensiomètre : (a) puits proche du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Comme le tensiomètre et la sonde de pression mesurent tous deux l'évolution du potentiel de l'eau dans le sol, à seulement 2 m de distance, ils sont supposés rapporter approximativement les mêmes données de profondeur d'eau équivalente, représentées par une droite. Si le tensiomètre signale une nappe élevée et que la sonde de pression indique une nappe basse, cette situation peut suggérer un cas de nappe perchée (Figure 18a). À l'inverse, si le tensiomètre signale une nappe profonde et que la sonde de pression indique une nappe phréatique élevée, la situation peut représenter un cas d'évapotranspiration (Figure 18b).

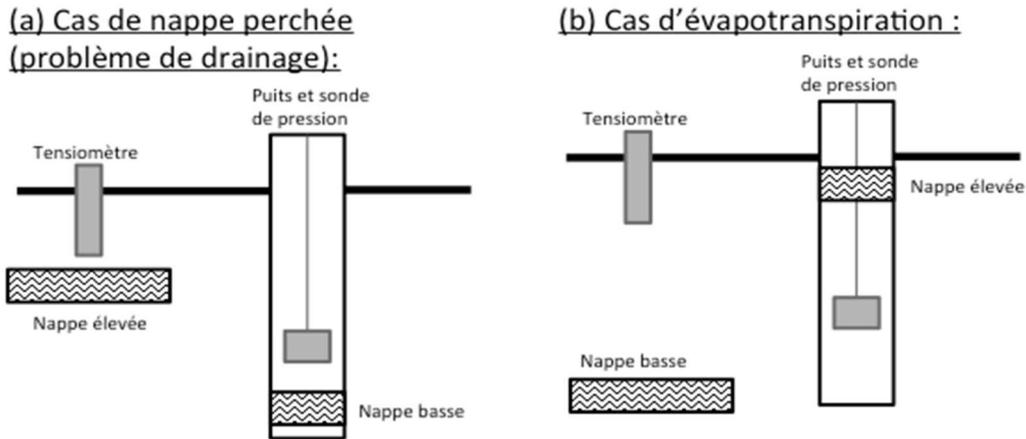


Figure 18 Représentation schématique de la comparaison entre les données de profondeur de nappe issues de la sonde de pression et du tensiomètre (a) le tensiomètre indique que la nappe est élevée et la sonde de pression indique que la nappe est basse et (b) le tensiomètre indique que la nappe est basse et la sonde de pression que la nappe est élevée

Les deux situations sont résumées dans la figure 19.

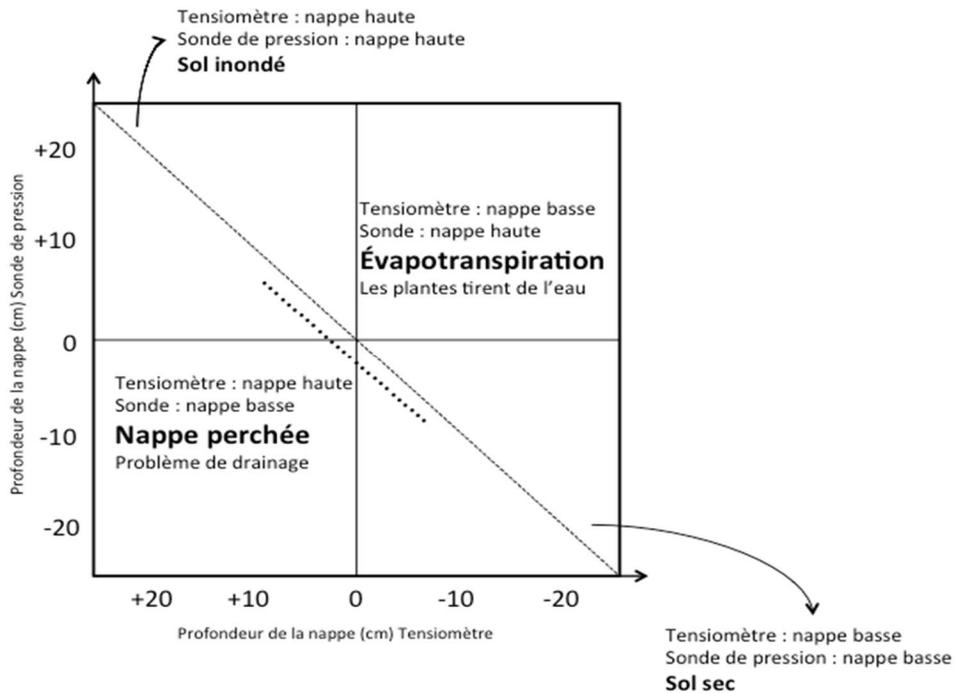


Figure 19 Représentation schématique de la comparaison entre les données de profondeur de nappe issues de la sonde de pression et du tensiomètre

3.3 Résultats et discussion

3.3.1 Comparaison des données automatiques et manuelles de profondeur de nappe (sondes Hortau® versus relevés manuels)

Il s'agissait de comparer les données de profondeur de nappe d'eau prises manuellement à l'aide d'un ruban à mesurer à celles de la nouvelle sonde de pression d'Hortau®, dites automatiques. Les graphiques qui suivront ont été obtenus grâce au logiciel de traitement R.

La figure 20 représente la relation entre les données de profondeur de nappe prises manuellement et les données prises par la sonde de pression. Il y a eu 63 mesures qui ont été effectuées pour les deux méthodes. Grâce à l'étude de la dispersion des points, il est possible d'affirmer qu'il existe une relation linéaire entre les données manuelles et les données automatiques ($R^2 = 0.97$). Les mesures de niveaux de nappe sont donc comparables, que ce soit avec la sonde de pression ou le ruban à mesurer.

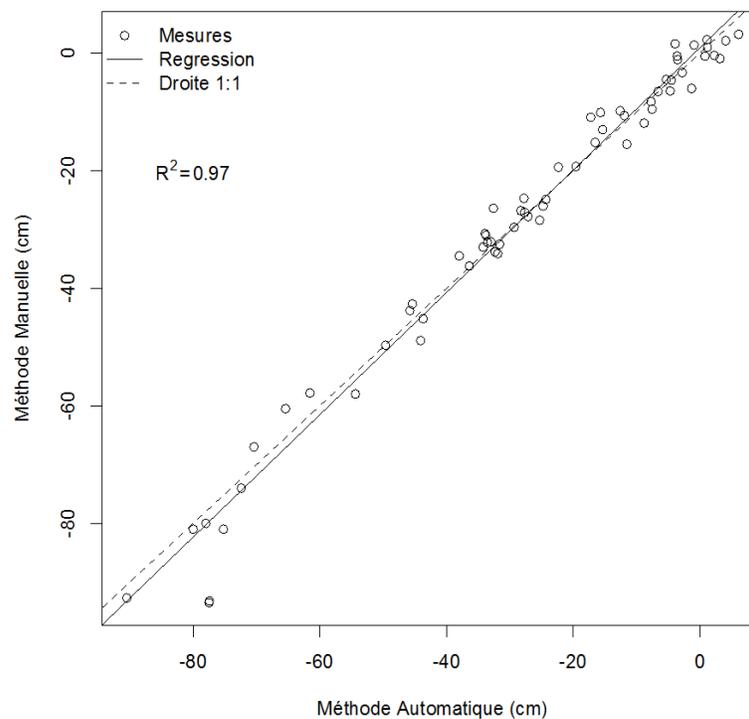


Figure 20 Relation entre les données de profondeur de nappe prises manuellement et les données prises par la sonde de pression

La figure 21 est une boîte à moustaches permettant de résumer la distribution des mesures prises manuellement et avec la sonde de pression. La distribution des mesures est semblable. La

différence entre les deux limites inférieures du corps des données n'est due qu'à la présence d'une valeur extrême dans les données prises manuellement.

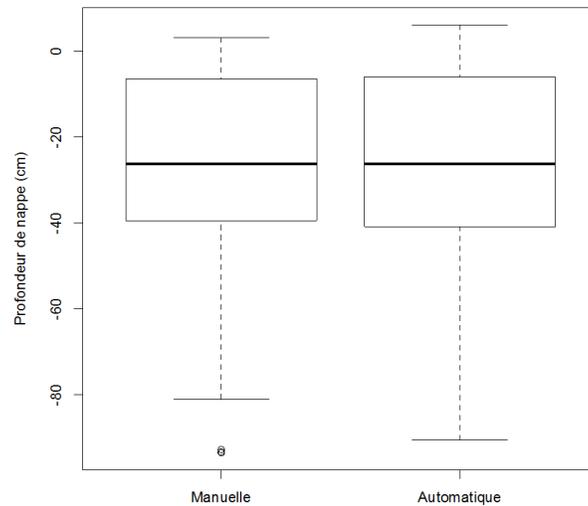


Figure 21 Distribution des mesures de profondeur de nappe prises manuellement et avec la sonde de pression

3.3.2 Charte de diagnostic des systèmes de drainage souterrain

En se basant sur les courbes de rabattement de la nappe phréatique, la vitesse de rabattement, le profil de charge et sur la linéarité de la relation entre le tensiomètre et la sonde de pression, une méthode de diagnostic des systèmes de drainage souterrain a pu être développée. La figure 22 présente cette méthode qui prend la forme d'une charte de diagnostic à partir des données de tensiomètres et de sondes de pression placés au champ au cours des étés 2013 et 2014.

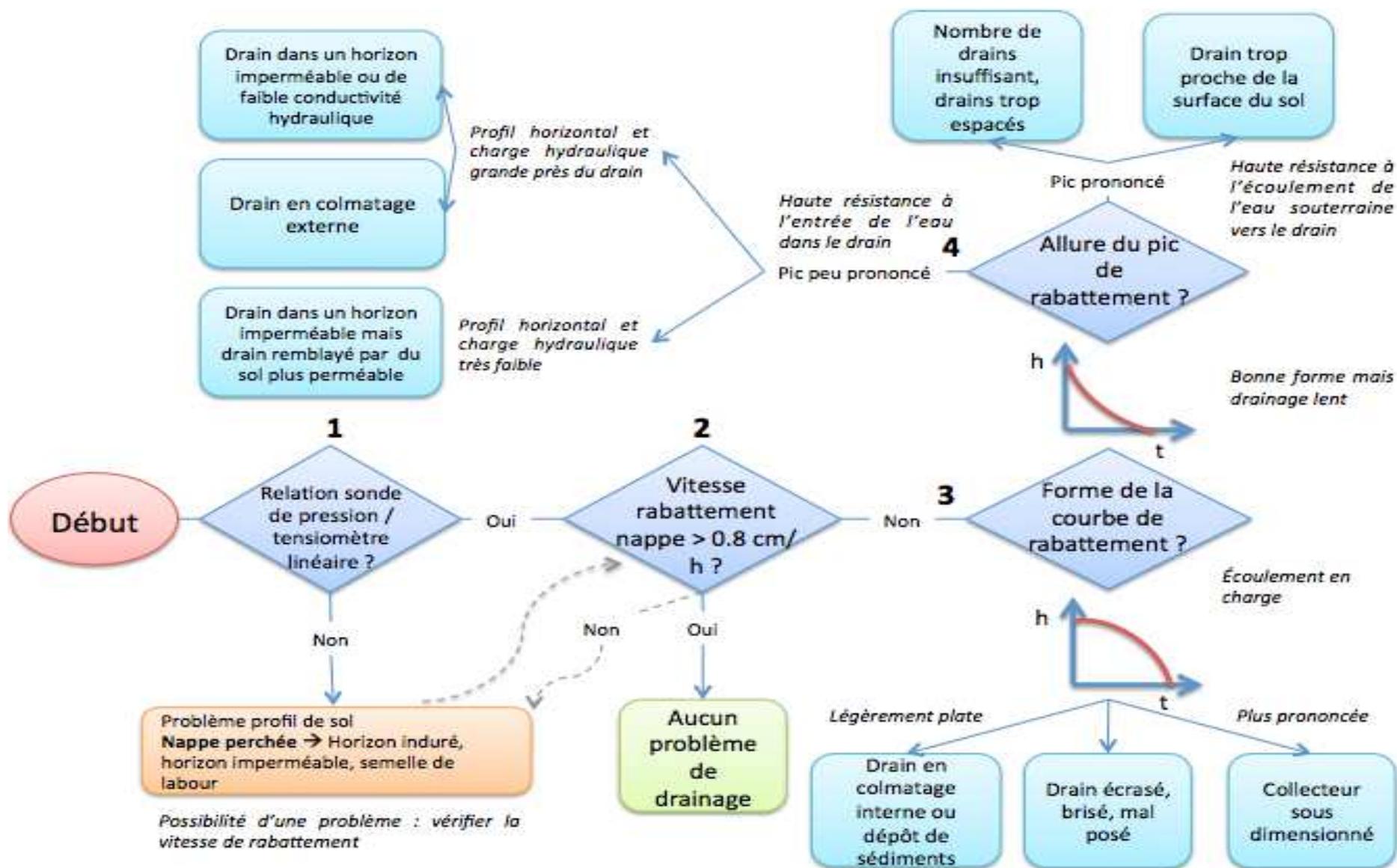


Figure 22 Représentation schématique de la charte de diagnostic des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges

Une seule charte est utilisée par champ si le champ semble homogène. Si le champ se présente comme hétérogène, l'utilisation de la charte à chaque transept est conseillée pour tenir compte de cette hétérogénéité spatiale des propriétés du sol dans le champ et ainsi bien évaluer la situation.

Le cheminement vers le diagnostic d'un système de drainage dans un champ donné se déroule comme suit, avec quatre grandes questions (cinq exemples caractéristiques suivront) :

Question 1 : La relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et celles mesurées par la sonde de pression est-elle linéaire ?

Réponse Oui : Comme la relation est linéaire, il est possible de passer à la question 2.

Réponse Non : La relation n'est pas linéaire, il y a une divergence entre la profondeur de la nappe mesurée par le tensiomètre et celle mesurée par la sonde de pression qui laisserait supposer la présence d'une nappe perchée. Pour bien valider la situation il faut tout de même aller vérifier avec la vitesse de rabattement de la nappe.

Question 2 : La vitesse de rabattement de la nappe est-elle supérieure à 0.8 cm h^{-1} ? (Il est important de se rappeler ici que la norme de rabattement choisie est de 0.8 à 1.7 cm h^{-1}).

Réponse Oui : La vitesse de rabattement est au-dessus de la limite inférieure de la norme de rabattement.

Si la réponse à la question 1 était Oui, il n'y a aucun problème de drainage pour ce champ ou pour ce transept. Le système de drainage fonctionne adéquatement.

Si la réponse à la question 1 était Non, il n'y a aucun problème de drainage non plus malgré la non linéarité de la relation entre le tensiomètre et la sonde de pression. La situation mise en évidence ici concerne un problème d'échantillonnage des données. Il s'agit de vérifier que le tensiomètre est bien installé, qu'il contient suffisamment d'eau et qu'il n'y a pas eu d'infiltration préférentielle d'eau dans le sol proche de sa bougie en céramique.

Réponse Non : La vitesse de rabattement se situe sous la limite inférieure de la norme de rabattement.

Si la réponse à la question 1 était Oui, il est possible continuer à la question 3.

Si la réponse à la question 1 était Non, la situation démontre un problème au niveau du profil de sol et le diagnostic possible est alors :

- Nappe perchée : horizon induré, horizon imperméable, semelle de labour

Question 3 : Qu'elle est la forme de la courbe du profil de rabattement de la nappe ? h représente la profondeur de la nappe et t , le temps.

Réponse Convexe : Si la courbe est de forme convexe, la situation présente un écoulement en charge (Smedema et al. 1983).

Le diagnostic possible est ainsi :

- Drain en colmatage interne ou dépôt de sédiments : le drain présente une section libre et une capacité réduite à l'écoulement sur toute la portion du système affecté. Le drain ne peut alors pas transporter toute l'eau. Le drain coule comme un drain en charge.
- Drain mal installé, brisé ou écrasé : il y a une réduction partielle ou totale d'une section du drain et donc une capacité réduite à l'écoulement,
- Collecteur sous-dimensionné : un collecteur coulant en charge signifie que le gradient disponible pour rabattre la nappe est diminué et que le rabattement de celle-ci est plus lent que les spécifications du design, Le rabattement en amont ne commence que lorsque les secteurs en aval se sont drainés. Dans les champs sans collecteur, le problème est rapporté à un fossé bouché à la sortie du drain.

Il est à noter que du colmatage interne n'a été repéré qu'une seule fois dans les champs étudiés. De plus, le bris d'un drain lors de son installation est jugé peu probable dans les champs étudiés en raison des bonnes méthodes de pose utilisées par le producteur. Le diagnostic du collecteur sous-dimensionné est donc privilégié dans cette catégorie.

Réponse Concave : Si la courbe est de forme concave, il faut poursuivre à la question 4 pour approfondir le diagnostic.

Question 4 : Qu'elle est plus précisément l'allure du pic de rabattement de la courbe de rabattement de la nappe ?

Réponse Pic prononcé : Si le pic est prononcé, la situation peut être qualifiée de 'haute résistance à l'écoulement de l'eau souterraine vers le drain' (Smedema et al. 1983). L'eau libre s'écoule très rapidement puis le gradient devient insuffisant pour acheminer l'eau jusqu'au drain.

Le diagnostic possible est :

- Nombre de drains insuffisant ou drains trop espacés. Condition de sous design du système de drainage.
- Drains trop proches de la surface du sol

Pour valider la profondeur des drains il est possible d'utiliser le géoradar ou bien une tige de métal directement en champ. Pour ce qui est du nombre de drains insuffisant il s'agit de vérifier avec les valeurs de conductivités hydrauliques mesurées en laboratoire, quel aurait été le nombre de drains adéquat à poser dans ce champ.

Réponse Pic peu prononcé : Si le pic est peu prononcé, la situation peut être qualifiée de 'haute résistance à l'entrée de l'eau dans le drain (Smedema et al. 1983) et est dûe aux propriétés du sol, comme la conductivité hydraulique.

Concernant le diagnostic possible, une dernière distinction à analyser à l'aide du profil de charge est possible ici.

Si le profil de charge est horizontal mais que la charge hydraulique est élevée près du drain (la majorité de la charge hydraulique disponible sera utilisée à faire pénétrer l'eau dans le drain) :

- Drain en colmatage externe
- Drain installé dans un horizon imperméable ou de faible conductivité hydraulique

Si le profil de charge est horizontal et que la charge hydraulique est faible au-dessus du drain :

- Drain installé dans un horizon imperméable ou de faible conductivité hydraulique mais drain remblayé par du sol plus perméable

Exemple 1 : Champ U18 Transept 1

Question 1 : La relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et celles mesurées par la sonde de pression est-elle linéaire comme attendu (Figure 23) ?

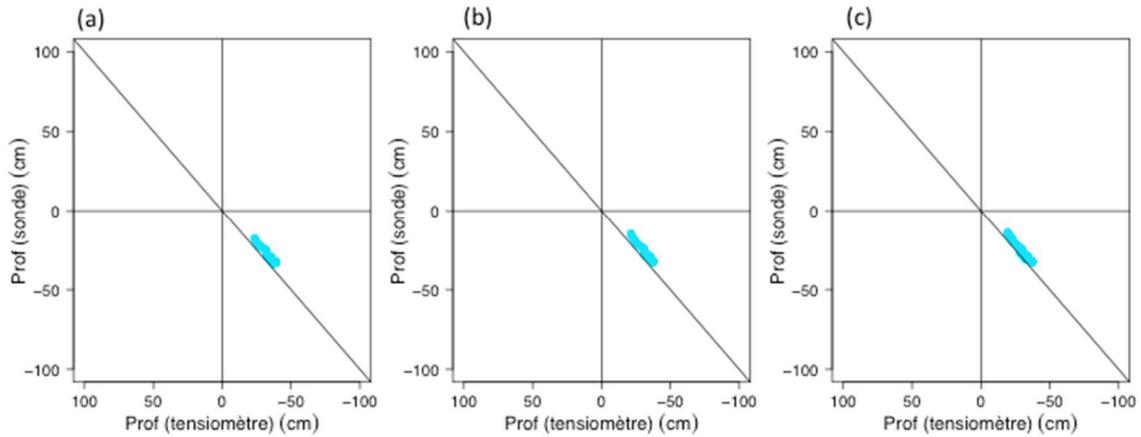


Figure 23 Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ U18, Transept 1 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Réponse Oui : Comme la relation est linéaire, il est possible de passer à la question 2.

Question 2 : La vitesse de rabattement de la nappe est-elle supérieure à 0.8 cm h^{-1} ? (Il est important de se rappeler ici que la norme de rabattement choisie est de 0.8 à 1.7 cm h^{-1}) (Figure 24) ?

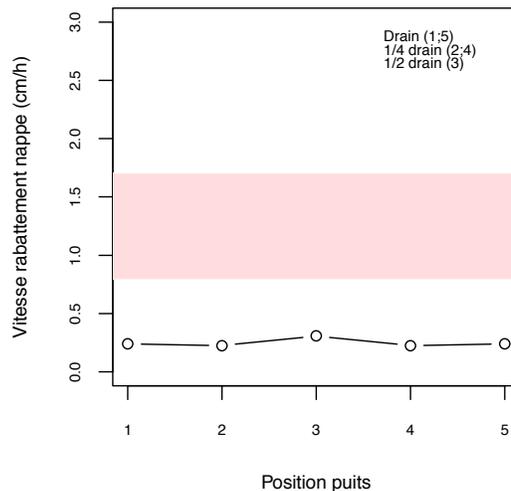


Figure 24 Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ U18, Transept 1

Réponse Non : La vitesse de rabattement se situe sous la limite inférieure de la norme de rabattement.

Si la réponse à la question 1 était Oui, il est possible continuer à la question 3.

Question 3 : Quelle est la forme de la courbe du profil de rabattement de la nappe (Figure 25) ?

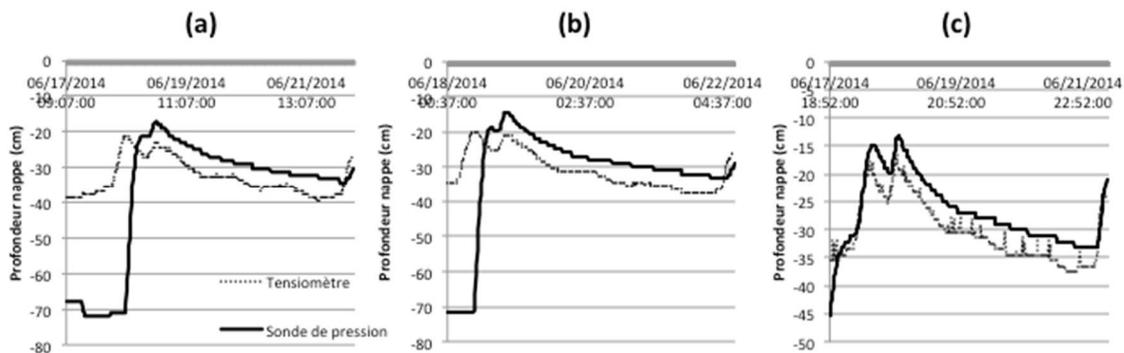


Figure 25 Profils de rabattement de la nappe pour le champ U18, Transept 1 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Réponse Concave : Si la courbe est de forme concave, il faut poursuivre à la question 4 pour approfondir le diagnostic.

Question 4 : Quelle est plus précisément l'allure du pic de la courbe de rabattement de la nappe ?

Réponse Pic peu prononcé : Si le pic est peu prononcé, la situation peut être qualifiée de 'haute résistance à l'entrée de l'eau dans le drain' (Smedema et al. 1983).

Concernant le diagnostic possible, une dernière distinction à analyser à l'aide du profil de charge est possible ici à l'aide de la figure 26.

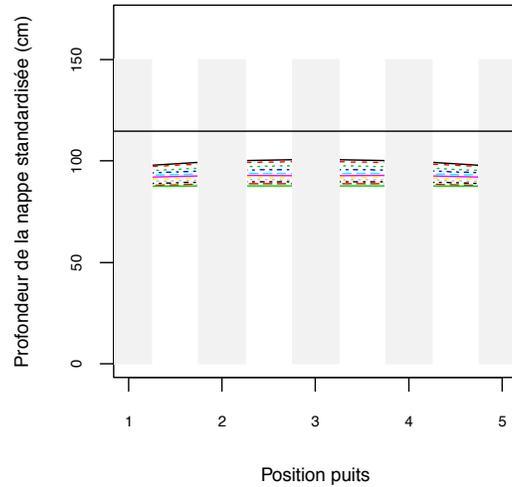


Figure 26 Profil de charge de la nappe pour le champ U18, Transect 1

Si le profil de charge est horizontal et que la charge hydraulique est faible au-dessus du drain :

→ Le diagnostic est donc : **Drain installé dans un horizon imperméable ou de faible conductivité hydraulique mais drain remblayé par du sol plus perméable**

Et il s'avère effectivement que le champ S est principalement composé de tourbe très imperméable. Le drain a été remblayé par du sol de surface plus perméable.

Exemple 2 : Champ K6 Transept 2

Question 1 : La relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et celles mesurées par la sonde de pression est-elle linéaire comme attendu (Figure 27) ?

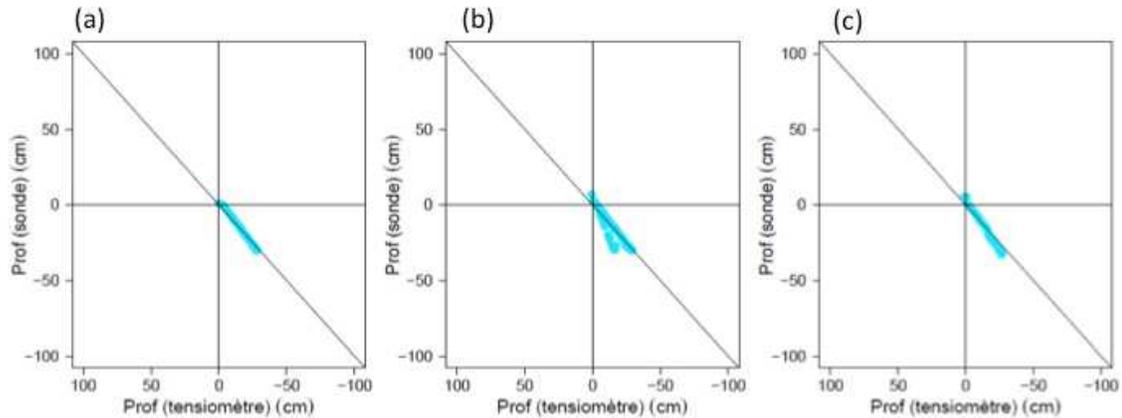


Figure 27 Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ K6, Transept 2 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Réponse Oui : Comme la relation est linéaire, il est possible de passer à la question 2.

Question 2 : La vitesse de rabattement de la nappe est-elle supérieure à 0.8 cm h^{-1} ? (Il est important de se rappeler ici que la norme de rabattement choisie est de 0.8 à 1.7 cm h^{-1}) (Figure 28) ?

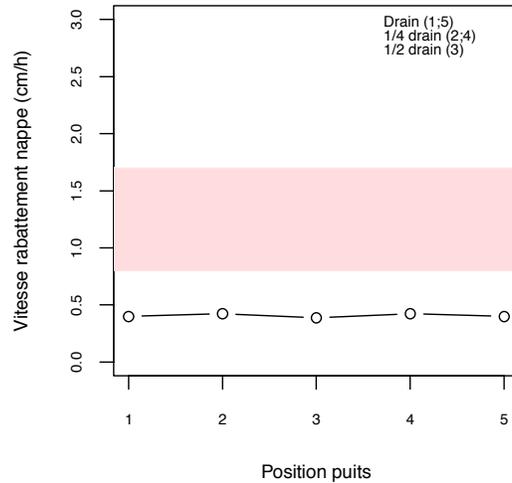


Figure 28 Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ K6, Transept 2

Réponse Non : La vitesse de rabattement se situe sous la limite inférieure de la norme de rabattement.

Si la réponse à la question 1 était Oui, il est possible continuer à la question 3.

Question 3 : Quelle est la forme de la courbe du profil de rabattement de la nappe (Figure 29) ?

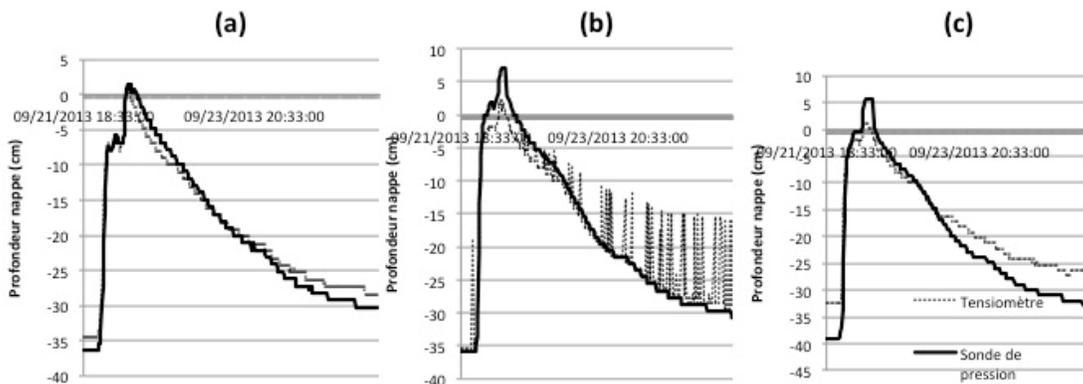


Figure 29 Profils de rabattement de la nappe pour le champ K6, Transept 2 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Réponse Concave : Si la courbe est de forme concave, il faut poursuivre à la question 4 pour approfondir le diagnostic.

Question 4 : Quelle est plus précisément l'allure du pic de rabattement de la courbe de rabattement de la nappe ?

Réponse Pic prononcé : Si le pic est prononcé, la situation peut être qualifiée de ‘haute résistance à l’écoulement de l’eau souterraine vers le drain’ (Smedema et al. 1983).

→ Le diagnostic possible est :

- **Nombre de drains insuffisants ou drains trop espacés.** Condition de sous design du système de drainage.
- **Drains trop proches de la surface du sol**

Exemple 3 : Champ W7 Transects 1 et 2

Question 1 : La relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et celles mesurées par la sonde de pression est-elle linéaire comme attendu (Figure 30) ?

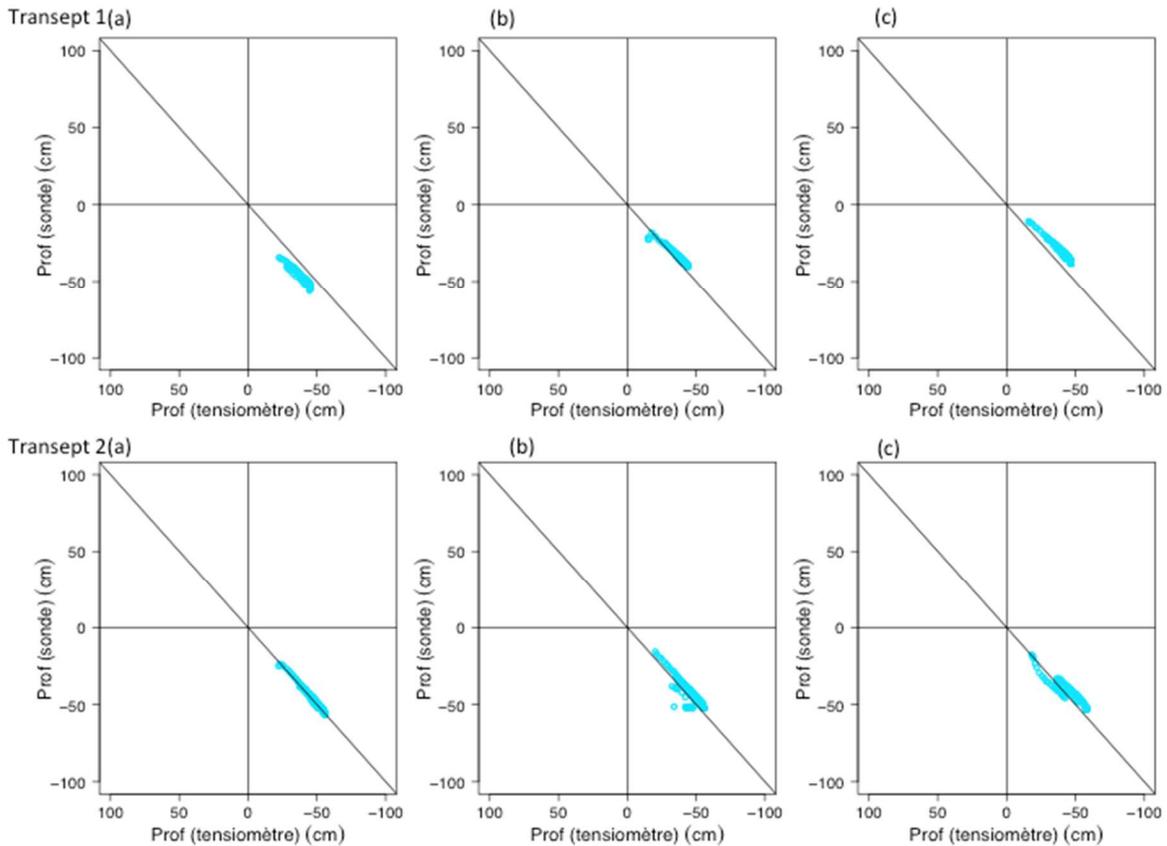


Figure 30 Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ W7, Transept 1 (en haut) et Transept 2 (en bas) : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Réponse Oui : Comme la relation est linéaire, il est possible de passer à la question 2.

Question 2 : La vitesse de rabattement de la nappe est-elle supérieure à 0.8 cm h^{-1} ? (Il est important de se rappeler ici que la norme de rabattement choisie est de 0.8 à 1.7 cm h^{-1}) (Figure 31) ?

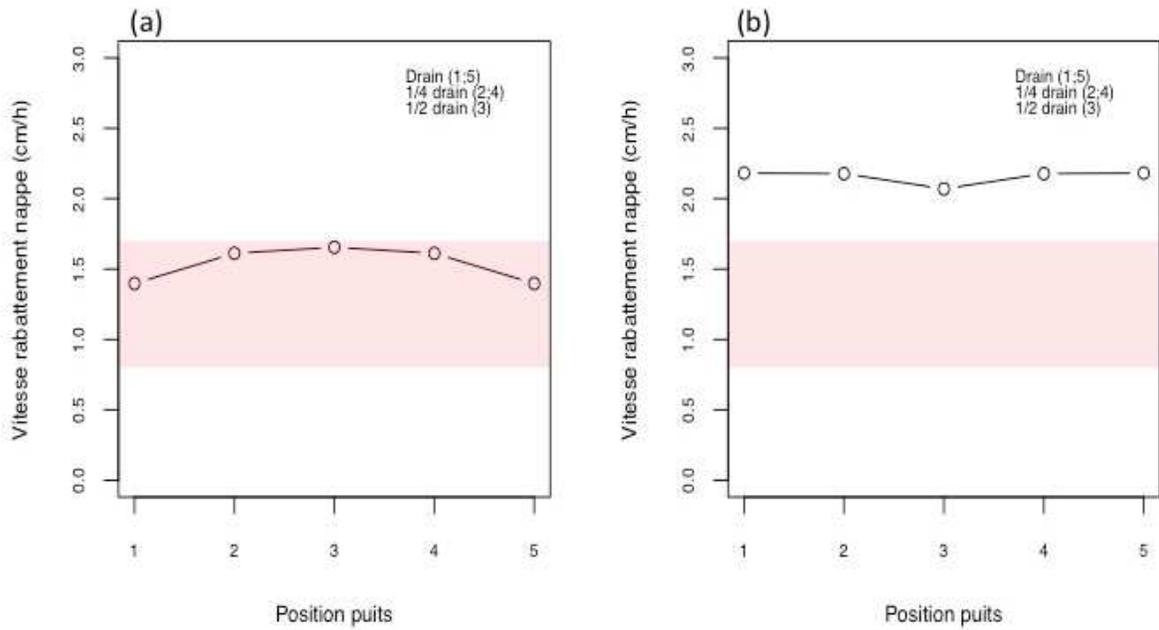


Figure 31 Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ W7 : (a) Transept 1 et (b) Transept 2

Réponse Oui : La vitesse de rabattement est au-dessus de la limite inférieure de la norme de rabattement.

Si la réponse à la question 1 était Oui, il n'y a aucun problème de drainage pour ce champ ou pour ce transept.

→ Le diagnostic est ainsi : **Le système de drainage fonctionne adéquatement.**

Exemple 4 : Champ E15 Transept 1

Question 1 : La relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et celles mesurées par la sonde de pression est-elle linéaire comme attendu (Figure 32) ?

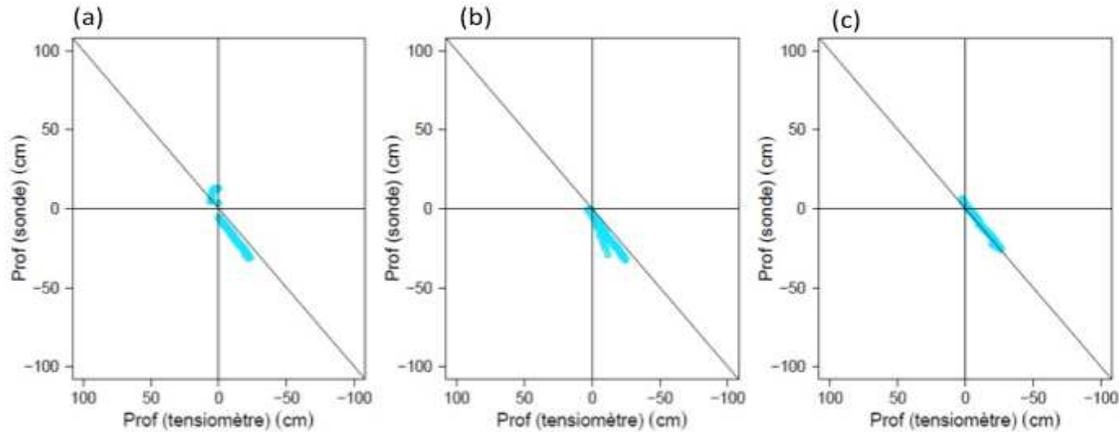


Figure 32 Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ E15, Transept 1 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Réponse Oui : Comme la relation est linéaire, il est possible de passer à la question 2.

Question 2 : La vitesse de rabattement de la nappe est-elle supérieure à 0.8 cm h^{-1} ? (Il est important de se rappeler ici que la norme de rabattement choisie est de 0.8 à 1.7 cm h^{-1}) (Figure 33) ?

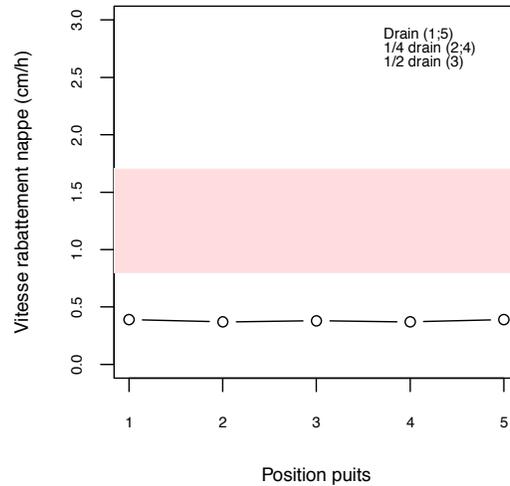


Figure 33 Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ E15, Transept 1

Réponse Non : La vitesse de rabattement se situe sous la limite inférieure de la norme de rabattement.

Si la réponse à la question 1 était Oui, il est possible continuer à la question 3.

Question 3 : Quelle est la forme de la courbe du profil de rabattement de la nappe (Figure 34) ?

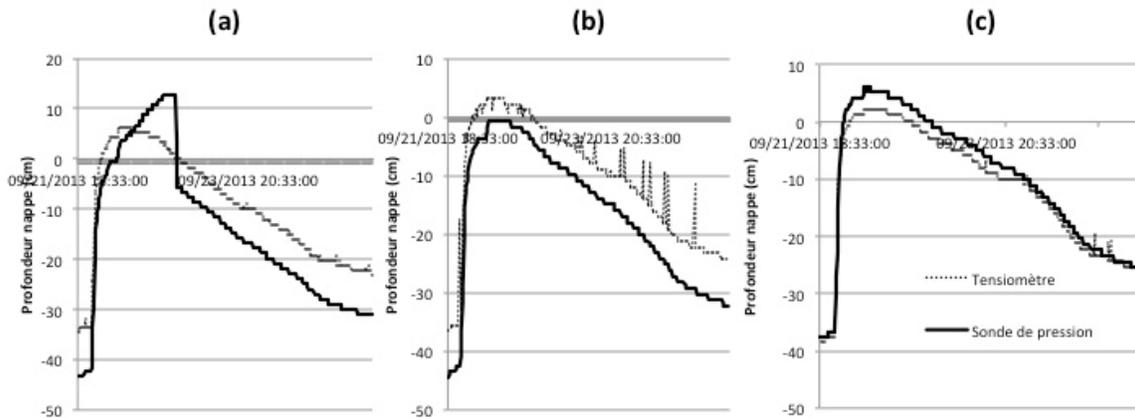


Figure 34 Profils de rabattement de la nappe pour le champ E15, Transept 1 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Réponse Convexe : Si la courbe est de forme convexe, la situation présente un écoulement en charge (Smedema et al. 1983).

→ Le diagnostic possible est ainsi : **Collecteur sous-dimensionné.**

Exemple 5 : Champ U8 Transept 2

Question 1 : La relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et celles mesurées par la sonde de pression est-elle linéaire comme attendu (Figure 35) ?

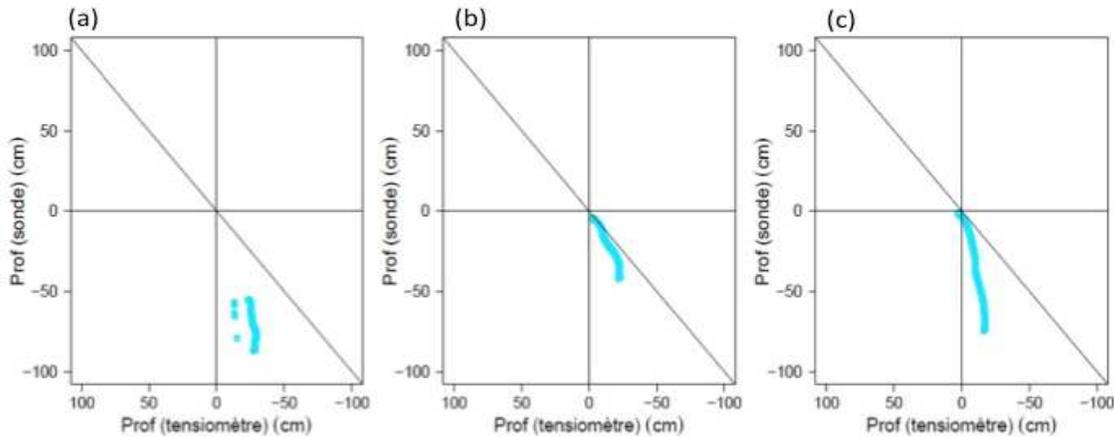


Figure 35 Relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et la sonde de pression pour le champ U8, Transept 2 : (a) puits au niveau du drain, (b) puits à un quart d'écartement entre les deux drains et (c) puits entre les deux drains

Réponse Non : La relation n'est pas linéaire. Mais il faut néanmoins poursuivre à la question 2 pour valider la situation.

Question 2 : La vitesse de rabattement de la nappe est-elle supérieure à 0.8 cm h^{-1} ? (Il est important de se rappeler ici que la norme de rabattement choisie est de 0.8 à 1.7 cm h^{-1}) (Figure 36) ?

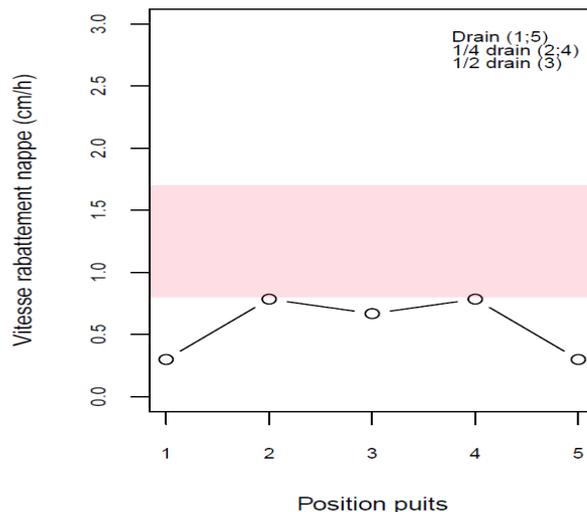


Figure 36 Vitesse de rabattement de la nappe pour le champ U8, Transept 2

Réponse Non : La vitesse de rabattement se situe sous la limite inférieure de la norme de rabattement (même si la vitesse s'en approche).

Si la réponse à la question 1 était Non, la situation démontre un problème au niveau du profil de sol et le diagnostic possible est alors :

→ **Nappe perchée** : horizon induré, horizon imperméable, semelle de labour.

Le tableau en Annexe 5 présente le diagnostic possible des systèmes de drainage pour les 21 champs à l'étude.

3.4 Conclusion

Le dispositif expérimental comprenant des puits d'observation, des tensiomètres et des sondes de pression a permis un suivi en temps réel de l'évolution de la profondeur de la nappe phréatique à la suite d'une irrigation de 6 heures. Grâce à ce dispositif expérimental, il a été possible de développer une méthode de diagnostic des systèmes de drainage, sous la forme d'une charte questions-réponses.

Les quatre grandes questions directrices de cette charte sont les suivantes :

1. La relation entre les données de profondeur de nappe mesurées par le tensiomètre et celles mesurées par la sonde de pression est-elle linéaire?
2. La vitesse de rabattement de la nappe est-elle supérieure à 0.8 cm h^{-1} ?
3. Qu'elle est la forme de la courbe du profil de rabattement de la nappe ?
4. Qu'elle est l'allure du pic de la courbe de rabattement de la nappe ?

Les principaux problèmes de drainage pouvant être mis en évidence grâce à cette charte sont :

- Un horizon induré, un horizon imperméable ou une semelle de labour conduisant à une nappe perchée
- Un drain en colmatage interne
- Un drain mal posé, écrasé, étiré
- Un collecteur sous dimensionné
- Un nombre de drains insuffisant ou des drains trop espacés
- Un drain trop proche de la surface du sol
- Un drain installé dans un horizon imperméable ou de faible conductivité hydraulique

- Un drain en colmatage externe
- Un drain installé dans un horizon imperméable mais qui a été remblayé par du sol plus perméable

Il est ainsi possible d'avancer que l'étude de données tensiométriques et de l'évolution de la hauteur de la nappe phréatique en fonction du temps permet de déterminer l'efficacité d'un système de drainage. Cette charte permet d'effectuer un diagnostic des systèmes de drainage afin d'évaluer leur efficacité et de vérifier qu'ils répondent toujours à leur fonction ; rabattre le plus rapidement possible la nappe phréatique suite à une irrigation, en vue de maintenir les plants de canneberges dans un environnement optimal pour leur croissance.

Bibliographie

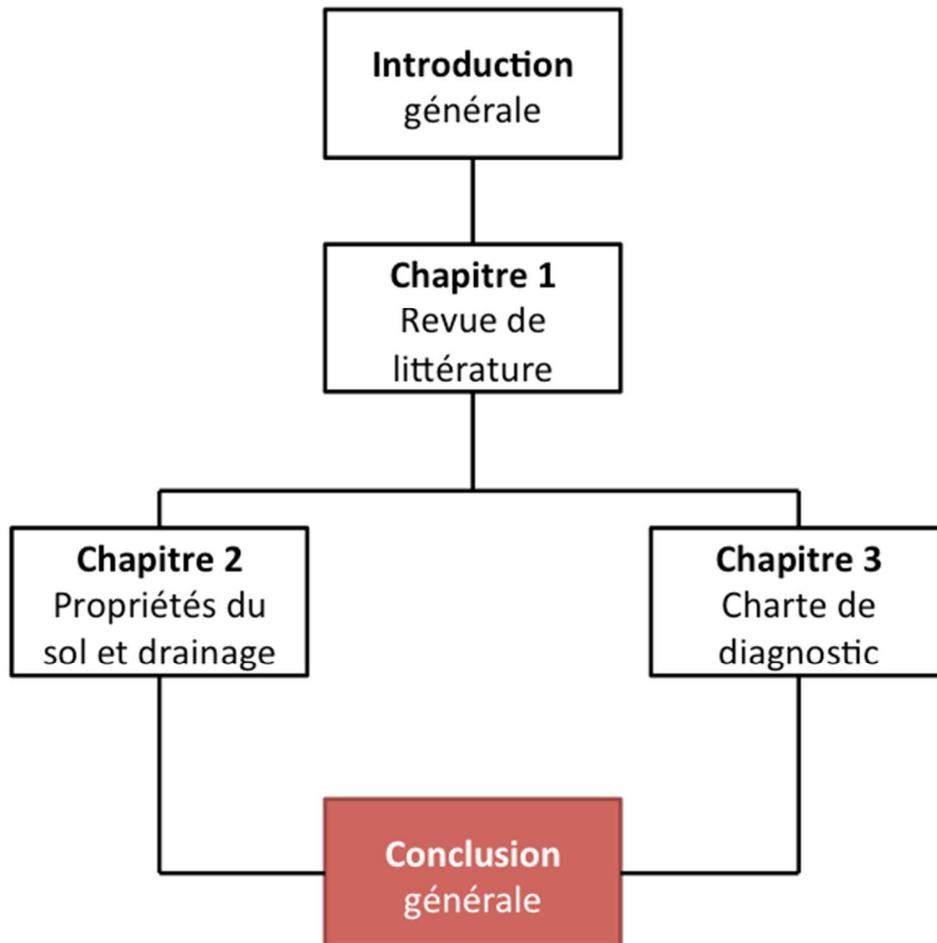
Pelletier, V., 2012. Problématique de drainage en production de canneberges. In *INPACQ Canneberges 2012*.

R Development Core Team, 2012. *R: A language and environment for statistical computing*, Vienna, Austria: R Foundation for statistical computing.

Sagnard, F. & Rejiba, F., 2010. *Application radar Techniques.*,

Smedema, L.K., Vlotman, W.F. & Rycroft, D.W., 1983. *Modern land drainage* A. A. Balk.,

Conclusion générale



De précédents travaux avaient pointé l'importance de combiner l'étude du drainage à celle de l'irrigation, en ce sens que la gestion de l'irrigation ne peut être optimisée en l'absence d'un système de drainage efficace. La grande sensibilité de la canneberge aux variations de potentiel matriciel de l'eau dans le sol avait également été mise en évidence et la gamme optimale pour la croissance des plants avait été située entre -3.0 et -7.5 kPa. Il était alors primordial de maintenir dans les champs de canneberges un système de drainage efficace et optimal permettant un rabattement de la nappe rapide pour que les plants soient au maximum dans leur gamme optimale de potentiel matriciel.

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était donc le développement d'une méthode d'évaluation de la performance des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges.

Afin d'initier un diagnostic des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberge, une première hypothèse supposant que les variabilités spatiales verticale et horizontale des propriétés hydrodynamiques du sol influençaient l'efficacité de drainage a été testée. En tout, 960 cylindres de sol ont été prélevés et rapportés en laboratoire afin d'étudier les variabilités spatiales verticale et horizontale des propriétés hydrodynamiques du sol. Les données obtenues de vitesse de rabattement de nappe, conductivité hydraulique, masse volumique, porosité, rendements, granulométrie, paramètres de rétention en eau, teneurs en eau du sol ont été analysées à l'aide d'une analyse de Cluster et d'une analyse en composantes principales. Ces deux analyses ont permis de mettre en évidence l'importance de la granulométrie et de la teneur en eau du sol sur les rendements, et ultimement sur l'efficacité de drainage. Ainsi, en présence d'un grand nombre de champs à diagnostiquer au sein d'une ferme, il serait pertinent de commencer par classer les champs par classe de granulométrie puis de choisir un ou deux champs par classe, pour continuer le diagnostic. Cette expérience a permis encore une fois de montrer l'importance de la teneur en eau du sol sur la croissance des plants de canneberges et notamment des teneurs en eau à -3 et -7.5 kPa. Dans le futur, il serait intéressant de réaliser des analyses statistiques plus poussées (ANOVA multivariée) afin de mieux comprendre l'interaction entre la granulométrie et les rendements. Également, ces analyses pourraient permettre de réaliser des simulations et, à l'aide des mesures de granulométrie, savoir quelles sont les propriétés hydrauliques du sol les plus probables pour tel type de champ, pour le diagnostic des systèmes de drainage.

Afin de poursuivre le diagnostic, une deuxième hypothèse a été énoncée : l'étude de données tensiométriques et de l'évolution de la hauteur de la nappe en fonction du temps après une

irrigation permettait de déterminer l'efficacité d'un système de drainage. C'est donc 21 champs qui ont été équipés d'un dispositif expérimental de suivi de la nappe phréatique, composé de puits d'observation, de tensiomètres et de sondes de pression. À la suite d'irrigations de 6 heures, il était alors possible de suivre en temps réel l'évolution de la profondeur de la nappe. Grâce à ce dispositif expérimental et à la méthode d'irrigation en 6 heures, il a été possible de produire une méthode de diagnostic des systèmes de drainage souterrain dans la production de canneberges. Cette méthode se présente sous la forme d'une charte dirigée par quatre grandes questions concernant la relation entre le tensiomètre et la sonde de pression, la vitesse de rabattement de la nappe, la forme de la courbe du profil de rabattement de la nappe et plus précisément, l'allure du pic de la courbe de rabattement. Les 21 champs ont été passés au travers de la charte, menant à des diagnostics plausibles, concernant leurs systèmes de drainage. Ainsi, il est possible d'avancer que l'étude de données tensiométriques et de l'évolution de la hauteur de la nappe phréatique en fonction du temps permet de déterminer l'efficacité d'un système de drainage. La prochaine étape, en vue d'améliorer l'utilisation de la charte, consistera à quantifier les étapes les plus qualitatives, notamment pour caractériser l'allure des pics des courbes de rabattement de la nappe. Il serait aussi pertinent de placer cinq puits et non trois puits seulement par transects pour bien représenter la variabilité spatiale. Il serait également intéressant de réaliser des répétitions d'irrigation au niveau des champs équipés.

Cette charte est relativement simple d'utilisation. Le seul facteur limitant à son utilisation est la possession du matériel de suivi de la nappe utilisé et la pose des puits d'observation. Il est également important de mentionner que cette charte de diagnostic des systèmes de drainage souterrain n'est pas seulement applicable aux sols sous culture de la canneberge, mais à un autre type de sol agricole (autres cultures) où des drains souterrains ont été mis en place.

Bibliographie générale

- AAC, 2015. Canneberge canadienne. *Agriculture et agroalimentaire Canada*. Available at: <http://www.agr.gc.ca/fra/industrie-marches-et-commerce/aide-a-l-exportation-a-l-importation-et-a-l-achat/acheter-des-produits-canadiens/canneberge-canadienne/?id=1426172190727>.
- AAC, 2013. *Vaccinium macrocarpon* Ait. (Canneberge à gros fruit). *Agriculture et agroalimentaire Canada*. Available at: <http://www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/publications-scientifiques-et-ressources/ressources/cultures-medicinales-canadiennes/cultures-medicinales/vaccinium-macrocarpon-ait-canneberge-a-gros-fruit/?id=1301436717750>.
- APCQ, 2015. Partenariat transpacifique (PTP) : Un accord espéré pour le secteur de la canneberge. Available at: <http://www.notreccanneberge.com/APCQ-Publications/Revue-de-presse/partenariat-transpacifique-ntp-un-accord-espere-pour-le-secteur-de-la-canneberge.html>.
- APCQ, 2014. *Statistiques de la culture de la canneberge au Québec*, Available at: <http://www.notreccanneberge.com/Industrie/Infos/statistiques.html>.
- Asselin, R., 1980. *Analyse de l'efficacité de deux réseaux de drainage souterrain de la région de Nicolet*. Université McGill, Montréal, Québec, Canada.
- Baumann, T.E. & Eaton, G.W., 1986. Competition among berries on the cranberry upright. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 111(6), pp.869–872.
- Bonin, S., 2009. *Régie agroenvironnementale de l'irrigation dans la production de canneberges (Vaccinium macrocarpon Ait.)*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Bouthillier-Grenier, V. (Clubs conseils en agroenvironnement), 2013. *Diagnostic drainage souterrain et étude de cas.*,
- Bruand, A. & Coquet, Y., 2005. Les sols et le cycle de l'eau. *Science du Sol et Environnement*, (1), pp.1–23. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00090203/>.
- Byrd, R., P. Lu, J. Nocedal and C. Zhu. 1995. A limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization. *SIAM Journal on Scientific Computing* 16: 1190-1208.
- Campling, P., Gobin, a. & Feyen, J., 2002. Logistic Modeling to Spatially Predict the Probability of Soil Drainage Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 66, p.1390.
- Cialella, A., Dubayah, R., Lawrence, W. & Levine, E., 1997. Predicting soil drainage class using remotely sensed and digital elevation data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 63(2), pp.171–177. Available at: http://beta.asprs.org/a/publications/pers/97journal/february/1997_feb_171-178.pdf.
- Cox, J.W. & McFarlane, D.J., 1995. The causes of waterlogging in shallow soils and their drainage in southwestern Australia. *Journal of Hydrology*, 167(1-4), pp.175–194.

- Davenport, J.R. & DeMoranville, C.J., 1993. A survey of several soil physical characteristics of cultivated cranberry bob soils in North America. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 24((13-14)), pp.1769–1773.
- Demoranville, C., 2006. Cranberry best management practice adoption and conservation farm planning in Massachusetts. *Hort Technology*, 16(September), pp.393–397.
- Demoranville, C., 2012. *Tile drainage in Massachusetts cranberry production : Implementation and best management practices*,
- Dieleman, P.J. & Trafford, B.D., 1976. *Drainage Testing. FAO Irrigation and Drainage paper no. 28*. Food and Agricultural Organization, ed., Rome, Italy.
- Eck, P., 1990. *The american cranberry* Rutgers University Press.
- Eissa, M., Hoogenboom, P. J., Abdel Ghany, M. & Tahun, A., 1996. Determination of q-h relations of field drains under Egyptian conditions. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Elrick, D.E., Sheard, R.W. & Baumgartner, N., 1981. A simple procedure for determining the hydraulic conductivity and water retention of putting green soil mixtures. *Proceedings of the 4th International Turfgrass Society Research Conference, Guelph, ON, Canada*, pp.189–200.
- FAO, 2007. Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems. In p. 233.
- Gaaloul, N., 1996. Evaluation of drainage systems in the lower Medjerda valley, Tunisia. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Gallichand, J., Ghany, M. B. A., Elbadry, O. A. A. & Broughton, R. S., 1996. Performance of two drainage experimental plots in the Nile Delta. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Gnatowski, T., Szatyłowicz, J. & Brandyk, T., 2010. Hydraulic properties of fen peat soils in Poland. *Geoderma*, 154(3-4), pp.188–195.
- Guyon, G., 1966. *Considérations sur l'hydraulique du drainage des nappes*, Antony, France.
- Guyon, G., 1972. Les formules de l'hydraulique des nappes rabattues par tranchées drainantes. *Bulletin technique d'information*, 271-272(Ministère de l'agriculture, France), pp.859–865.
- Hallema, D.W., Périard, Y., Lafond, J. A., Gumiere, S.J. & Caron, J., 2015. Characterization of Water Retention Curves for a Series of Cultivated Histosols. *Vadose Zone Journal*, 14(6), p.0. Available at: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/abstracts/14/6/vzj2014.10.0148>.
- Juneau, V., Caron, J. & Gallichand, J., 2009. Évaluation de l'efficacité des systèmes de drainage dans la production de canneberges. , p.37.
- Kidder, E.H. & Lytle, W.F., 1949. Drainage investigations in the plastic till soils of northern Illinois. *Agricultural Engineering*, 30, pp.384–386.

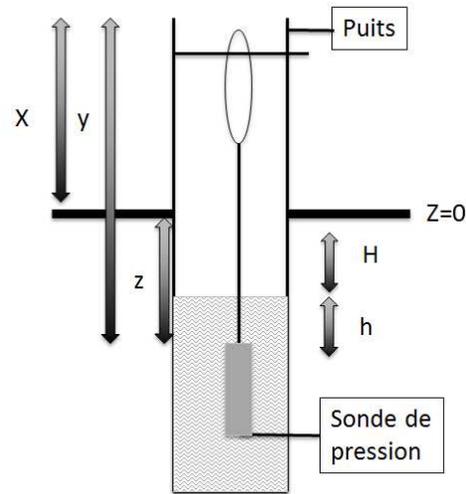
- Kilic, S., 2009. Mapping soil drainage classes of Amik Plain using Landsat images. *African Journal of Agricultural Research*, 4(September), pp.847–851.
- Lagacé, R., 2014. Drainage Chapitre 13 L'identification des problèmes de drainage. In Université Laval.
- Lagacé, R., 2013. Drainage Chapitre 7 Les modèles de drainage souterrain. In Université Laval.
- Lal, R. & Shukla, M.K., 2004. *Principles of soil physics* M. Dekker, ed., New York.
- Lamarre, G., 2014. Améliorer l'égouttement. *Fiche technique*, (MAPAQ).
- Lapierre, H., 2011. *Compte rendu de l'activité de transfert de connaissances sur l'aménagement d'une cannebergière sur sable du 18 mai 2010*,
- Laurent, T., 2014. *Réponse de la canneberge (Vaccinium macrocarpon Ait.) à l'aération du sol*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Qc, Canada.
- Legendre, P. & Legendre, L., 2003. *Numerical Ecology* E. S. B.V., ed.,
- Marie-Victorin, F., Rouleau, E. & Brouillet, L., 2002. *Flore laurentienne 3ème édition* G. Morin, ed., Montréal, Québec, Canada.
- Musy, A. & Soutter, M., 1991. *Physique du sol, 1ère édition* Presses po., Lausanne.
- Pazdro, Z. & Kozerski, B., 1990. *General hydrogeology* Wydawnictw., Warszawa.
- Pelletier, V., Gallichand, J., Caron, J., Jutras, S. & Marchand, S., 2015a. Critical irrigation threshold and cranberry yield components. *Agricultural Water Management*, 56, pp.1325–1332.
- Pelletier, V., Gallichand, J., Gumiere, S. J., Pepin, S. & Caron, J., 2015b. Water Table Control for Increasing Yield and Saving Water in Cranberry Production. *Sustainability*, 7, pp.10602–10619.
- Pelletier, V., Pepin, S., Laurent, T. Gallichand, J. & Caron, J., 2015c. Cranberry gas exchange under short-term hypoxic soil conditions. *HortScience [In review]*.
- Pelletier, V., 2013. *Irrigation de la canneberge basée sur des seuils de tension de l'eau dans le sol*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, Canada.
- Pelletier, V., 2012. Problématique de drainage en production de canneberges. In *INPACQ Canneberges 2012*.
- Pelletier, V., Gallichand, J. & Caron, J., 2013. Effect of soil water potential threshold for irrigation in cranberry yield and water productivity. *Trans. Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 56(6), pp.1325–1332.
- Poirier, I., 2010. La canneberge au Québec et au Centre-du-Québec - Un modèle de développement durable, à la conquête de nouveaux marchés. , p.37.

- Potvin, R., 2008. Aménagement des sorties de drains. *Fiche technique*, (MAPAQ), pp.1–6.
- R Development Core Team, 2012. *R: A language and environment for statistical computing*, Vienna, Austria: R Foundation for statistical computing.
- Raymond, R., Mailloux, A. & Dubé, A., 1965. *Pédologie de la région du Lac-Saint-Jean* MAPAQ, ed.,
- Reynolds, W.D., 1993. *Physical properties of organic soils. Soil sampling and methods of analysis*. M. R. Carter, ed., Boca Ration, FL: Lewis Publ.
- Romano, N.J., Hopmans, J.W. & Dane, J.H., 2002. *Suction table. Methods of soil analysis Part 4 Physical methods* J. H. Dane & G. C. Topp, eds.,
- Romppe, M., Laflamme, G., Ouellet, L., Carrier, D., Bubé, J.-C. & Pagé, F., 1984. *Étude pédologique du comté d'Arthabaska* MAPAQ, ed.,
- Sagnard, F. & Rejiba, F., 2010. *Application radar* Techniques.,
- Sandler, H. & DeMoranville, C., 2008. Cranberry Production: A Guide for Massachusetts. *UMass Amherst Cranberry Station*, p.37. Available at: <http://books.google.com/books?id=UOK4jwEACAAJ>.
- Sandler, H., DeMoranville, C. & Lampinen, B., 2004. Cranberry Irrigation Management. *UMass Amherst Cranberry Station*.
- Savoie, V., 2014. Améliorer le réseau hydraulique, le nivellement et le drainage souterrain d'un champs : des solutions au mauvais rendement. *Fiche technique*, (MAPAQ).
- Smedema, L.K., Abdel Dayen, S. M., Vlotman, W. F., Abdel Aziz, A. & Van Leeuwn, H., 1996. Performance assessment of land drainage systems. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.
- Smedema, L.K., Vlotman, W.F. & Rycroft, D.W., 1983. *Modern land drainage* A. A. Balk.,
- The R Development Core Team, R., 2008. R : a language and environment for statistical computing.
- Tremblay, F., 2012. Feuillet technique sur l'aménagement de cannebergières biologiques sur sable. *Agrinova*, pp.1–28.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), p.892.
- Verdonck, O.F., Cappaert, T.M. & De Boodt, M.F., 1978. Physical characterization of horticultural substrates. *Acta. Hortic.*, 82, pp.191–200.

Vincent, B., Vidal, A., Tabbet, D., Baqria, A. & Kupper, M., 1996. Use of satellite remote sensing for the assessment of waterlogging or salinity as an indication of the performance of drained systems. In *16th international congress of ICID, CAIRO*.

Ward, J.H.J., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.*, 58, pp.236–244.

Annexe 1 : Calcul de la profondeur de la nappe phréatique à l'aide des données de pression de la sonde de pression



La longueur X (cm) correspond à la portion de puits située au-dessus du sol, la longueur y (cm) est la longueur du filin métallique reliant le haut du puits à la sonde de pression, la valeur z (cm) est la profondeur de la sonde de pression sous le sol et la valeur h (cm) indique la quantité d'eau au-dessus de la sonde. Les données de pression de la sonde ont été corrigées afin de ne pas inclure la pression atmosphérique.

La notion de charge hydraulique a été ici utilisée :

$$H = h + z \text{ (cm)} \quad [A1.1]$$

où H (cm) représente ici la profondeur de la nappe par rapport à la surface du sol. Pour faciliter le calcul les unités seront d'abord en mètres (m) puis converties ultimement en centimètres (cm).

Premièrement :

$$h \text{ (m)} = \frac{P \text{ (Pa)}}{\rho \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}) \times g \text{ (m} \cdot \text{s}^{-2})} \quad [\text{A1.2}]$$

où P (Pa) est la pression mesurée par la sonde de pression, ρ (kg m^{-3}) est la densité du liquide (1000 kg m^{-3} pour l'eau) et g (m s^{-2}) est l'accélération due à la gravité (9.81 m s^{-2}). Prenons pour exemple une pression mesurée par la sonde de pression à un temps donné de 1200 Pa (1.2 kPa). Pour la profondeur de la sonde, considérons une longueur de filin (y) de 1.1 m et un haut de puits au-dessus du sol (X) de 0.37 m soit :

$$z = -(y - X) = -(1.1 - 0.37) = -0.73 \text{ (m)} \quad [\text{A1.3}]$$

D'où :

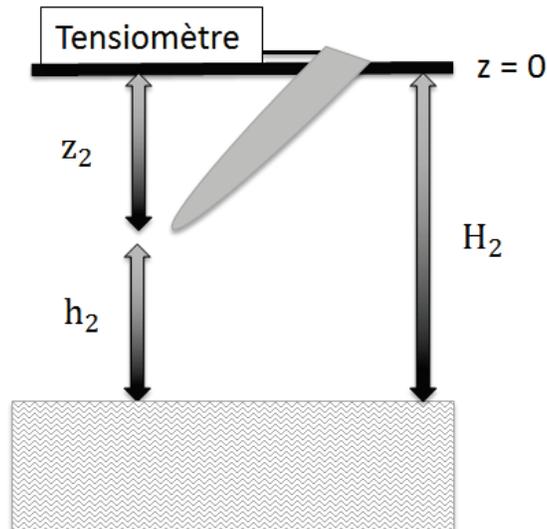
$$h \text{ (m)} = \frac{1200 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg m}^{-3} \times 9.81 \text{ m s}^{-2}} = 0.122 \text{ m} \quad [\text{A1.4}]$$

Suivi de :

$$H = 0.122 + (-0.73) = -0.608 \text{ (m)} \quad [\text{A1.5}]$$

Soit une profondeur de la nappe de 60.8 cm sous la surface du sol.

Annexe 2 : Calcul de la profondeur de la nappe phréatique à l'aide des données de tension du tensiomètre



La longueur h_2 (cm) représente la distance entre la pointe du tensiomètre et la surface de la nappe d'eau et la longueur z_2 (cm) représente la profondeur du tensiomètre par rapport à la surface du sol (-10 cm). La formule [3.1] a également été utilisée :

$$H_2 = h_2 + z_2 \text{ (cm)}$$

où H_2 (cm) représente la charge hydraulique en hauteur d'eau équivalente (donc la profondeur de la nappe estimée par rapport à la surface du sol). Pour faciliter le calcul les unités seront d'abord en mètres (m) puis converties ultimement en centimètres (cm). Prenons pour exemple une tension mesurée par le tensiomètre à un temps donné de -350 Pa (-0.35 kPa).

$$h_2 \text{ (m)} = \frac{-350 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg m}^{-3} \times .81 \text{ m s}^{-2}} = -0.035 \text{ m} \quad [\text{A2.1}]$$

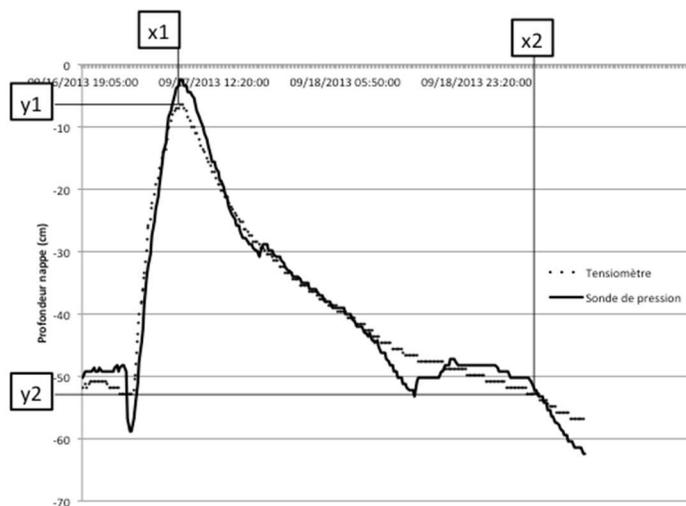
Suivi de :

$$H_2 = -0.035 + (-0.1) = -0.135 \text{ (m)} \quad [\text{A2.2}]$$

Soit une profondeur de nappe de 13.5 cm sous la surface du sol.

Annexe 3 : Évaluation de la vitesse de rabattement de la nappe phréatique

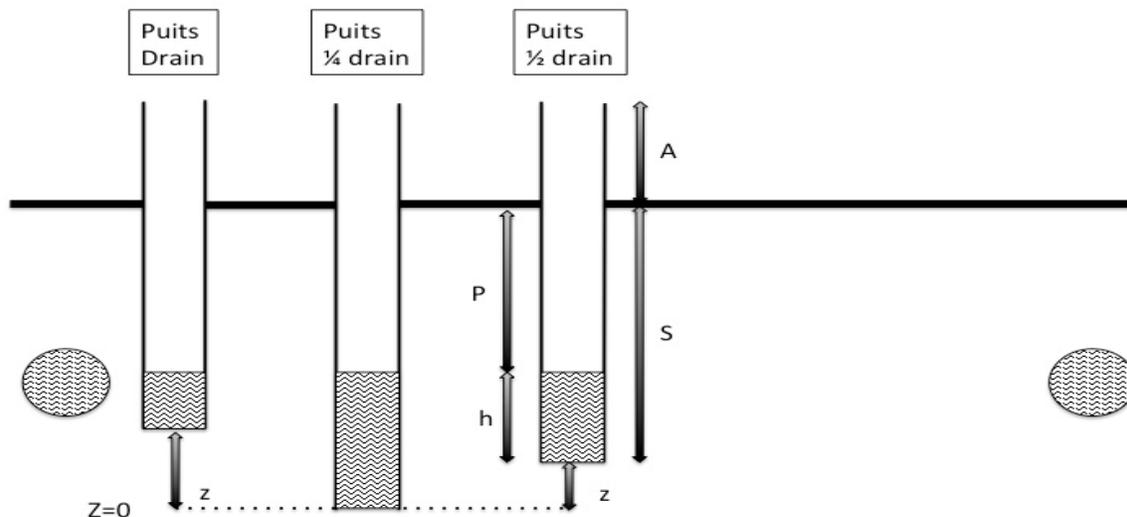
Il s'agissait ensuite d'évaluer la vitesse de rabattement de la nappe au niveau de chaque puits, puis de la présenter par transept. Autrement dit : en combien de temps la nappe retrouve-t-elle son niveau initial suite à une irrigation? La norme utilisée, telle que présentée dans le Chapitre 1 recommande un rabattement de la nappe à mi- écartement des drains de 40 cm en 24 à 48 heures (Pelletier 2012) soit une vitesse de rabattement de 1.7 cm à 0.8 cm par heure. Les données prises par le tensiomètre ont ici été utilisées. Il s'agissait de calculer le coefficient directeur de la droite déterminée par deux de ses points.



$$\text{Vitesse de rabattement de la nappe} = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} \cdot (-1) \left(\frac{\text{cm}}{\text{h}} \right) \quad [\text{A3.1}]$$

Annexe 4 : Évaluation du profil de rabattement de la nappe phréatique

Il s'agissait ici de dresser en complément un profil de charge en eau pour chaque puits, aux deux transepts. Les données de la sonde de pression ont ici été utilisées.



où A (cm) est la portion de puits au-dessus du sol, S (cm) est la portion de puits sous le sol, z (cm) est la différence entre le fond du puits le plus profond et le fond des autres puits, P (cm) est la profondeur de la nappe et h (cm) est la hauteur d'eau au-dessus du fond du puits.

Pour obtenir le profil de charge, les étapes sont les suivantes.

Transept 1	Taille du puits (cm)	A (cm)	S (cm)	Puits le plus profond	z (cm)
Drain	150	26	$150-26=124$	124	0
un quart drain	150	28	$150-28=122$		$124-122=2$
½ drain	150	33	$150-33=117$		$124-117=7$

Il s'agissait ensuite de calculer H , la charge d'eau à l'aide de l'équation [A1.1]. La valeur de la profondeur de la nappe phréatique P a été relevée toutes les 2.5 h (2 h 30min) pour un total de 25 h de rabattement.

	Temps (h)	0	2.5	5
Drain	P (cm)	-3.53	-4.37	-5.39
	S (cm)	124	124	124
	h (cm)	$124 - (-3.53) = 120.47$	119.63	118.61
	z (cm)	0	0	0
	H (cm)	120.47+0= 120.47	119.63	118.61
un quart drain	P (cm)	-2.25	-3.27	-4.29
	S (cm)	122	122	122
	h (cm)	119.75	118.73	117.71
	z (cm)	2	2	2
	H (cm)	121.75	120.73	119.71
½ drain	P (cm)	-3.53	-3.53	-4.54
	S (cm)	117	117	117
	h (cm)	113.47	113.47	112.46
	z (cm)	7	7	7
	H (cm)	120.47	120.47	119.46

Annexe 5 : Résumé des diagnostics plausibles pour les systèmes de drainage des 21 champs à l'étude

NA : ne s'applique pas ici.

Champ	Transept	1. Relation T-S linéaire ?	2. Vitesse de rabattement de la nappe > 0.8cm.h ⁻¹ ?	3. Forme de la courbe de rabattement ?	4. Allure du pic de rabattement ?	Diagnostic possible
A3	2	Oui	Non	Concave	Peu prononcé	Drain dans un horizon imperméable ou de faible K ou drain en colmatage externe
A19	1	Oui	Non	Convexe	NA	Collecteur sous dimensionné
A19	2	Oui	Non	Concave	Peu prononcé	Drain dans un horizon imperméable mais drain remblayé par du sol plus perméable
B5	2	Non	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
D3	1	Non	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
D3	2	Non	NA	NA	NA	Nappe perchée
E15	1	Oui	Non	Convexe	NA	Collecteur sous dimensionné
E15	2	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
F7	1	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
F7	2	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage

G3	1	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
G3	2	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
H5	1	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
H5	2	Non	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
K6	1	Oui	Non	Convexe	NA	Collecteur sous dimensionné
K6	2	Oui	Non	Concave	Prononcé	-Nombre de drains insuffisants -Drains trop proches de la surface du sol
K12	1	Oui	Non	Convexe	NA	Collecteur sous dimensionné
K12	2	Oui	Non	Convexe	NA	Collecteur sous dimensionné
M4	1	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
M4	2	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
O6	1	Oui	Non	Convexe	NA	Drain en colmatage interne
O6	2	Oui	Non	Convexe	NA	Drain en colmatage interne
P4	1	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
Q5	1	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
Q5	2	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
S7	1	Oui	Non	Concave	Peu prononcé	Drain dans un horizon

						impermeable ou de faible K ou drain en colmatage externe
S7	2	Non	NA	NA-	NA-	Nappe perchée
S24	1	Oui	Non	Convexe	NA	Fossé bouché
S24	2	Oui	Non	Concave	Peu prononcé	Drain dans un horizon impermeable ou de faible K ou drain en colmatage externe
U8	1	Oui	Non	Concave	Peu prononcé	Drain dans un horizon impermeable mais drain remblayé par du sol plus perméable
U8	2	Non	NA	NA	NA	Nappe perchée
U13	1	Oui	Non	Convexe	NA	Fossé bouché
U13	2	Oui	Non	Convexe	NA	Fossé bouché
U18	1	Oui	Non	Concave	Peu prononcé	Drain dans un horizon impermeable mais drain remblayé par du sol plus perméable
W7	1	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
W7	2	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
X4	1	Oui	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage
X4	2	Non	Oui	NA	NA	Aucun problème de drainage