

RAPPORT FINAL

SOUS-SOLAGE ET DRAINAGE TEMPORAIRE DES SOLS À PERMÉABILITÉ RÉDUITE

Responsable scientifique : MARC-OLIVIER GASSER, agr., Ph.D.

Co-auteure : Marie-Ève TREMBLAY, agr., M.Sc.

Rapport présenté au Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec

Date : 7 mars 2017

Projet IRDA : 901093

L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

Notre vision

En 2017, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

RESPONSABLE DE L'ÉTABLISSEMENT

- Stéphane P. Lemay, ing., P.Eng., agr., Directeur de la recherche et du développement, IRDA

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D., IRDA
- Marie-Ève Tremblay, agr. M.Sc., IRDA
- Jacques Desjardins, technicien principal, IRDA.
- Anicet Djiemon, Étudiant à la maîtrise, Université Laval

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière du Programme Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Des remerciements s'adressent également à l'IRDA qui a fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient les participants du projet et reconnaissent l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA, dont notamment Marie-Hélène Perron et l'équipe des ouvriers agricoles encadrés par Michel Noël. Nous voulons également remercier les ingénieurs et agronomes du MAPAQ en région (Bruno Garon, Victor Savoie, Louis Robert) qui ont contribué aux travaux en participant aux réunions de démarrage et de mi-parcours pour finaliser les protocoles et en fournissant un appui pour la sélection des sites expérimentaux chez les producteurs. Nous voulons aussi souligner la contribution des agronomes des clubs conseils en agroenvironnement qui ont aussi contribué à identifier des sites expérimentaux chez les producteurs.

Sous-Solage et drainage temporaire des sols à perméabilité réduite

Rapport final

Présenté au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
200, chemin Sainte-Foy, 10e étage
Québec (Québec) G1R 4X5

Dans le cadre de Cultivons l'avenir 2, une initiative fédérale-provinciale-territoriale, Programme Innov'Action.

Préparé par :



Marc-Olivier Gasser, Ph. D.
IRDA

Marie-Eve Tremblay, agr. M. Sc.
IRDA

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Marc-Olivier Gasser
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-2380, poste 650
Courriel : marc-o.gasser@irda.qc.ca

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Gasser, M.-O. et M.-E Tremblay. 2017. Sous-Solage et drainage temporaire des sols à perméabilité réduite. Rapport final. Projet financé par le programme Innov'Action du MAPAQ. IRDA. 44 pages et Annexes.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

RÉSUMÉ

Les sols de faible perméabilité bénéficieraient de travaux de sous-solage qui améliorent à la fois leur drainage interne et qui décompactent des horizons rendus quasi imperméables par la compaction profonde. Le sous-solage profond exécuté par un béliet (bulldozer) pourrait être plus efficace pour temporairement améliorer le drainage de ses sols par rapport au sous-solage habituellement réalisé par les producteurs avec leurs équipements conventionnels. L'orientation des travaux de sous-solage par rapport aux drains pour évacuer l'eau des sillons sous-solés, serait aussi un facteur important pour assurer l'efficacité du sous-solage dans les sols à mauvais drainage interne. Le projet visait à comparer en dispositif expérimental l'efficacité de deux types de sous-soleuses (sur béliet ou conventionnel avec tracteur) opérées en modes parallèle ou perpendiculaire aux drains pour améliorer les conditions de drainage et la productivité des sols par rapport à la parcelle témoin. Deux sites d'essai ont été sélectionnés en Chaudière-Appalaches et un en Montérégie sur des sols argileux naturellement mal drainés et souffrant de compaction importante. Les rendements de cultures commerciales (maïs, soya, céréales) ont été mesurés avec des batteuses expérimentales à différentes distances des drains. Des mesures de masses volumiques apparentes et de résistance à la pénétration d'un cône ont été réalisées sur des transects prélevés dans les cinq traitements à l'étude. Les rendements des cultures ont été comparés en regard des différents traitements de sous-solage imposés et des changements observés au niveau des propriétés physiques et du comportement hydraulique des sols.

Aux termes du projet, les essais de sous-solage réalisés dans cette étude ont généré des augmentations significatives de rendement seulement la première année après les travaux, sur deux des trois sites à l'étude. Cependant, les traitements ont eu différents effets selon les sites. Sur le site St-Guillaume, le béliet opéré perpendiculairement aux drains a produit des rendements significativement plus élevés que le béliet opéré parallèlement et le témoin, procurant une augmentation de rendement de 1,3 tm/ha de maïs-grain. Sur le site St-Henri, les traitements avec sous-soleuse conventionnelle (opérée perpendiculairement ou parallèlement aux drains) ont les mieux performé, procurant des augmentations de rendement de 1,55 à 2,4 tm/ha de maïs-grain. Le sens du sous-solage semble avoir amélioré la performance de l'opération la première année, mais cet effet n'était pas constant. Ainsi, le sous-solage avec le béliet opéré perpendiculairement aux drains a amélioré les rendements sur le site St-Guillaume la première année, tandis que la sous-soleuse conventionnelle de producteur opéré perpendiculairement aux drains a seulement eu tendance à améliorer le rendement sur le site St-Henri. Le type de sous-soleuse (béliet ou conventionnelle) ne semble pas avoir eu d'effet important sur les rendements. Les rendements mesurés en deuxième année sur deux sites n'étaient plus influencés significativement par les travaux de sous-solage. Toutefois, les différents traitements de sous-solage tendaient à augmenter les rendements, sauf le béliet exécuté parallèlement aux drains. À l'inverse sur le site St-Pierre, ce dernier traitement avait tendance à produire de meilleurs rendements de blé en 2016.

L'analyse des profils a révélé que les problématiques de compaction n'étaient pas les mêmes sur les trois sites, même si les profils réalisés en début de projet avaient laissé entrevoir des problèmes de compaction profonde sur les trois sites. En réalité sur le site St-Guillaume, l'argile Sainte-Rosalie souffrait davantage de compaction ou de déstructuration du sol en surface (0-30 cm), plutôt qu'en profondeur, tel qu'en témoignent les différents profils de masse volumique apparente réalisés. Sur les sites St-Henri et

St-Pierre, la compaction augmentait avec la profondeur dans le loam argileux et l'argile lourde Kamouraska. Les différentes mesures de propriétés hydrauliques et physiques des sols n'ont pas révélé d'importantes différences entre les différents traitements de sous-solage, par rapport au témoin

Lorsqu'aucun contrôle de la circulation de la machinerie n'est exercé dans le champ après des opérations de sous-solage, le sol reviendrait rapidement à son état compact initial. La modification des pratiques agricoles par un contrôle du trafic et de la circulation des tracteurs, épandeurs, moissonneuses et chars à grain, etc. serait donc essentielle pour prolonger le bénéfice des opérations de sous-solage. Par ailleurs, pour être efficace, le sous-solage devrait être suivi de cultures pouvant bénéficier de l'aération du sous-sol pour l'investir de leurs racines et produire un maximum de biomasse pour alimenter la macrofaune et favoriser la structuration du sol. L'utilisation de cultures pérennes serait à privilégier dans ce sens, mais l'opération de sous-solage se rentabiliserait davantage à court terme avec des cultures commerciales comme le maïs-grain. Les conditions au sol sont évidemment loin d'être idéales pour la récolte d'une telle culture au mois de novembre et pour assurer un effet positif à plus long terme du sous-solage. Pour être en mesure de contrôler et de réduire l'impact de la circulation de la machinerie sur les sols récemment sous-solés dans des conditions adverses, il faudrait choisir des cultures qui permettent d'amenuiser ces risques et d'augmenter le retour en biomasses racinaires et aériennes. Les cultures de céréales ou de canola suivies d'engrais verts ou de cultures de couvertures seraient à privilégier.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	3
1 Introduction.....	6
2 Hypothèses.....	9
3 Objectifs de l'étude	9
4 Matériel et méthodes.....	10
4.1 Description des sites.....	10
4.2 Caractérisation des sites.....	11
4.3 Méthodologie	18
4.3.1 Dispositif expérimental.....	18
4.3.2 Opérations de sous-solage	19
4.3.3 Suivi des nappes d'eau souterraines	23
4.3.4 Suivi des propriétés physiques du sol.....	24
4.3.5 Suivi de la croissance des plants et positionnement au GPS-RTK	25
4.4 Analyses statistiques	26
5 Résultats	27
5.1 Données Climatiques.....	27
5.2 Effet des traitements de sous-solage sur le rendement des cultures.....	29
5.3 Comportement hydraulique des sols	32
5.4 Impact des traitements sur les propriétés des sols.....	33
5.4.1 Masse volumique apparente.....	33
5.4.2 Porosité totale	34
5.4.3 Teneur en air volumique	37
5.5 Corrélation de la hauteur des plants au rendement	39
6 Conclusion	41
Références.....	43
Annexe A – Description des profils pédologiques.....	45
Annexe B Profils de MVA pour le site St-Guillaume en 2015.....	48
Annexe c Profils de MVA pour le site St-Henri en 2015	49
Annexe D Profils de MVA pour le site St-Henri en 2016	50
Annexe E Profils de MVA pour le site St-Pierre en 2016.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Propriétés chimiques initiales du sol des sites à l'étude.	13
Tableau 2 : Propriétés physiques initiales du sol des sites à l'étude.	14
Tableau 3 : Mesures <i>in situ</i> et en laboratoire de la <i>conductivité</i> hydraulique des sols des sites retenus.	17
Tableau 4 : Description technique des appareils de sous-solage et de la profondeur d'opération réalisée sur les sites	20
Tableau 5 : Opérations culturales pratiquées sur le site St-Guillaume	21
Tableau 6 : Opérations culturales pratiquées sur le site St-Henri.....	21
Tableau 7 : Opérations culturales pratiquées sur le site St-Pierre.....	22
Tableau 8 : Information liée aux cultures pratiquées sur les sites au cours des années 2015 et 2016	22
Tableau 9 : Statistiques agroclimatiques des sites à l'étude pour 2015 et 2016	27
Tableau 10 : Rendements en maïs-grain à 15 % d'humidité, humidité du grain et poids spécifique en 2015	29
Tableau 11 : Rendement en grain des cultures à 15 % d'humidité, humidité du grain et poids spécifique en 2016	30
Tableau 12 : Conductivité hydraulique saturée relevée avec le perméamètre de Guelph sur les sites St-Guillaume et de St-Henri au cours du mois de juillet 2015 (H1 : 5 cm et H2 : 10 cm de hauteur de colonne d'eau).....	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Sites pour l'essai de sous-solage	11
Figure 2 Courbe de désorption en laboratoire des cylindres de sol de chaque site, en fonction de la profondeur	15
Figure 3 Modèle de dispositif et positionnement des parcelles selon les drains en place.....	18
Figure 4 Appareils de sous-solage employés pour les travaux au champ.....	19
Figure 5 Schéma d'un tube perforé muni d'un capteur de pression Hobo.....	23
Figure 6 : Aile volante eBee opérée par la compagnie Drones Falcon Bleu (a) et aile volante UX5 opérée par le Groupe HGB (b)	25
Figure 7 Bilan d'évapotranspiration pour la période de mai à novembre 2015	28
Figure 8 Bilan d'évapotranspiration pour la période de mai à novembre 2016	28
Figure 9 Masse volumique apparente (MVA) moyenne selon les traitements et la profondeur	33
Figure 10 Ratio entre la masse volumique du traitement et celle du témoin (Vert = amélioration (< 0,9), Gris = comparable (0,9 – 1,1), Rouge = compaction (> 1,1) pour le site St-Henri en 2015	34

Figure 11 Porosité moyenne des profils de sol en fonction de leur profondeur et de leur position le long du transect.....	35
Figure 12 Porosité des échantillons de 2015 et 2016 pour le traitement sous-soleuse parallèle aux drains.....	35
Figure 13 Interpolation des teneurs en sol volumiques (1-porosité totale) (cm^3/cm^3) par krigeage universel avec des mesures de résistance à la pénétration d'un cône comme variable ancillaire sur le site St-Henri en 2015.	36
Figure 15 Teneur en air volumique (TAV) moyenne en fonction des traitements et de la profondeur	38
Figure 16 Utilisation des modèles numériques de surface (MNS) et des modèles numériques d'élévation (MNE) pour calculer la hauteur des plants de maïs sur le site St-Guillaume en 2015	39
Figure 17 Corrélation des données de MNS, de MNE et de hauteur de plant en fonction de rendement en grain.....	40
Figure 18 Prédiction du rendement en grain sur le reste de la parcelle en fonction des modèles linéaire et quadratique	40

1 INTRODUCTION

La compaction des sols cultivés n'est pas un nouveau problème au Québec. Ce problème a déjà fait l'objet du 13^e colloque de génie rural tenu à l'Université Laval en 1986. En 1990, l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec a évalué à 100 000 ha la superficie des sols en monocultures annuelles ayant subi de la compaction (Tabi et al. 1990). Depuis, le poids des équipements agricoles circulant dans les champs n'a cessé d'augmenter. Depuis les années quatre-vingt-dix, la charge exercée par des citernes à lisier de 2 à 3 essieux est passée de 7 à 8 tonnes par essieu (Bédard et al., 1996) à 11 tonnes par essieu en 2010. Même si la pression exercée au sol est davantage contrôlée par l'utilisation de pneus radiaux à basse pression, la pression exercée sur le sol en profondeur a tout de même augmenté. Toutefois, plusieurs fournisseurs de citernes à lisier offrent encore des pneus à plis en biais moins performants, car le coût est moins élevé. Environ 80% des citernes vendues seraient ainsi équipées (Lamarre, comm., pers.) Alors que la compaction à la surface du sol est principalement reliée à la pression exercée par les pneus ainsi qu'au lissage dans des conditions critiques de teneur en eau du sol, la compaction profonde résulte plus spécifiquement de la charge appliquée par essieu ou de la charge totale des équipements (Gameda et al., 1987). Selon Håkansson et Reeder (1994), la compaction augmente en profondeur avec l'augmentation des charges par essieu. Avec des charges de plus de 10 tm/essieu, elle peut affecter le sol à plus de 50 cm de profondeur. L'ensemble du parc de machinerie (tracteurs, moissonneuses, boîtes à grain, etc.) a suivi la même tendance d'augmentation des charges. Certaines opérations culturales sont également exécutées à plus grandes vitesses dans des conditions de sol non-optimales. De telles charges appliquées au sol entraînent de la compaction en profondeur dans bien des sols cultivés. Si la compaction dans la couche de sol travaillée peut être remédiée à plus ou moins court terme par des changements au niveau des pratiques agricoles, en réduisant le travail du sol par exemple, la compaction sous cette couche de surface pourrait persister durant de nombreuses années, voir même ne jamais disparaître (Håkansson et Reeder, 1994).

Plusieurs essais menés en Europe et en Amérique du Nord ont démontré que la compaction des sols peut devenir permanente à plus de 40 cm de profondeur dans les sols argileux, même sous l'action du gel/dégel et des fentes de retrait (Håkansson et Reeder 1994). En fait, l'occurrence et l'intensité de ces facteurs atténuants (gel/dégel, humectation/dessiccation) diminuent rapidement en profondeur dans le sol. Par ailleurs, certains sols issus de tills par exemple, sont naturellement compacts, peu perméables en profondeur et les propriétés physiques du substratum (horizon C) ont peu évolué depuis des millénaires. D'autres sols peu perméables en profondeur sont particulièrement sensibles à la compaction, puisqu'ils sont plus souvent saturés en eau au printemps et à l'automne, lors des travaux agricoles. L'Agence fédérale allemande de l'environnement fixe à 10 cm/jour le seuil critique en deçà duquel la conductivité hydraulique saturée d'un sol en profondeur est limitée et présente des signes de compaction (Lebert, 2008). Le guide québécois de référence technique en drainage souterrain fixe quant à lui à 3 cm/jour le seuil critique de conductivité hydraulique en deçà duquel l'installation d'un système de drainage souterrain n'est pas justifiée économiquement (CRAAQ, 2005). Selon l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec, sur les 159 séries de sols analysées, près de 18 % des observations sur celles-ci présentaient entre 40 à 60 cm de profondeur, une conductivité hydraulique saturée (CH) inférieure à 3 cm/jour, tandis que 41 % des observations présentaient une conductivité inférieure à 10 cm/jour (Tabi, 1990).

D'après ces résultats, plusieurs sols présentaient une perméabilité réduite à plus de 40 cm de profondeur, même ceux sous prairies.

Effet de la compaction sur les rendements et les propriétés des sols

Mehuys (1986) a estimé à 15% les pertes de rendements associées à la compaction sur l'ensemble des cultures du Québec, même si l'effet de la compaction sur les pertes de rendements est difficile à généraliser. Outre une augmentation de la masse volumique apparente du sol, la compaction des sols agricoles entraîne, une modification de ses propriétés hydrauliques, dont l'infiltration, le drainage et la capacité de rétention en eau. La résistance à la pénétration des racines, la réduction de la porosité d'air et la réduction de la disponibilité en eau sont parmi les principaux facteurs limitant la croissance des plantes en sol compact, mais leur impact varie selon les conditions de sol et de culture.

L'état du sol en surface (0 - 25 cm) et sa compaction affecte davantage les rendements que la compaction profonde (> 40 cm), mais persiste moins longtemps car des cycles naturels de facteurs atténuants comme le gel/dégel ou la sécheresse/humectation opèrent plus rapidement à la surface du sol (Häkansson et Reeder, 1994). La productivité des cultures est généralement mieux corrélée aux propriétés du sol de surface exploité par la majorité des racines de 0 à 25 cm de profondeur. En revanche, la compaction en profondeur réduit la perméabilité du sol et le maintien dans des conditions humides favorisant la compaction des horizons de surface. Le travail de sol en surface peut temporairement ameublir cette couche sans régler les problèmes en profondeur. De plus, le travail trop fréquent du sol contribue à oxyder la matière organique du sol et entraîne à long terme à la détérioration de la structure.

La compaction des sols argileux moins perméables

Les sols argileux de la plaine du Saint-Laurent sont parmi les sols cultivés les plus productifs du Québec lorsque des travaux d'amélioration foncière et de drainage systématique ont été réalisés. On vise un abaissement suffisamment rapide de la nappe au printemps pour permettre les travaux culturaux et réduire l'asphyxie des plantes au niveau des racines. Toutefois, certains de ces sols sont naturellement moins perméables et seraient particulièrement plus sensibles aux phénomènes de compaction. La présence de nappe perchée entre les drains permet d'identifier des conditions de sol compact (Brunelle et Savoie, 2000), mais cette nappe perchée pourrait résulter d'une perméabilité réduite en profondeur naturelle ou induite par de la compaction profonde.

Remédiation

Parmi les solutions mises de l'avant pour contrer la compaction des sols, les mesures d'évitement telles que la réduction des charges par essieu, l'utilisation de chenilles ou de pneus basse pression, le trafic contrôlé et finalement l'évitement de la circulation dans des conditions non optimales du sol priment (Brochu et Massicotte, 2000). Certains facteurs naturels tels que les cycles de gel/dégel, mouillage/séchage et l'activité biologique des racines et des vers de terre peuvent également jouer un rôle important pour atténuer la compaction en surface, mais la fréquence et l'intensité de ces effets diminuent rapidement en profondeur dans le sol.

Le diagnostic et la correction des problèmes de drainage et de compaction ont fait l'objet de plusieurs fiches techniques (Brochu et Massicotte, 2000; Brunelle et Savoie, 2005; Weil, 2009). Un bon diagnostic avec des profils de sol et l'analyse de l'égouttement et du drainage des champs demeure essentiel avant d'entreprendre ou de recommander toute intervention d'envergure. Il est généralement recommandé de vérifier et de régler les problèmes d'égouttement de surface et de drainage interne avant d'entreprendre des travaux de décompaction profonde.

La décompaction mécanique du sol réalisée de 30 à 60 cm de profondeur (sous-solage) a des effets variables sur la compaction profonde et l'augmentation de la productivité (Håkansson et Reeder 1994). Réalisé dans de bonnes conditions (sols secs, orientation des travaux), le sous-solage sert à initier un long processus de régénération du sol. La réduction du trafic et des charges subséquentes est aussi essentielle, car le sol fragilisé peut se recompacter rapidement et parfois plus qu'au départ. Dans les sols à faible perméabilité, l'eau s'accumule dans le sillon sous-solé et les rendent ainsi encore plus sensibles à la compaction. Le décompactage ou la fragmentation de la couche compacte doit permettre à l'eau de s'infiltrer plus profondément. Mais si le sol demeure imperméable en profondeur, l'eau risque de ne pas s'évacuer et alors engendrer d'autres problèmes d'enlèvement et de compaction sous l'effet de la machinerie. L'orientation des travaux de sous-solage en fonction des drains, des pentes du terrain ainsi que du trafic usuel permettrait de mieux évacuer cette eau et ainsi réduire les risques de compaction subséquente, mais aussi de favoriser le drainage de nappes perchées (Cochrane et al., 1994).

Des effets mitigés du sous-solage

Plusieurs travaux de recherche sur le sous-solage ont été réalisés à l'échelle du Québec et les effets sur l'augmentation de la productivité des sols sont relativement variables. Sur sept sites d'essais de sous-solage en sol argileux dans la région de Saint-Hyacinthe, Brochu (1986) rapporte des baisses de rendements (< 5%) de maïs grain par rapport au témoin sur deux sites, des augmentations de l'ordre de 5 à 15% sur 4 sites et des augmentations de 25% sur un site. Cependant, sur ce dernier site, les rendements moyens étaient les plus faibles et le sous-solage à 60 cm de profondeur a eu un meilleur effet sur les rendements que le sous-solage à 45 cm. Quelques travaux permettent d'anticiper une efficacité supérieure du sous-solage en profondeur des sols argileux moins perméables, lorsque les travaux mécaniques sont réalisés perpendiculairement aux drains (Cochrane et al., 1994). En Allemagne, l'amélioration foncière des argiles lourdes d'origine alluviale a été réalisée par la combinaison du drainage systématique et du drainage taupe exécuté perpendiculairement aux drains (Muller, 1988). Parmi dix essais de sous-solage démarrés en 2012 en Chaudière-Appalaches dans des sols d'origines variées, les augmentations de rendements en céréales les plus importantes (de l'ordre de 50%) ont été constatées sur une argile Kamouraska qui avait été sous-solée à 70 cm de profondeur perpendiculairement aux drains. La parcelle témoin présentait d'importantes baisses de rendement en s'éloignant de la ligne de drain, tandis que les rendements étaient plus uniformes sur la parcelle sous-solée. À l'inverse dans un loam argileux de la série Lebras, nous n'avons pas mesuré d'augmentation de rendements en orge, soya ou maïs-grain suite à un sous-solage profond (70 cm) exécuté parallèlement au drain (Gasser et al., 2012). Des baisses de rendement en orge ont même été mesurées sur les parcelles sous-solées. La création d'ornières sur les sillons de la sous-soleuse suite au passage de la machinerie révélait la persistance de l'eau dans ces sillons qui ne trouvait pas d'exutoire en profondeur.

Bien que ces résultats préliminaires indiquent une certaine importance de l'orientation du sous-solage par rapport aux drains, peu d'études ont systématiquement évalué cet effet et plus particulièrement dans des sols argileux de faible perméabilité. Dans ces sols, le sous-solage profond pourrait être bénéfique à la fois pour briser la couche compacte, favoriser l'infiltration de l'eau en profondeur et finalement diriger cette eau en direction des drains. Un abaissement plus rapide des nappes perchées situées sous la couche de sol travaillée aurait un impact majeur sur le potentiel de rendement des cultures. Dans les sols moins perméables, la profondeur du sous-solage aurait aussi son importance pour diminuer la distance entre le drain et le fond du sillon et favoriser l'infiltration de l'eau. Les sous-soleuses conventionnelles opérées avec un tracteur agricole à pneumatiques travaillent pour la plupart à moins de 50 cm de profondeur en raison de la force exigée et de la traction réduite de ce type de locomotion. La force de traction nécessaire pour un travail régulier à des profondeurs de plus de 60 cm serait plus facilement obtenue avec un bélier ou un tracteur à chenille. À la lumière de ces résultats, le présent projet tentera d'évaluer et de comparer en dispositif expérimental, l'efficacité de deux types de sous-soleuses (sur bélier ou conventionnel avec tracteur) opérées en modes parallèle et perpendiculaire aux drains pour améliorer les conditions de drainage et la productivité des sols par rapport à la parcelle témoin dans des sols argileux naturellement peu perméables et souffrant de compaction importante.

2 HYPOTHÈSES

Les sols de faible perméabilité bénéficieraient de travaux de sous-solage qui améliorent à la fois leur drainage interne et qui décompactent des horizons rendus quasi imperméables par la compaction profonde. Le sous-solage profond exécuté par un bélier (bulldozer) serait plus efficace pour temporairement améliorer le drainage de ses sols par rapport au sous-solage habituellement réalisé par les producteurs avec leur équipement conventionnel. L'orientation des travaux de sous-solage par rapport aux drains pour évacuer l'eau des sillons sous-solés, serait aussi un facteur important pour assurer l'efficacité du sous-solage dans les sols à mauvais drainage interne.

3 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le projet avait pour objectif de mesurer et comparer l'efficacité de différentes techniques de sous-solage pour améliorer la productivité des cultures commerciales en sols moins perméables et compactes. Le projet visait spécifiquement à comparer en dispositif expérimental l'efficacité de deux types de sous-soleuses (sur bélier ou conventionnel avec tracteur) opérées en modes parallèle et perpendiculaire aux drains pour améliorer les conditions de drainage et la productivité des sols par rapport à la parcelle témoin.

4 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Trois essais de sous-solage ont été réalisés sur chez deux producteurs de Chaudière-Appalaches et un de Montérégie. Pour rencontrer les objectifs de l'étude, les sites sélectionnés devaient présenter les caractéristiques suivantes : le terrain et le sol devaient être homogènes sur au moins 3 ha, présenter une pente inférieure à 0,5 %, avoir un sol argileux de faible perméabilité et démontrer des problèmes de compaction. Les sites retenus devaient aussi avoir un système de drainage fonctionnel, avec une distance entre les drains inférieure à 20 m.

4.1 DESCRIPTION DES SITES

Le premier site (St-Guillaume) implanté à l'automne 2014 était situé à Saint-Guillaume dans la MRC de Drummond, à la limite de la Montérégie Est et du Centre du Québec (latitude 45° 52' 48,36'' et longitude -72° 49' 22,80'') (Figure 1a). Le sol identifié sur les cartes pédologiques et validé sur le terrain était de la série Sainte-Rosalie. La texture du sol variait de l'argile en surface à l'argile lourde en profondeur. Le terrain était relativement plat, mais était traversé au deux tiers du champ, par une bausseure et un drain collecteur (variation d'altitude orthométrique de 33,39 à 34,43 m). Un ancien drain situé à une profondeur de 102 à 130 cm traversait sur sa longueur le champ et le dispositif. Avant les travaux de sous-solage en septembre 2014, de nouveaux drains espacés de 9,4 m ont été installés de chaque côté de ce drain central à une profondeur de 72 à 90 cm. Le terrain a ensuite été nivelé et les opérations de sous-solage ont suivi.

Le second site (St-Henri) implanté à l'automne 2014 était localisé à Saint-Henri-de-Lévis dans la MRC de Bellechasse, région de Chaudière-Appalaches (latitude 46° 41' 15,72'' et longitude -71° 0' 57,60'') (Figure 1b). Le sol identifié sur la carte pédologique et observé sur le terrain était une variante de la série Kamouraska. La texture variait d'un loam argileux en surface à un loam limoneux en profondeur. Le sol du site avait été remanié après l'installation du système de drainage en 1980 pour former deux planches arrondies de type Richard d'environ 40 m de largeur et 1,1 m de hauteur, afin d'améliorer l'écoulement des eaux de surface. L'altitude orthométrique du site variait de 85,6 à 87,5 m. Les drains étaient espacés de 12,8 m avec une profondeur variant de 0,5 à 1,5 m dépendant de la position sur la planche. Les drains situés à côté de la raie de curage étaient à une profondeur variant de 46 à 70 cm de la surface du sol, alors que les drains situés près du sommet de la planche étaient de 140 à 150 cm de la surface du sol. Lors des opérations de sous-solage en septembre 2014, le sol était sous une prairie de graminée récemment tuée avec un herbicide.

Le troisième site (St-Pierre) implanté à l'automne 2015 était situé à Saint-Pierre-de-la-Rivière-du-Sud, dans la MRC de Montmagny, région de Chaudière-Appalaches (latitude 46° 54' 26,64'' et longitude -70° 36' 7,20'') (Figure 1c). Le sol identifié sur la carte pédologique et observé sur le terrain était une argile Kamouraska. La texture du sol était une argile lourde en surface et en profondeur. Le terrain présentait une pente régulière de 0,2 % et son altitude orthométrique variait de 48,4 à 49,5 m. Cependant, la parcelle est située au pied d'un escarpement avec un dénivelé de 100 m. Les drains étaient situés à une profondeur variant de 94 à 118 cm, espacés au 10,5 m. Lors des travaux de sous-solage, un engrais vert contenant un mélange de douze espèces avait été implanté sur le site.

a) Site St-Guillaume



b) Site St-Henri



c) Site St-Pierre



Figure 1 Sites pour l'essai de sous-solage

4.2 CARACTÉRISATION DES SITES

Une caractérisation du sol des sites a été réalisée lors de leur sélection et durant l'expérimentation dans les sols non perturbés. Les plans de drainage ont été géoréférencés et validés avec des observations réalisées sur le terrain. L'évaluation de l'égouttement de surface a été évaluée de façon visuelle sous la supervision d'un ingénieur spécialisé en drainage pour le site St-Guillaume. Le fonctionnement des drains a été vérifié par des observations à la sortie des collecteurs en régime saturé.

Des profils de sol ont été creusés et observés dans chaque bloc de chaque site jusqu'à 1 m de profondeur. La couleur du sol, la distribution des racines, la structure et les traces de compaction ont été observées et notées. La description des profils est présentée à l'Annexe A – Description des profils pédologiques. Lors de la réalisation des profils, un échantillon de sol a été prélevé sur quatre strates : 0 – 15 cm, 15 cm - fin du Ap, fin du Ap – 60 cm et 60 – 90 cm, afin de déterminer les propriétés physico-chimiques en laboratoire. De plus, 3 cylindres de sol non

perturbé ont été prélevés à chaque profondeur, afin de déterminer la masse volumique apparente, la conductivité hydraulique saturée et réaliser une courbe de désorption des sols en cinq points (2,5, 10, 33, 250 et 1500 kPa).

Au laboratoire, la granulométrie a été déterminée par densimétrie à l'hydromètre de Bouyoucos. Tous les échantillons de sol ont été analysés pour le pH à l'eau dans un ratio sol : eau de 1 : 5 et le pH tampon (SMP) dans un ratio sol : solution de 1 : 10 avec une électrode. La matière organique a été mesurée par perte au feu à 375°C. Les teneurs en C et N total ont été déterminées par combustion sèche sur un appareil LECO. Les teneurs en P, K, Ca, Mg, Al, Cu, Fe, Mn, Zn, et Na ont été dosées par spectroscopie à l'ICP dans des extraits de sol : solution Mehlich 3 à un ratio 1 : 5. La masse volumique apparente des sols a été déterminée sur les cylindres de sol prélevés au champ et après séchage à 105°C au laboratoire. La teneur en eau volumétrique au champ a été déterminée en pesant préalablement les cylindres de sol humide. La teneur en air au champ a été déterminée par différence entre la porosité totale et la teneur en eau volumétrique. La porosité totale a été établie à partir de la masse volumique apparente et de la masse volumique réelle des sols estimée à 2,65 g/cm³.

Les propriétés chimiques des sols sont présentées au Tableau 1. D'une manière générale, la fertilité du sol des sites retenus était bonne, sans carence apparente majeure. Les sites St-Guillaume et St-Henri présentaient toutefois des pH à l'eau élevés, variant de 7,2 à la surface du sol à 7,7 en profondeur (60-90 cm) à Saint Guillaume et de 7,4 à la surface du sol à 7,9 en profondeur à St-Henri. Ce dernier site présentait également des teneurs élevées en P, Cu et Zn, témoignant des apports fréquents d'engrais de ferme en provenance d'élevage de vaches laitières et de porc.

Les propriétés physiques des sols sont présentées au Tableau 2. Les masses volumiques apparentes et les teneurs en air mesurées dans les sols indiquent des états de compaction variables selon la profondeur et les sites à l'étude. Ainsi, le sol du site St-Guillaume présentait un état plus compact à la surface, avec une masse volumique apparente plus faible en profondeur et une teneur en air relativement faible (< 0,10 cm³/cm³) sur l'ensemble du profil au moment de l'échantillonnage. Les sols sur les sites St-Henri et St-Pierre présentaient en revanche un état plus compact en profondeur (> 30 cm de profondeur), avec des masses volumiques très élevées pour des sols argileux (> 1,60 cm³/cm³) sur le site St-Henri et des teneurs en air aussi très restreinte en profondeur (< 0,10 cm³/cm³) sur ces deux sites.

Tableau 1 : Propriétés chimiques initiales du sol des sites à l'étude.

Profondeur cm	pH eau	M.O. PAF 375°C		C		N LECO		C/N	P	K	Ca Mehlich - 3			Mg		Cu		Zn		P/Al %
		-----	-----	-----	-----	-----	-----				-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
St-Guillaume																				
0-15	7,16 ±0,52	3,39 ±0,32	1,8 0,1	0,15 0,02	11,8 0,9	41 ±27	131 ±26	2977 ±543	415 ±38	2,5 0,6	2,2 0,9	4,80								
15-30	7,19 ±0,31	3,07 ±0,37	1,7 0,2	0,14 0,03	11,7 1,0	21 ±16	108 ±25	2640 ±270	516 ±115	2,1 0,5	1,3 0,4	2,46								
30-60	7,51 ±0,08	1,14 ±0,07	0,5 0,0	0,06 0,00	9,4 0,6	1 ±0	163 ±12	2728 ±327	1416 ±159	1,4 0,1	0,7 0,0	0,07								
60-90	7,69 ±0,32	0,95 ±0,05	0,5 0,0	0,04 0,00	10,5 0,9	2 ±0	228 ±29	2346 ±241	1354 ±97	2,4 0,4	0,9 0,0	0,20								
St-Henri																				
0-15	7,39 ±0,15	6,72 ±3,42	4,3 2,4	0,26 0,08	15,5 4,4	105 ±35	173 ±42	3680 ±463	230 ±29	7,1 1,3	7,1 1,6	13,89								
15-30	7,36 ±0,21	6,18 ±3,92	4,0 2,8	0,22 0,10	16,3 5,0	72 ±30	110 ±25	3397 ±637	215 ±29	6,0 1,3	3,2 1,1	8,96								
30-60	7,69 ±0,24	1,59 ±0,84	0,8 0,6	0,06 0,03	11,8 3,3	3 ±2	127 ±32	3088 ±1762	353 ±102	2,4 1,1	1,5 0,4	0,36								
60-90	7,93 ±0,20	0,99 ±0,05	0,7 0,3	0,05 0,01	13,6 5,9	2 ±1	168 ±33	4524 ±2408	455 ±102	2,7 1,1	2,3 0,7	0,27								
St-Pierre																				
0-15	6,76 ±0,43	7,74 ±1,39	4,3 0,8	0,25 0,04	17,0 1,4	26 ±10	174 ±36	3573 ±761	563 ±84	4,0 0,4	3,5 0,3	2,71								
15-30	6,55 ±0,11	6,73 ±0,87	3,5 0,6	0,19 0,05	18,7 2,5	8 ±4	121 ±12	2899 ±385	707 ±144	3,6 0,3	2,0 0,6	0,79								
30-60	7,11 ±0,05	1,28 ±0,10	0,3 0,0	0,04 0,01	8,0 1,0	1 ±0	175 ±20	2534 ±243	873 ±87	2,6 0,8	1,7 0,5	0,13								
60-90	7,33 ±0,09	0,78 ±0,08	0,2 0,0	0,04 0,01	5,8 0,6	6 ±1	157 ±42	1585 ±389	562 ±177	2,8 0,2	2,3 0,6	0,80								

Tableau 2 : Propriétés physiques initiales du sol des sites à l'étude.

Profondeur cm	M.O. - PAF 375°C (%) -	Sable		Limon		Argile		Classe texturale	Masse volumique apparente g/cm ³	Porosité totale cm ³ /cm ³	Teneur en air au champ		Teneur en air au champ / porosité totale cm ³ /cm ³
		-----	-----	-----	-----	-----	-----				cm ³ /cm ³	cm ³ /cm ³	
St-Guillaume													
0-15	3.4 0.3	27.7 6.5	22.0 3.5	50.3 4.0	Argile	1.49 0.04	0.44 0.02	0.07 0.00	0.17 0.02				
15-30	3.1 0.4	27.0 7.0	22.3 2.5	50.7 4.6	Argile	1.50 0.07	0.43 0.03	0.07 0.02	0.15 0.03				
30-60	1.1 0.1	4.7 1.5	20.3 3.2	75.0 1.7	Argile lourde	1.32 0.03	0.50 0.01	0.07 0.02	0.15 0.03				
60-90	1.0 0.1	2.0 1.0	18.7 2.1	79.3 2.1	Argile lourde	1.29 0.07	0.51 0.03	0.06 0.02	0.12 0.04				
St-Henri													
0-15	6.7 3.4	21.0 2.9	40.0 2.4	39.0 3.2	Loam argileux	1.27 0.14	0.52 0.05	0.11 0.04	0.21 0.07				
15-30	6.2 3.9	22.5 4.0	38.8 2.8	38.8 1.7	Loam argileux	1.31 0.22	0.50 0.08	0.12 0.04	0.24 0.07				
30-60	1.6 0.8	11.6 14.5	43.0 10.7	45.4 5.1	Argile limoneuse	1.55 0.10	0.42 0.04	0.07 0.05	0.16 0.11				
60-90	1.0 0.1	1.8 1.5	52.5 5.2	45.8 4.5	Argile limoneuse	1.49 0.04	0.44 0.02	0.03 0.01	0.07 0.03				
St-Pierre													
0-15	7.7 1.4	2.0 1.0	31.3 1.5	66.7 2.3	Argile lourde	1.17 0.11	0.56 0.04	0.13 0.10	0.22 0.15				
15-30	6.7 0.9	1.7 1.2	27.7 2.5	70.7 1.5	Argile lourde	1.21 0.04	0.54 0.02	0.09 0.03	0.17 0.05				
30-60	1.3 0.1	6.7 6.4	27.3 2.5	66.0 8.7	Argile lourde	1.33 0.03	0.50 0.01	0.06 0.03	0.12 0.06				
60-90	0.8 0.1	22.7 3.5	32.0 13.2	45.3 9.9	Argile	1.46 0.20	0.45 0.08	0.03 0.04	0.06 0.07				

Des courbes de désorption des sols ont été établies sur des échantillons de sols non dérangés prélevés avec un cylindre au champ et sur des échantillons dérangés (Carter et Gregorich, 2007). Le cylindre de sol était graduellement saturé en eau, puis, placé sur une plaque poreuse d'une résistance théorique de ½ bar préalablement humecté jusqu'à l'équilibre. Des pressions constantes de 2,5 et 10 kPa étaient appliquées sur la plaque jusqu'à l'obtention d'un poids constant du cylindre. Le cylindre était par la suite placé sur une plaque poreuse dans un extracteur à pression (5 bar Pressure Plate Extractor Cat#1600, Soil Moisture Equipment corp., CA) et des pressions constantes de 33 et 250 kPa étaient appliquées sur les cylindres. À chaque pression appliquée, le cylindre était pesé et le contenu en eau résiduel en eau était comparé au contenu initial saturé afin de déterminer la proportion d'eau désorbée. La mesure de désorption à 1500 kPa de pression a été réalisée sur sol séché et tamisé à 2 mm. Les sols étaient placés dans des cylindres de caoutchouc de 1 cm de haut par 5 cm de diamètre, sur membrane de cellulose, mouillés à saturation, puis soumis à une pression de 1500 kPa jusqu'à contenu en eau constant dans un extracteur à pression (Pressure membrane extractor Cat#1000, Soil Moisture Equipment corp., CA). La quantité d'eau contenue dans le sol après cette extraction à 1500 kPa était déterminée par différence entre le poids humide du sol à l'équilibre et son poids séché à 105°C et exprimée par rapport au poids du sol sec.

La Figure 2 présente les courbes de désorption des sols prélevés à différentes profondeurs sur les trois sites. On y présente la teneur en eau volumétrique en fonction de la pression matricielle exercée. Pour le site St-Guillaume, les courbes de désorption de 0 à 15 cm et de 15 à 30 cm de profondeur sont confondues et ces courbes de désorption indiquent une capacité de rétention en eau inférieure à celle mesurée à plus de 30 cm de profondeur, en lien avec les masses volumiques apparentes plus élevées mesurées en surface (Tableau 2). Le site St-Guillaume démontrait ainsi une disparité dans ses propriétés hydrauliques selon la profondeur. Ainsi, en surface, les teneurs en eau aux différentes tensions matricielles étaient parmi les plus faibles, alors qu'en profondeur, ces teneurs étaient parmi les plus élevées. La réserve en eau utile, calculée par différence entre la teneur en eau à capacité au champ (33 kPa) et celle au point de flétrissement (1500 kPa), était également plus faible dans les horizons de surface du sol (< 30 cm) du site St-Guillaume (0,16 à 0,17 cm³/cm³) par rapport aux sols de St-Henri et St-Pierre (0,20 à 0,21 cm³/cm³). À l'inverse, cette réserve en eau utile était plus élevée en profondeur (> 30 cm) sur le site St-Guillaume (0,19 à 0,24 cm³/cm³) par rapport aux deux autres sites (0,13 à 0,17 cm³/cm³).

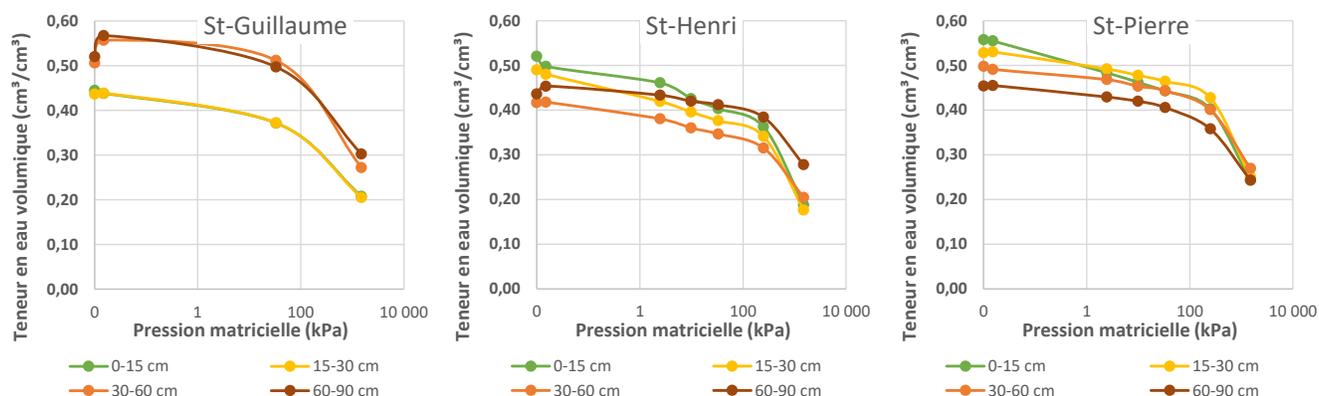


Figure 2 Courbe de désorption en laboratoire des cylindres de sol de chaque site, en fonction de la profondeur

Les sols des sites St-Pierre et St-Henri présentaient à l'inverse du site St-Guillaume des capacités de rétention en eau supérieures dans les horizons de surface à moins de 30 cm de profondeur par rapport au sol plus profond. Le site St-Henri présentait cependant une plus faible capacité de rétention à la plupart des tensions, par rapport aux deux autres sites. À la pression matricielle de 33 kPa (capacité au champ du sol), le site St-Henri présentait les plus faibles teneurs en eau (entre 0,35 et 0,41 cm³/cm³) et le site St-Pierre présentait des valeurs intermédiaires variant de 0,41 à 0,46 cm³/cm³.

La conductivité hydraulique saturée des sols a été déterminée au laboratoire après avoir saturé graduellement des cylindres de sol prélevés au champ. Les cylindres de sols saturés ont par la suite été placés sous colonne d'eau constante et l'écoulement gravimétrique de l'eau a été mesuré à l'obtention d'un débit constant. La conductivité hydraulique saturée a aussi été mesurée au champ, selon la méthode du trou à la tarière (Lagacé, 2012 et Van Beers, 1965). Ainsi, 2 trous de 10 cm de diamètre ont été creusés tôt au printemps dans une parcelle témoin de chaque bloc. Le premier trou avait une profondeur de 1 m (K1) alors que le second avait une profondeur de 2 m (K2). Suite à la stabilisation de la nappe d'eau dans les trous, la nappe était rabattue du quart de sa hauteur initiale. La remontée de la nappe dans les trous était suivie grâce à des mesures manuelles avec règles flottantes et automatisées avec des capteurs de pression (Hobo U20 Water Level Logger, MA) jusqu'à ce qu'elle ait remonté du quart de la hauteur d'eau rabattue. Le coefficient de conductivité hydraulique est obtenu grâce à la formule suivante :

$$K = \frac{4000r^2\Delta Y}{(H + 20r) \left(2 - \frac{Y_m}{H}\right) Y_m \Delta t}$$

- Où
- K = conductivité hydraulique (m/j)
 - r = rayon du trou
 - H = profondeur du trou sous la nappe (cm)
 - Δt = temps écoulé pendant la remontée de la nappe (sec)
 - Y_m = distance entre le niveau de la nappe et le niveau moyen de l'eau dans le trou pour l'intervalle de temps mesuré (Volume pompé x (ΔY/2))
 - ΔY = variation de la nappe (Profondeur après pompage – Profondeur après remontée) (cm)

Le Tableau 3 résume les moyennes de conductivité hydraulique du sol mesurées sur les trois sites. Ces sols affichent tous une conductivité hydraulique inférieure à 1 m/jour et dans 13 cas sur 18 des valeurs inférieures à 0,1 m/jour. Une conductivité hydraulique inférieure à 0,03 m/jour est aussi considérée limitante pour justifier l'installation de drains agricoles et assurer l'efficacité du système (CRAAQ, 2007). Le site St-Guillaume présentait les valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées lors des mesures *in situ*. Cependant, les mesures réalisées en laboratoire donnaient des valeurs très faibles en profondeur (> 30 cm) pour ce site, soit plus petites que 0,0004 m/jour. La conductivité hydraulique saturée mesurée entre 15 et 30 cm de profondeur sur le site St-Henri était en moyenne relativement élevée (0,9 m/jour), alors que les valeurs observées au champ sur les profils K1 et K2 étaient très faibles (< 0,03 m/jour). Toutefois, à l'examen des quatre observations prises sur le site St-Henri entre 15 et 30 cm de profondeur, deux observations présentaient des valeurs supérieures à 1,6 m/j, alors que les deux

autres étaient extrêmement basses (0,12 et < 0,0004 m/jour). Lors de la réalisation des profils pédologiques sur ce site, des discontinuités à ces profondeurs avaient été notées (Annexe A). Ces discontinuités résultent probablement du remaniement du terrain lors de la formation des planches arrondies. La densité de ces discontinuités était très faible et peut expliquer en grande partie ces résultats variables. Finalement, le site St-Pierre présentait des valeurs intermédiaires de conductivité mesurées au champ et au laboratoire. La couche de sol à 60-90 cm de profondeur présentait des valeurs variables au laboratoire (<0,0004, 0,003 et 0,56 m/jour), et certaines étaient relativement élevées pour une argile lourde.

Tableau 3 : Mesures *in situ* et en laboratoire de la *conductivité hydraulique* des sols des sites retenus.

Strate	St-Guillaume	St-Henri	St-Pierre
Conductivité hydraulique au champ (m/jour)			
K1	0,1428 ± 0,1	0,0206 ± 0,0	0,0725 -
K2	0,2278 ± 0,1	0,0092 ± 0,0	0,0852 ± 0,1
Conductivité hydraulique saturée en laboratoire (m/jour)			
0-15 cm	0,1008 ± 0,2	0,0578 ± 0,1	0,4066 ± 0,4
15-30 cm	0,0096 ± 0,0	0,8568 ± 0,9	0,0634 ± 0,1
30-60 cm	< 0,0004 ± 0,0	0,0216 ± 0,0	0,0062 ± 0,0
60-90 cm	< 0,0004 ± 0,0	< 0,0004 ± 0,0	0,1879 ± 0,3

4.3 MÉTHODOLOGIE

Les essais de sous-solage réalisés sur les trois sites visaient à comparer l'impact du type de sous-soleuse (bélier ou conventionnelle) et du sens de son exécution par rapport aux drains, sur les rendements des cultures et l'évolution des propriétés physiques et hydrauliques du sol.

4.3.1 Dispositif expérimental

Un même dispositif expérimental a été implanté sur les trois sites retenus pour comparer cinq traitements répétés en trois blocs aléatoires complets :

Bull parallèle : Sous-soleuse bélier (Bulldozer) opérée parallèlement aux drains

Bull perpendiculaire : Sous-soleuse bélier (Bulldozer) opérée perpendiculairement aux drains

Sous-soleuse parallèle : Sous-soleuse attelée à un tracteur (Conventionnelle) opérée parallèlement aux drains

Sous-soleuse perpendiculaire : Sous-soleuse attelée à un tracteur (Conventionnelle) opérée perpendiculairement aux drains

Témoin : Sans sous-solage

La Figure 3 présente la disposition des blocs et des parcelles sur le terrain. Ainsi, en raison des contraintes liées à l'opération des appareils de sous-solage, les parcelles avec passage perpendiculaire aux drains s'étendaient sur toute la largeur du dispositif, occupant une surface deux fois plus importante que les parcelles avec passage parallèle.

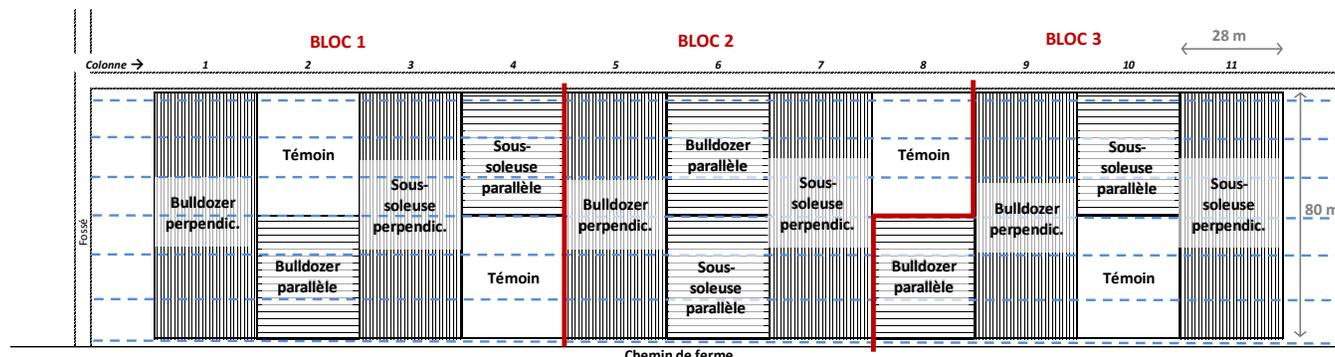


Figure 3 Modèle de dispositif et positionnement des parcelles selon les drains en place.

La dimension des parcelles et la disposition des blocs variaient d'un site à l'autre, afin de s'adapter aux contraintes du champ. Sur le site St-Guillaume, le dispositif avait une largeur de 60 m. Chaque parcelle avait une longueur de 35 m. Compte tenu d'une dépression traversant le champ au deux tiers de sa longueur, le dispositif a été séparé en deux sections. Ainsi, le bloc 1 était situé d'un côté de la baissière et occupait 140 m de longueur, alors que les blocs 2 et 3 situés de l'autre côté de la dépression, étaient contiguës pour une longueur totale de 245 m. En tout, le dispositif occupait une surface de 2,48 ha en incluant la dépression. À St-Henri, les parcelles s'étendaient sur 2,46 ha (80 m de largeur par 308 m de long) alors qu'à St-Pierre, le dispositif occupait une surface de 1,98 ha (60 m de largeur par 330 m de long).

4.3.2 Opérations de sous-solage

Trois types de sous-soleuses conventionnelles ont été employées alors que la sous-soleuse sur bélière (bulldozer) était la même pour les trois sites. Les modèles sont présentés à la Figure 4.

a) Sous-soleuse Brillion Zone Commander



b) Sous-Soleuse La Sole



c) Sous-soleuse Kverneland CLE



d) Bulldozer John Deere 850J LGP



Figure 4 Appareils de sous-solage employés pour les travaux au champ

Les opérations de sous-solage réalisées sur les sites sont résumées au Tableau 4. La profondeur de travail visée était de 50 cm pour la sous-soleuse avec tracteur alors qu'elle était de 70 cm avec le bulldozer. La profondeur de travail réelle différait toutefois selon les sites. Ainsi, les profondeurs visées pour les deux types de sous-soleuse ont été respectées sur les sites St-Guillaume et St-Pierre alors qu'elles étaient supérieures à l'objectif pour la sous-soleuse avec tracteur mais inférieures avec le bulldozer sur le site St-Henri.

Tableau 4 : Description technique des appareils de sous-solage et de la profondeur d'opération réalisée sur les sites

	St-Guillaume	St-Henri	St-Pierre
Sous-solage avec tracteur (conventionnelle)			
Marque et modèle	Brillion Zone Commander 6 shank Ripper-Z-210	La Sole	Kverneland CLE
Nombre de dents	4 (possibilité de 6)	5	3
Type de dents	Parabolique	Parabolique	Droite
Type de soc	En pointe Sans ailette	Droite Sans ailette	Droite Avec ailettes
Écartement des dents	75 cm	75 cm	75 cm
Profondeur de travail	43 à 51 cm	56 à 61 cm	51 à 56 cm
Sous-solage avec bélière (bulldozer)			
Marque et modèle	John Deere 850J LGP	John Deere 850J LGP	John Deere 850J LGP
Nombre de dents	3	3	3
Type de dents	Droite	Droite	Droite
Type de soc	Droite	Droite	Droite
Écartement des dents	104 cm	104 cm	104 cm
Profondeur de travail	65 à 69 cm	51 à 56 cm	66 à 71 cm

Les travaux de sol, de semis, de récolte et de fertilisation pratiqués ainsi que les cultures réalisées sur les sites au cours des années de l'essai sont rapportés aux Tableau 5, Tableau 1Tableau 6, Tableau 7 et Tableau 8**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Les trois sites étaient en travail réduit du sol.

Tableau 5 : Opérations culturales pratiquées sur le site St-Guillaume

Année	Date	Type d'opération	Profondeur travaillée	Formulation	Dose	Note
2014	15-sept au 30-sept	Drainage				Pose de 2 drains de part et d'autre du drain principal
		Nivellement				
	01-oct	Sous-solage				Bulldozer et Sous-soleuse
2015	15-mai	Vibroculteur	8-10 cm			4 passages
	16-mai	Semis de maïs grain				
	16-mai	Fertilisation		17-20-14	290 kg/ha	Minéral granulaire
	20-juin	Fertilisation		32-0-0	280 L/ha	Engrais liquide
	01-juil	Semis d'engrais vert				Ray-grass
	18-nov	Récolte de maïs grain				
2016	27-mai	Semis de soya				
	-	Fertilisation		-	-	Aucune
	08-nov	Récolte de soya				

Tableau 6 : Opérations culturales pratiquées sur le site St-Henri

Année	Date	Type d'opération	Profondeur travaillée	Formulation	Dose	Note
2014	16-sept	Lisier de bovin laitier		30 m ³ /ha		
	17-sept	Sous-solage				Bulldozer
	19-sept	Sous-solage				Sous-soleuse
2015	17-mai	Déchaumeuse	8 cm			
	18-mai	Semis de maïs grain				
	18-mai	Fertilisation		Démarrreur P et K	47 L/ha	Engrais liquide
	18-mai	Fertilisation		32-0-0	140 L/ha	Engrais liquide
	20-oct	Récolte de maïs grain				
2016	04-mai	Fertilisation			30 m ³ /ha	Lisier de bovin laitier
	11-mai	Déchaumeuse	8 cm			
	11-mai	Semis de maïs grain				
	11-mai	Fertilisation		Démarrreur P et K	47 L/ha	Engrais liquide
	11-mai	Fertilisation		32-0-0	140 L/ha	Engrais liquide
	15-nov	Récolte de maïs grain				

Tableau 7 : Opérations culturales pratiquées sur le site St-Pierre

Année	Date	Type d'opération	Profondeur travaillée	Formulation	Dose	Note
2015	01-sept	Semis d'engrais vert				
	23-sept	Sous-solage				Bulldozer
	28-sept	Sous-solage				Sous-soleuse
2016	01-mai	Fertilisation			19 m ³ /ha	Lisier de porc maternité
	05-mai	Déchaumeuse	5 cm			2 passages
	06-mai	Semis de blé				
	19-juin	Fertilisation		26-0-0	192 kg/ha	Minéral granulaire
	24-août	Récolte de blé				
	01-oct	Fertilisation				28 m ³ /ha

Tableau 8 : Information liée aux cultures pratiquées sur les sites au cours des années 2015 et 2016

	St-Guillaume	St-Henri	St-Pierre
2015			
Culture	Maïs grain	Maïs grain	Engrais vert
Cultivar/Hybride	38M58 2800 UTM	Pioneer	Mélange 12 espèces
Taux de semis	84 000 plants/ha	79 100 plants/ha	-
2016			
Culture	Soya	Maïs grain	Blé de printemps
Cultivar/Hybride	91Y01 RR	Mycogen	AC Scotia
Taux de semis	500 000 grains/ha	79 100 plants/ha	500 grains/m ²

La récolte des cultures a été réalisée avec une moissonneuse-batteuse pour parcelles expérimentales (Wintersteiger, Salt Lake City) opérant sur une largeur de 1,52 m. Le maïs a été récolté avec un nez à maïs de deux rangs, alors que la batteuse était équipée d'un nez à céréales pour les récoltes de soya et de blé en 2016. Afin d'augmenter le nombre d'observations et la puissance de l'analyse statistique, des sous-parcelles ont été constituées en réalisant des passages de batteuse dans le champ et en disposant ceux-ci à distance variable des drains. Pour chaque passage de batteuse, les rendements ont été mesurés dans les 20 mètres situés au centre des parcelles (11 parcelles de long par passage) en pesant le poids total en grain obtenu. Un échantillon de grain a été constitué à chaque pesée pour évaluer la teneur en matière sèche du grain après séchage à l'étuve à 60°C et jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Le poids à l'hectolitre a été déterminé pour chaque sous-parcelle à l'aide d'un entonnoir Cox et d'une tasse cylindrique de 0,5 L selon les protocoles spécifiques au grain classé émis par la Commission canadienne des grains. Les sites étaient tous équipés de pluviomètres notant les volumes des précipitations survenus sur les sites au cours de la saison de culture.

4.3.3 Suivi des nappes d'eau souterraines

Au printemps 2015, le site St-Henri a été équipé afin de suivre l'évolution de la nappe au cours de la saison, dans les cinq traitements. Ainsi, le 7 mai 2015, une série de capteurs de pression (Hobo U20 Water Level Logger, MA) ont été implantés dans des puits d'observations constitués de crépines en ABS de 2", tel que schématisé à la Figure 5. Les crépines avaient 1,5 m de longueur et étaient trouées de petites ouvertures dans leurs parois à plus de 30 cm de profondeur, pour permettre à l'eau de s'infiltrer et de suivre la hauteur des nappes. Cinq parcelles contiguës ont été sélectionnées pour représenter les cinq traitements à l'étude. Trois tubes étaient placés dans chaque traitement, le premier à 30 cm du drain, le deuxième au quart de l'espacement et le troisième à mi-chemin entre deux drains. Ainsi, un total de quinze capteurs ont été suivis au cours de l'année 2015.

En 2016, ces puits ont été retirés et redistribués à raison de cinq capteurs par site dans une parcelle témoin. Ces capteurs étaient disposés dans un tube tel qu'illustré plus bas (Figure 5) sur la même ligne à distance croissante du drain. En tout temps, un capteur de pression supplémentaire était laissé sur le site afin de prendre en compte la pression atmosphérique de l'air. Ainsi, les données mesurées par les capteurs de pression pouvaient être corrigées afin de déterminer la profondeur réelle du capteur sous l'eau.

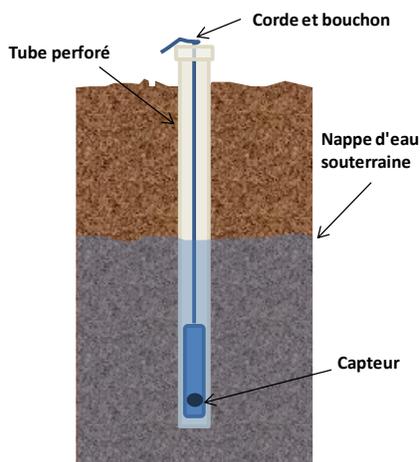


Figure 5 Schéma d'un tube perforé muni d'un capteur de pression Hobo.

À la fin du printemps 2016, une série de 198 puits d'observation ont été creusés sur chaque site avec une tarière de 7,5 cm de diamètre pour suivre l'évolution de nappes superficielles (à moins de 60 cm de profondeur). Chaque parcelle comprenait neuf puits recouverts d'un couvercle plat et répartis sur trois lignes. Ces puits avaient une profondeur de 40 à 60 cm dépendant de leur position sur le terrain. La hauteur d'eau contenue dans les puits a été mesurée manuellement à plusieurs dates avec un gallon à mesurer ou un télémètre au laser (GLM 100C, Bosch tools, IL). Compte tenu que les résultats de suivi de hauteur de nappe font l'objet d'un projet de maîtrise, ceux-ci ne sont pas présentés dans le présent rapport.

4.3.4 Suivi des propriétés physiques du sol

La conductivité hydraulique des sols a été mesurée en conditions non saturées au champ à l'aide d'un perméamètre de Guelph 2800K1 (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA). Ces mesures ont été réalisées au cours du mois de juillet 2015 dans les cinq traitements sur les sites St-Guillaume et St-Henri. Le perméamètre de Guelph est un système opérant à charge constante constitué de tubes gradués remplis d'eau et fonctionnant à l'aide du principe de la bouteille de Mariotte. Il était installé sur un trépied au-dessus d'un trou foré à des profondeurs de 30, 50 et 70 cm (Reynolds et Elrick, 1985). L'eau s'écoulait du système et les variations de volumes étaient mesurées à intervalle régulier. Lorsque l'eau s'écoulant du réservoir atteignait un débit constant, il était possible de dériver une valeur de conductivité hydraulique saturée.

L'impact des traitements sur les propriétés physiques du sol a été suivi à l'automne 2015 sur les sites St-Henri et St-Guillaume par la mesure de la résistance à la pénétration d'un cône (Veris 3100, Veris Technologies, Salina, KS) et des mesures de masse volumique apparente prises jusqu'à une profondeur de 60 cm avec des sondes d'un diamètre de 3,8 cm enfoncées avec un échantillonneur de sol (Giddings machine co., Windsor, CO), commandé avec l'hydraulique d'un tracteur. Lors de l'automne 2016, les sondes ont été prélevées à l'aide de l'échantillonneur Giddings sur les sites St-Henri et St-Pierre. Cependant, un bris de matériel et l'arrivée définitive de la neige ont empêché la collecte des carottes de sol sur le site St-Guillaume, ainsi que la prise des mesures de résistance à la pénétration d'un cône.

Les mesures ont été réalisées le long de transects placés en biais par rapport à la ligne de drains et des travaux de sous-solage. La longueur des transects était adaptée en fonction de l'espacement des drains. Sur les sites St-Guillaume, St-Henri et St-Pierre, six carottes de sols ont été prélevées à un intervalle de 3,0, 3,6 et 3,3 m sur des transects de 15, 18 et 16,5 m de long, respectivement. Le transect était disposé de manière à ce que le troisième point soit situé sur un drain. Les carottes de sol étaient redécoupées en tronçons de 7,5 cm de haut et conservées dans des sacs hermétiques. Par la suite, les carottes de sol étaient séchées à 105°C jusqu'à poids constant après avoir noté leur poids humide. La masse volumique apparente (MVA) des strates de sol a été déterminée en divisant la masse du sol sec par le volume de la carotte. En assumant une masse volumique réelle (MVR) du sol de 2,65 g/cm³, la porosité totale du sol a été estimée :

$$\text{Porosité totale} = 1 - \left(\frac{MVA}{MVR} \right)$$

Où la porosité totale est exprimée en cm³/cm³, la MVA et la MVR sont exprimées en g/cm³

Les mesures de la résistance à la pénétration d'un cône ont été réalisées que sur les sites St-Guillaume et St-Henri au cours de l'automne 2015, mais n'ont pas été réalisées sur les sites de St-Henri et St-Pierre en 2016 en raison du froid qui interférait sur les lectures et d'un bris mécanique de l'appareil. Celles-ci ont été mesurées par enfoncement d'une tige métallique terminée par un cône montée sur l'échantillonneur de sol Giddings et commandé avec l'hydraulique du tracteur. Cette tige était équipée d'un capteur mesurant la conductivité électrique. La tige était enfoncée jusqu'à une profondeur variant de 0,8 à 1 m. La force requise pour l'enfoncement du cône et la conductivité électrique étaient enregistrées à tous les 2 cm de profondeur. Ces mesures étaient

répétées aux 30 cm sur un transect parallèle à celui utilisé pour les carottes de sol, à moins de 25 cm de distance de celui-ci.

4.3.5 Suivi de la croissance des plants et positionnement au GPS-RTK

Les opérations réalisées sur le terrain au cours du projet ont été géoréférencées à l'aide d'un GPS GeoExplorer 2008 de Trimble. De plus, un relevé topographique de la surface du sol a été réalisé avec un GPS-RTK (TSC3 Controller, Trimble, OH) afin de connaître l'altitude et pour confirmer le positionnement des points réalisés au GeoExplorer 2008.

La compagnie Drones Falcon Bleu a effectué un vol au-dessus du site St-Guillaume le 14 mai 2015. Ce vol a été réalisé à l'aide d'une aile volante eBee (senseFly, Suisse) (Figure 6a). Ce vol a permis d'acquérir un modèle numérique de surface (MNS) ainsi que la rugosité de surface. Le 18 septembre 2015, le Groupe HGB a effectué un vol à l'aide d'une aile volante UX5 (Trimble, OH) (Figure 6b). Grâce à ce deuxième vol, un modèle numérique d'élévation des plants a été obtenu. La hauteur des plants de maïs de la totalité du champ a ainsi pu être obtenue par la différence entre les deux modèles. Cette hauteur a été corrélée aux rendements pour les zones récoltées afin d'estimer le rendement en grain des plants sur la totalité du dispositif.



Figure 6 : Aile volante eBee opérée par la compagnie Drones Falcon Bleu (a) et aile volante UX5 opérée par le Groupe HGB (b)

4.4 ANALYSES STATISTIQUES

Les rendements, la matière sèche et le poids spécifique des grains ont été analysés à chaque année en analyse de variance (ANOVA) avec la procédure PROC MIXED du logiciel SAS (SAS Institute, 2003). Les effets fixes (traitements) ont été testés avec un test de Fisher, afin de vérifier s'ils étaient significatifs (Prob. de $F < 0,10$). Dans tous les cas, l'analyse des résidus devait démontrer une distribution aléatoire, ce qui permettait de présumer qu'il n'y avait pas de tendance induite par de mauvaises manipulations ou autre.

Les données de MVA et de Veris relevés sur les transects dans les cinq traitements sur chaque site ont été corrélées et interpolées en employant les logiciels R (version 3.3.2) et R Studio (version 1.0.136 2009-2016 RStudio). L'analyse compositionnelle a d'abord été employée pour transformer les volumes d'air, d'eau et de sol déterminés par la mesure de masse volumique apparente (MVA) et de teneur en eau des échantillons de sol, en deux composantes orthogonales indépendantes log transformées (llr1 et llr2). La corrélation entre ces composantes et les mesures de force (kPa) et de conductivité électrique (mS/m) relevées avec la sonde Veris sur une plus grande densité d'échantillonnage a par la suite été évaluée, pour interpoler par krigeage ordinaire anisotropique et krigeage universel les différents volumes d'air, d'eau et de sol présents dans les cinq transects relevés en 2015 (sites St-Guillaume et St-Henri).

5 RÉSULTATS

5.1 DONNÉES CLIMATIQUES

Le Tableau 9 présente les informations relatives aux saisons de croissance rencontrées sur les sites étudiés au cours des années 2015 et 2016. Le site St-Guillaume a connu des précipitations moindres et des températures globalement plus élevées que les deux autres sites. Cependant, la longueur de sa saison de croissance est comparable à celle du site St-Henri. Les UTM et les précipitations mesurées sur les sites St-Henri et St-Pierre étaient du même ordre. Les cultures du site St-Pierre disposaient cependant d'une saison de croissance de 2 à 3 semaines de moins que pour les autres sites.

Tableau 9 : Statistiques agroclimatiques des sites à l'étude pour 2015 et 2016

	St-Guillaume (Station St-David)		St-Henri (Station Honfleur)		St-Pierre (Station St-Pierre-de-la-Rivière-du- Sud)	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Précipitations annuelles (mm)	960	846	1064	1244	932	1222
Date du dernier gel printanier	16-avr	29-avr	18-avr	01-mai	19-avr	01-mai
Date du premier gel automnal	17-oct	27-oct	17-oct	04-nov	04-oct	15-oct
Longueur de la saison de croissance (jours)	184	181	182	187	168	167
Unités thermiques maïs (UTM)	3142	3236	2620	2746	2605	2745
Fréquence de T° > 30°C	7	10	0	6	1	6

Données météorologiques tirées des Sommaires quotidiens et du Sommaire P-ETP du site Agrométéo Québec

Les précipitations et l'évapotranspiration (ETP) mensuelle de 2015 et 2016 sont présentées aux Figure 7 et Figure 8, respectivement. Le site St-Henri a principalement connu des bilans Précipitations – ETP positifs. En 2015, les bilans finaux pour la saison étaient près de l'équilibre pour les trois sites. Cependant, les précipitations importantes du mois de septembre 2016 ont apporté un excès d'environ 130 à 150 mm de hauteur d'eau sur les trois sites.

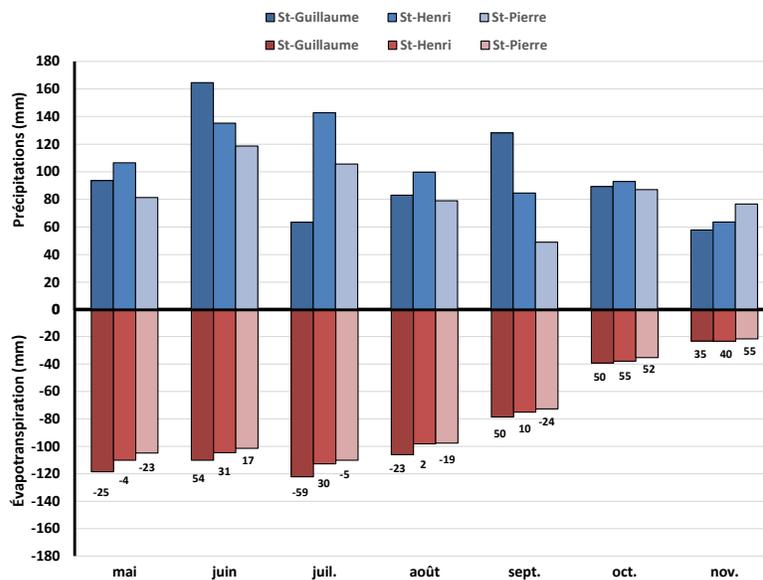


Figure 7 Bilan d'évapotranspiration pour la période de mai à novembre 2015

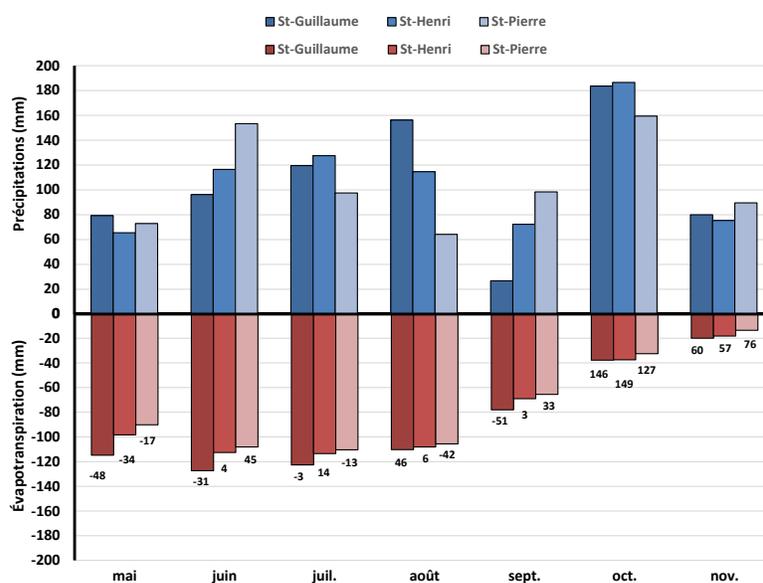


Figure 8 Bilan d'évapotranspiration pour la période de mai à novembre 2016

5.2 EFFET DES TRAITEMENTS DE SOUS-SOLAGE SUR LE RENDEMENT DES CULTURES

Les résultats obtenus pour les cultures de maïs grain produites en 2015 sur les sites St-Guillaume et St-Henri sont rapportés au Tableau 10. Les rendements moyens en grain (7,2 t/ha pour le site St-Henri et 11,7 t/ha pour le site St-Guillaume) étaient supérieurs aux rendements références de la Financière agricole du Québec (FADQ) (5,5 et 8,9 t/ha respectivement) pour les mêmes zones assurées. Cependant, ces rendements demeuraient bien en deçà des rendements obtenus en parcelles avec le réseau des grandes cultures du Québec (RGCQ) soit de 10,9 et 14,4 t/ha pour les mêmes zones agroclimatiques.

En 2015, les traitements de sous-solage ont eu un effet significatif sur les rendements des deux sites à l'étude. Cependant, ces traitements ont eu différents effets selon les sites. Sur le site St-Guillaume, le bulldozer opéré perpendiculairement aux drains a produit des rendements significativement plus élevés que le bulldozer opéré parallèlement et le témoin, soit une augmentation de rendement de 1,3 tm/ha de maïs-grain. Sur le site St-Henri, les traitements avec sous-soleuse conventionnelle (opérée perpendiculaire ou parallèle aux drains) ont les mieux performé, procurant des augmentations de rendement de 1,55 à 2,4 tm/ha de maïs-grain. Sur le site St-Guillaume, le sens du sous-solage n'a pas amélioré la performance de la sous-soleuse conventionnelle, alors qu'il avait tendance à l'améliorer sur le site St-Henri. Le témoin donnait aussi des rendements significativement plus faibles que la sous-soleuse conventionnelle et le bulldozer utilisé perpendiculairement sur les deux sites, tandis que le bulldozer opéré parallèlement au drain n'a pas amélioré le rendement sur aucun site.

Tableau 10 : Rendements en maïs-grain à 15 % d'humidité, humidité du grain et poids spécifique en 2015

	St-Guillaume			St-Henri		
	Rdmt 15% (t/ha)	Humidité (g/g)	Poids spéc. (kg/hL)	Rdmt 15% (t/ha)	Humidité (g/g)	Poids spéc. (kg/hL)
Effet du traitement						
Bull parallèle	11,41	0,20	70,80	6,54	0,28	63,59
Bull perpend.	12,15	0,20	71,78	7,27	0,27	63,52
Sous-soleuse parallèle	11,89	0,20	71,06	7,50	0,28	63,42
Sous-soleuse perpend.	11,85	0,20	71,45	8,31	0,27	63,61
Témoin	10,88	0,21	70,14	5,95	0,29	63,52
Erreur type	0,28	0,002	0,37	0,52	0,006	0,31
Valeur de F	4,67	1,52	4,14	5,75	5,40	0,08
Probabilité de F	0,0290**	0,3388	0,0433**	0,0388**	0,0608*	0,9858
Effet du sens de sous-solage (Perpend. vs Parallèle)						
Valeur de F	-1,42	1,01	-2,07	-1,87	1,56	-0,22
Probabilité de F	0,1879	0,3639	0,0698*	0,1131	0,1593	0,8338
Effet du type de sous-soleuse (Bull vs Sous-soleuse)						
Valeur de F	-0,38	-0,45	0,11	-2,51	0,82	0,14
Probabilité de F	0,7119	0,6754	0,9176	0,0486**	0,4361	0,8925

L'humidité des grains de maïs n'a pas été affectée par les traitements sur le site St-Guillaume, mais les grains récoltés dans tous les traitements de sous-solage sur le site St-Henri avaient une teneur en eau plus basse que dans les parcelles témoins. Le sous-solage a cependant eu un impact positif sur la qualité des grains récoltés à St-Guillaume. Tout comme pour le rendement, les grains récoltés dans les parcelles sous-solées de façon conventionnelle et avec le bulldozer opéré perpendiculairement aux drains, présentaient un poids spécifique significativement supérieur à ceux des parcelles sous-solées avec le bulldozer parallèle et le témoin.

Les résultats des récoltes de 2016 sont rapportés au Tableau 11. Les rendements moyens de soya obtenus sur le site St-Guillaume (3,2 t/ha) étaient intermédiaires aux rendements références de la FADQ (2,7 t/ha) et du RGCQ (4,6 t/ha) pour les mêmes zones. Cependant, ceux du site St-Henri (5,9 t/ha) en maïs-grain étaient faibles et se situaient près des rendements rapportés par la FADQ (5,6 t/ha), alors que le RGCQ rapporte des rendements de 12,6 t/ha en 2016 dans leurs essais dans la même zone. Le site St-Pierre a toutefois produit des rendements en blé de printemps (4,6 t/ha) supérieurs à la FADQ et au RGCQ (2,3 t/ha et 4,0 t/ha respectivement) dans les mêmes zones.

Tableau 11 : Rendement en grain des cultures à 15 % d'humidité, humidité du grain et poids spécifique en 2016

	St-Guillaume soya			St-Henri maïs-grain			St-Pierre blé de printemps		
	Rdmt 15% (t/ha)	Humidité (g/g)	Poids spéc. (kg/hL)	Rdmt 15% (t/ha)	Humidité (g/g)	Poids spéc. (kg/hL)	Rdmt 15% (t/ha)	Humidité (g/g)	Poids spéc. (kg/hL)
Effet du traitement									
Bull parallèle	3,00	0,14	69,86	5,04	0,22	63,96	5,06	0,13	79,87
Bull perpend.	3,44	0,14	69,69	5,86	0,22	64,30	4,52	0,13	79,53
Sous-soleuse parallèle	3,23	0,14	70,06	5,52	0,21	64,97	4,63	0,13	79,49
Sous-soleuse perpend.	3,38	0,14	69,80	6,49	0,21	64,94	4,71	0,13	79,64
Témoin	3,00	0,13	70,05	5,82	0,21	64,70	4,20	0,13	78,85
Erreur type	0,30	0,003	0,17	0,62	0,005	0,62	0,32	0,003	0,40
Valeur de F	0,52	0,97	1,46	0,97	0,26	0,67	1,07	0,75	2,07
Probabilité de F	0,7218	0,4635	0,2912	0,4291	0,9043	0,6132	0,4333	0,5854	0,1733
Effet du sens de sous-solage (Perpend. vs Parallèle)									
Valeur de t	-1,04	-1,04	1,58	-1,40	0,02	-0,30	0,78	-0,37	0,34
Probabilité de t	0,3256	0,3218	0,1464	0,1632	0,9858	0,7671	0,4596	0,7242	0,7399
Effet du type de sous-soleuse (Bull vs Sous-soleuse)									
Valeur de t	-0,28	-0,02	-1,12	-1,38	1,01	-1,60	0,40	-0,84	0,53
Probabilité de t	0,7817	0,9820	0,2912	0,1706	0,3147	0,1133	0,7023	0,4244	0,6103

À la différence de 2015, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements au niveau des rendements de soya (St-Guillaume), de maïs-grain (St-Henri) et de blé de printemps (St-Pierre). La plupart des traitements de sous-solage avaient toutefois tendance à produire des rendements plus élevés que la parcelle témoin, mais le sous-solage avec bélière opéré parallèlement aux drains avait tendance à produire de plus faibles rendements sur les sites St-Guillaume et St-Henri, comme en 2015. Même si les effets généraux de traitements

n'étaient pas significatifs, quelques contrastes entre certains traitements sont apparus significatifs. Pour le soya sur le site St-Guillaume, les grains produits sur les parcelles sous-solées parallèlement aux drains tendaient à avoir un poids spécifique plus élevé, que sur celles sous-solées perpendiculairement. Cependant, le témoin présentait aussi un poids spécifique plus élevé; ce qui complique l'interprétation. Sur le site St-Henri, les rendements tendaient à être plus élevés dans les parcelles sous-solées, mais pas sous le bélier opéré parallèlement aux drains, alors que sur le site St-Pierre cultivé en blé le bélier opéré parallèlement avait tendance à produire les meilleurs rendements.

L'effet du sous-solage s'est donc estompé en deuxième année. Les conditions climatiques de 2016 étaient plus favorables à la croissance des cultures, autant au niveau des quantités et de la répartition des précipitations, que des températures moyennes journalières atteintes et des accumulations en degrés-jours (Tableau 9). Il est donc probable que le stress causé par la compaction ne se soit pas manifesté dans des conditions climatiques plus favorables à la production des cultures, comme sur le site St-Pierre où de bons rendements en blé ont été obtenus en général. Toutefois, les faibles rendements obtenus sur le site St-Henri semblent plutôt révéler des facteurs limitants encore la croissance au niveau des conditions du sol.

5.3 COMPORTEMENT HYDRAULIQUE DES SOLS

Les mesures de conductivité hydraulique saturée relevées au cours de l'été 2015 avec le perméamètre de Guelph sont présentées au Tableau 12. À la vue de ces résultats, on constate que les sols sont demeurés relativement peu perméables peu importe les traitements de sous-solage. Sur le site St-Guillaume cependant, la perméabilité semble légèrement plus élevée au niveau du bulldozer utilisé perpendiculairement aux drains, jusqu'à 50 cm de profondeur. Cette variabilité pourrait toutefois être attribuée à l'emplacement du point de mesure plutôt qu'au traitement. En effet, du côté du site St-Henri, c'est dans le témoin que les perméabilités de surface sont les plus élevées. Le guide de référence en drainage souterrain rapporte une conductivité hydraulique minimale de 0,03 m/jour pour justifier l'installation de drains agricoles et assurer l'efficacité du système (CRAAQ, 2007). Or, plusieurs valeurs rapportées au Tableau 12 demeurent sous ce seuil, indiquant l'absence d'amélioration des conditions de drainage à la suite des travaux de sous-solage.

Tableau 12 : Conductivité hydraulique saturée relevée avec le perméamètre de Guelph sur les sites St-Guillaume et de St-Henri au cours du mois de juillet 2015 (H1 : 5 cm et H2 : 10 cm de hauteur de colonne d'eau).

	St-Guillaume			St-Henri		
	K _{fs} H1	K _{fs} H2	K _{fs} moyen	K _{fs} H1	K _{fs} H2	K _{fs} moyen
----- m/jour -----						
Profondeur de 30 cm						
Bull parallèle	0,008	0,027	0,017	0,002	0,002	0,002
Bull perpend.	0,078	0,038	0,058	0,028	0,006	0,017
Sous-soleuse parallèle	0,028	0,009	0,018	0,001	0,004	0,002
Sous-soleuse perpend.	0,028	0,009	0,018	0,002	0,001	0,001
Témoin	0,005	0,010	0,008	0,046	0,044	0,045
Profondeur de 50 cm						
Bull parallèle	0,032	0,025	0,029	0,002	0,001	0,001
Bull perpend.	0,038	0,021	0,030	0,004	0,002	0,003
Sous-soleuse parallèle	0,033	0,020	0,026	0,013	0,008	0,010
Sous-soleuse perpend.	0,033	0,020	0,026	0,001	0,002	0,001
Témoin	0,030	0,024	0,027	0,004	< 0,001	0,002
Profondeur de 70 cm						
Bull parallèle	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,040	0,019	0,030
Bull perpend.	0,006	0,009	0,008	0,002	0,001	0,001
Sous-soleuse parallèle	0,018	0,014	0,016	0,008	0,006	0,007
Sous-soleuse perpend.	0,018	0,014	0,016	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Témoin	0,050	0,031	0,040	< 0,001	< 0,001	< 0,001

5.4 IMPACT DES TRAITEMENTS SUR LES PROPRIÉTÉS DES SOLS

5.4.1 Masse volumique apparente

La moyenne des mesures de masse volumique apparente (MVA) réalisées par la prise de carottes de sol à l'échantillonneur de sol Giddings est présentée à la Figure 9 par site, traitement et profondeur. Les résultats détaillés de MVA sont présentés aux annexes B, C, D et E. De façon générale, les mesures de MVA réalisées à l'échantillonneur de sol se comparent à celles relevées manuellement au cylindre (Tableau 2). Le sol du site St-Guillaume présente une MVA plus élevée juste sous la surface du sol entre 10 et 30 cm de profondeur ($1,45 \text{ g/cm}^3$), comparativement au sol plus en profondeur ($1,3 \text{ g/cm}^3$) de 40 à 60 cm, alors que les sols des sites St-Henri et St-Pierre présentent des profils dont la MVA augmente plutôt avec la profondeur, passant de $1,3$ à $1,5 \text{ g/cm}^3$ de 10 à 60 cm de profondeur. Sur le site St-Guillaume en 2015, on constate une légère diminution de la MVA sous l'effet des traitements de sous-solage par rapport au témoin dans les 10 à 20 cm supérieurs du sol. Cependant, il n'a pas été possible de valider si cette amélioration était encore persistante en 2016.

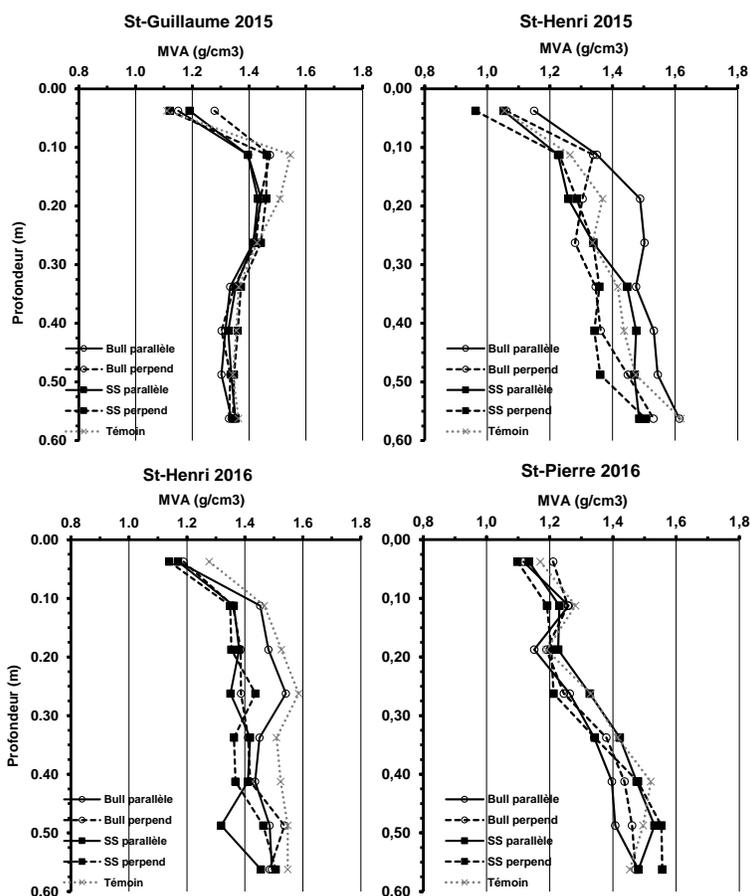


Figure 9 Masse volumique apparente (MVA) moyenne selon les traitements et la profondeur

Sur le site St-Henri, on constate une plus grande masse volumique apparente du sol dans les parcelles sous bull parallèle, à la fois en 2015 et en 2016, alors que les mesures ont été prises dans deux différents secteurs sur le

site. Le témoin présentait également une MVA plus importante sur le site St-Henri en 2016. Finalement, sur le site St-Pierre en 2016, les traitements de sous-solage ne semblent pas affectés la MVA du sol par rapport au témoin.

La Figure 10 rapporte les mêmes observations de MVA pour le site St-Henri, mais en utilisant un ratio de la MVA des traitements sur celle du témoin en fonction de la position sur le terrain (le long du transect) et de la profondeur. Ainsi, on observe que le sous-solage en mode parallèle aux drains semble augmenter la compaction du sol surtout dans le début du transect (de 0 à 10,8 m), c'est à dire sur le haut de la planche. La compaction semble cependant être plus importante avec le bulldozer, alors que la sous-soleuse conventionnelle opérée parallèlement au drain, on remarque davantage de zones où le profil s'est amélioré. Notons aussi que le bull opéré en mode parallèle avait également produit de plus faibles rendements sur ce site en 2015 et 2016.

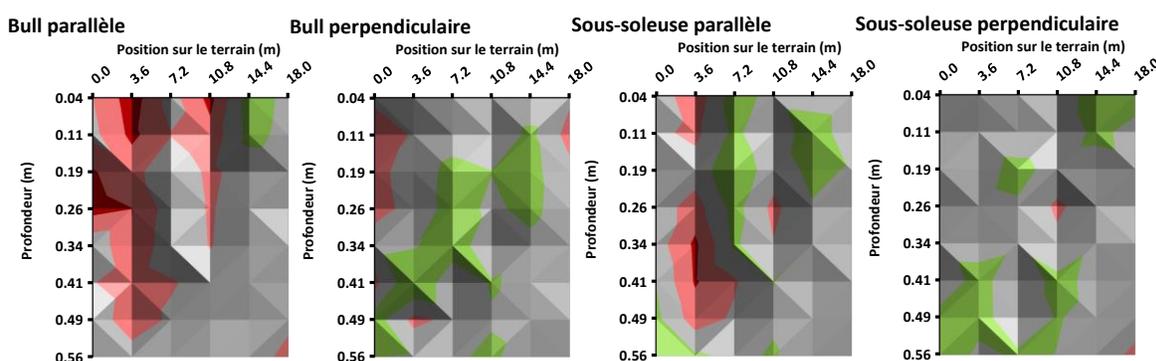
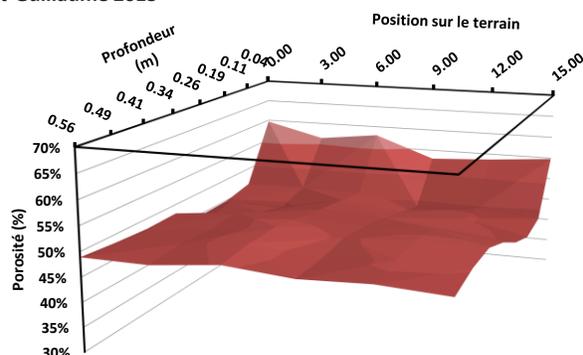


Figure 10 Ratio entre la masse volumique du traitement et celle du témoin (Vert = amélioration ($< 0,9$), Gris = comparable ($0,9 - 1,1$), Rouge = compaction ($> 1,1$) pour le site St-Henri en 2015

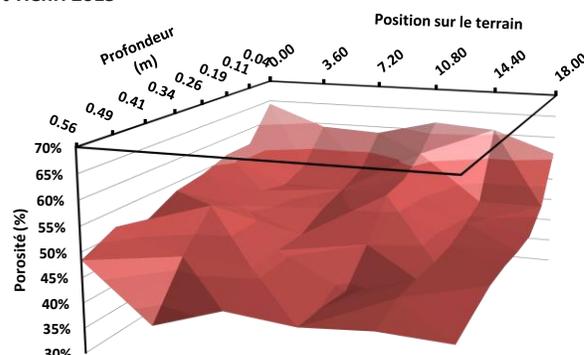
5.4.2 Porosité totale

La porosité totale des sols a été calculée à partir de la masse volumique apparente (MVA) et d'une estimée de la masse volumique réelle. La Figure 11 présente la moyenne de la porosité totale mesurée sur tous les traitements en fonction de la profondeur dans le sol et de la position sur le terrain ou le long du transect. Sur l'ensemble des sites, on observe un effet modéré de la position sur le terrain ainsi qu'un effet important de la profondeur. Sur le site St-Guillaume, la porosité totale était plus élevée à moins de 20 cm de profondeur pour les trois points relevés près du drain (0,00, 3,00 et 6,00 m). À ces mêmes profondeurs, cette porosité diminuait par la suite le long du transect à des valeurs inférieures à 55 %. Pour les profondeurs inférieures à 20 cm, aucun effet de terrain n'était observé. Le terrain de St-Guillaume venait d'être nivelé et était très peu affecté par des effets de planches. Sur le site St-Henri, l'effet du terrain et des planches arrondies était très marqué. Ainsi, les échantillons prélevés plus loin sur le transect (ou plus bas sur la planche) avaient une porosité nettement plus faible et ce, sur toute la profondeur d'échantillonnage. La porosité totale était toutefois plus élevée en 2015 par rapport à 2016, comme en témoigne la Figure 12, sous l'effet de la sous-soleuse en mode parallèle aux drains. Ainsi, alors qu'en 2015, des marques de sous-solage nettes sont visibles dans le profil, celles-ci ne sont plus visibles en 2016. Le site St-Pierre, quant à lui, présentait des porosités supérieures à 55 % dans les 20 premiers centimètres sur toutes les carottes du transect. Sur ce site, l'effet de terrain le long du transect était très peu perceptible au niveau des propriétés physiques mesurées.

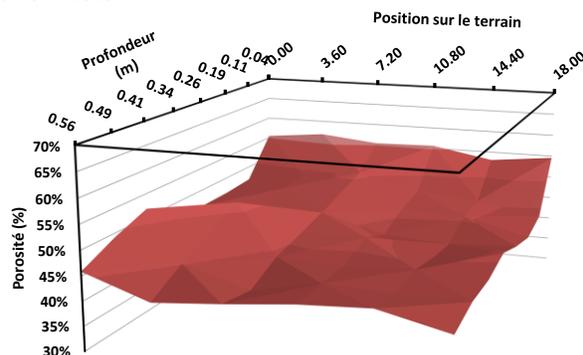
Site St-Guillaume 2015



Site St-Henri 2015



Site St-Henri 2016



Site Gosselin 2016

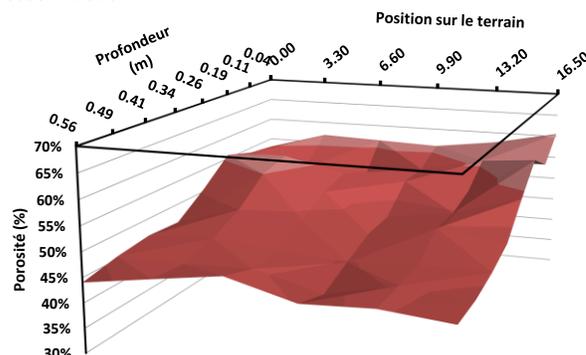
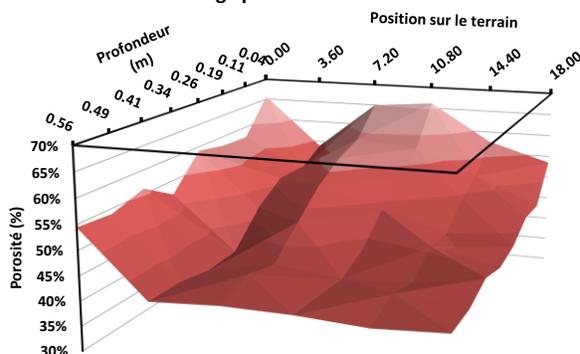


Figure 11 Porosité moyenne des profils de sol en fonction de leur profondeur et de leur position le long du transect

Site St-Henri 2015 - Sous-solage parallèle



Site St-Henri 2016 - Sous-solage parallèle

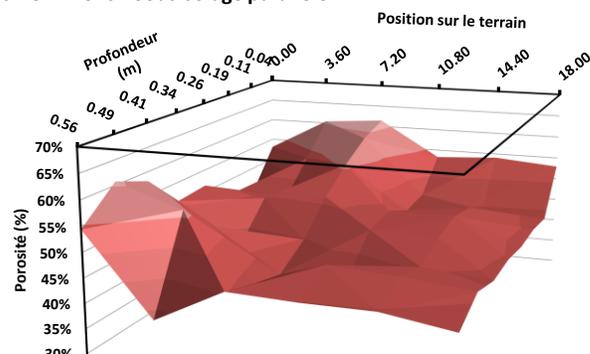


Figure 12 Porosité des échantillons de 2015 et 2016 pour le traitement sous-soleuse parallèle aux drains

La porosité totale des carottes de sol a été interpolée par krigeage universel sur les transects des sites St-Guillaume et St-Henri en 2015, en utilisant la résistance à la pénétration comme variable ancillaire. Cette dernière a été mesurée à une plus grande résolution (20 à 25 cm de distance et à tous les 2 cm de profondeur) avec un

appareil Veris. Le volume occupé par le sol sans ses vides est égale à $1 - \text{porosité totale}$. La Figure 13 présente les teneurs volumiques en sol sans ses vides le long de transects réalisés sur le site St-Henri en 2015. On y observe un profil nettement plus dense en surface sous l'effet du bulldozer opéré parallèlement aux drains. Le profil de la parcelle avec bulldozer opéré perpendiculairement aux drains présente quant à lui un profil beaucoup moins dense, alors que les parcelles avec sous-solage conventionnel présentent un profil semblable à celui du témoin.

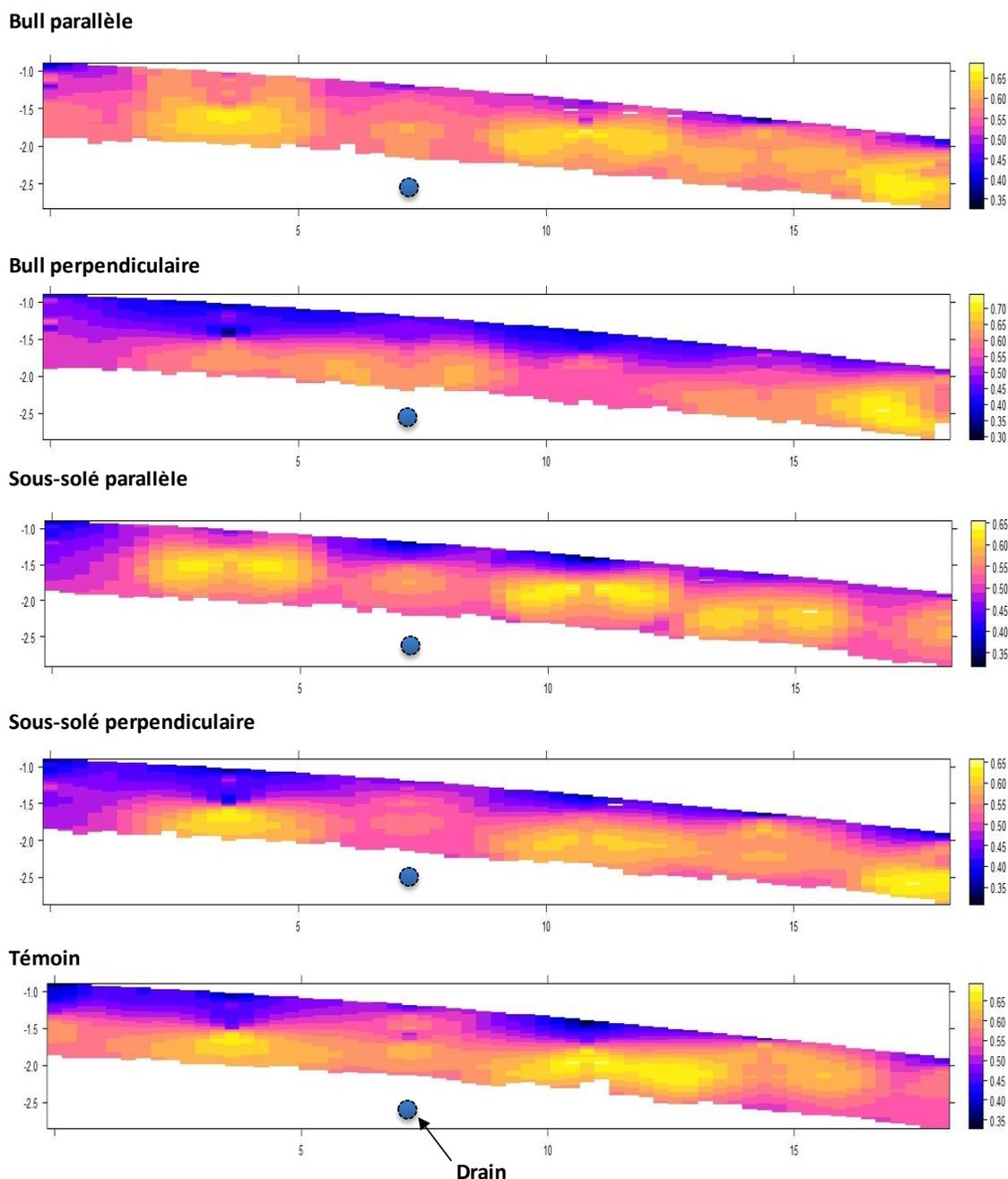


Figure 13 Interpolation des teneurs en sol volumiques ($1 - \text{porosité totale}$) (cm^3/cm^3) par krigeage universel avec des mesures de résistance à la pénétration d'un cône comme variable ancillaire sur le site St-Henri en 2015.

La porosité totale a aussi été interpolée par krigeage universel sur les transects des sites St-Guillaume et St-Henri en 2015, en utilisant la mesure de la résistance à la pénétration comme variable ancillaire. La porosité totale moyenne ainsi estimée dans les premiers 30 cm de profondeur, sur la longueur des transects, révèle à la Figure 14, les mêmes tendances que la masse volumique présentée à la Figure 9 ou les transects de volume de sol présentés à la Figure 13. En effet, la porosité moyenne variait très peu sur le site St-Guillaume, alors qu'elle était plus élevée pour certains traitements de sous-solage et le témoin, mais plus faible pour le bull parallèle sur le site St-Henri (Figure 14).

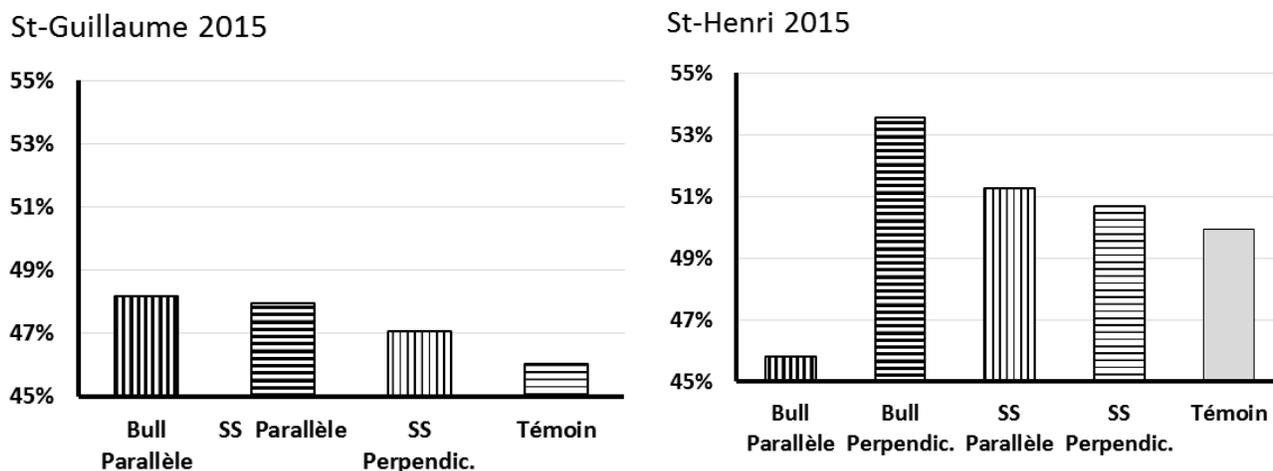


Figure 14 Porosité totale moyenne des 30 premiers centimètres de sol interpolée par krigeage universelle avec des mesures de pénétromètre comme variable ancillaire

5.4.3 Teneur en air volumique

La présence d'un volume d'air suffisant (au moins 10%) dans le profil est nécessaire à la croissance racinaire. Sur le site St-Guillaume, les sols se comportaient de la même manière, peu importe le traitement. Or, seule la première strate de 0 à 10 cm de profondeur offrait une teneur en air volumique supérieure à $10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Cependant, la prise des échantillons ayant été réalisée en post-récolte à l'automne, il est possible que la saturation du profil en eau n'ait pas influencé la croissance racinaire.

Du côté du site St-Henri, les sols prélevés en 2015 et 2016 étaient fort différents. Ainsi, à l'exception du bull parallèle, tous les traitements présentaient une teneur en air supérieure au seuil critique au-delà des 20 premiers cm de sol en profondeur. Les traitements avec sous-solage perpendiculaire présentaient une aération suffisante sur plus de 35 cm de profondeur. Cependant, en 2016, la récolte des échantillons de sol a eu lieu davantage en conditions de sol saturées en eau. La sous-soleuse parallèle aux drains et le bull perpendiculaire tendaient cependant à se démarquer des autres traitements jusqu'à 35 cm de profondeur.

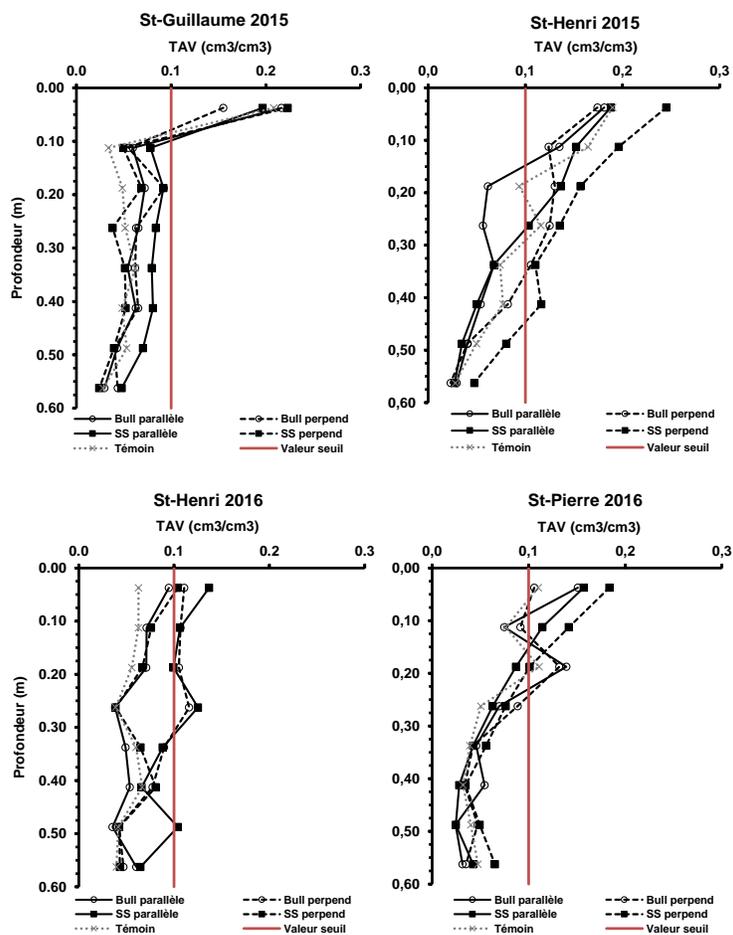


Figure 15 Teneur en air volumique (TAV) moyenne en fonction des traitements et de la profondeur

Du côté du site St-Pierre, de légères différences entre les traitements étaient visibles en surface. Ainsi, alors que l'aération du sol dans le témoin demeurait près de seuil critique en surface, les traitements sous-solés se situaient au-dessus.

5.5 CORRÉLATION DE LA HAUTEUR DES PLANTS AU RENDEMENT

La Figure 16 présente le modèle numérique de surface du sol (MNS) et le modèle numérique d'élévation des plants de maïs (MNE) obtenus lors de vols de drones au cours de la saison 2015, ainsi que la hauteur des plants de maïs obtenue par différence entre les deux. On observe à la fois un effet de terrain et de traitement sur la hauteur des plants. Ainsi, les plants sont généralement plus petits dans les parcelles témoin. Cependant, on note aussi un effet de bordure sur toute la longueur du dispositif. Cet effet est causé par la proximité d'un fossé de drainage pour la partie du champ située au haut de la figure ci-contre, alors que les baisses de rendement situées dans la partie au bas de la Figure 13 sont liées à l'historique du champ, cette zone ayant jadis été traversée par un fossé de drainage.

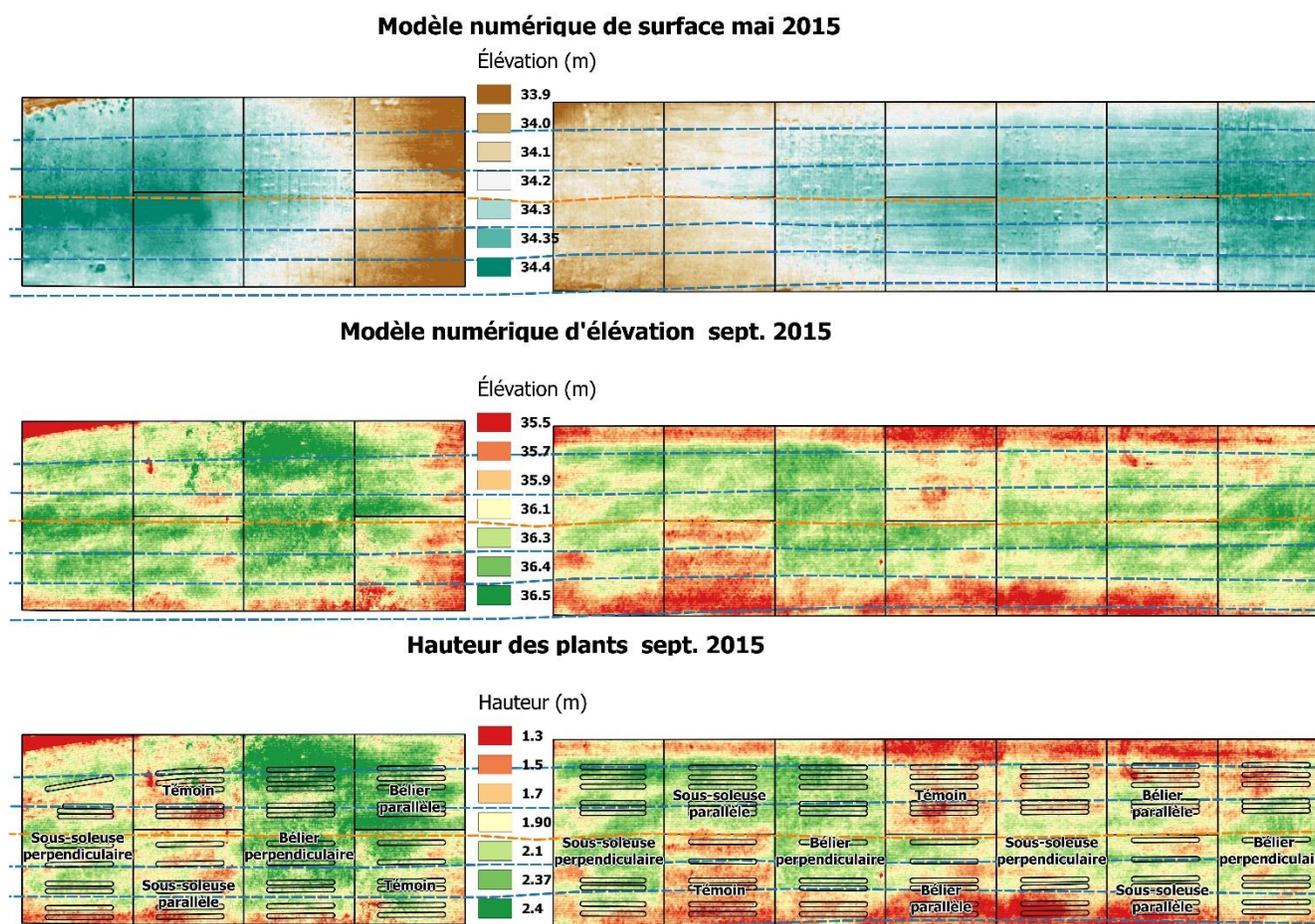


Figure 16 Utilisation des modèles numériques de surface (MNS) et des modèles numériques d'élévation (MNE) pour calculer la hauteur des plants de maïs sur le site St-Guillaume en 2015

Des corrélations ont été calculées entre la hauteur des plants de maïs et les rendements mesurés sur le terrain de manière géolocalisés. Le rendement en grain était très peu corrélé à l'élévation du sol, mais l'était avec la hauteur des plants de maïs (Figure 17). Les modèles linéaire et quadratique ont tous deux été considérés (Figure 17). Le

coefficient de détermination obtenu avec le modèle quadratique était plus élevé qu'avec le modèle linéaire (r^2 de 0,64 versus 0,53).

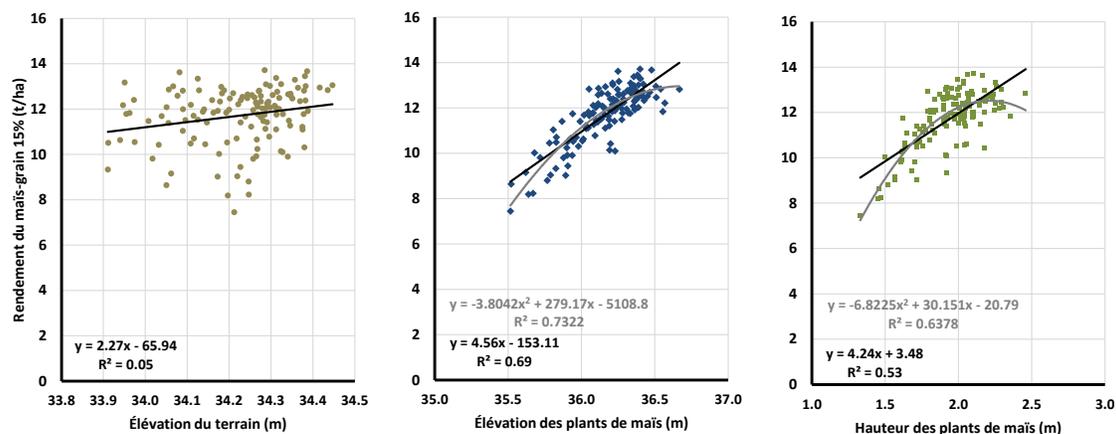


Figure 17 Corrélation des données de MNS, de MNE et de hauteur de plant en fonction de rendement en grain

Avec ces modèles, un nouvel estimé du rendement en grain de la parcelle a été calculé avec la hauteur des plants (Figure 18). La variabilité des résultats était plus importante avec le modèle linéaire par rapport au modèle quadratique. Cependant, les effets relatifs par rapport au témoin étaient très comparables.

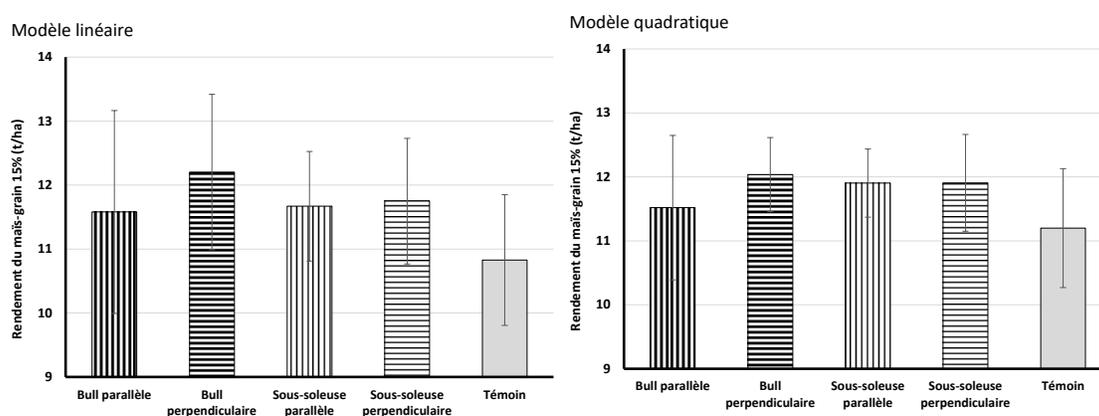


Figure 18 Prédiction du rendement en grain sur le reste de la parcelle en fonction des modèles linéaire et quadratique

Lorsque comparés avec les valeurs réelles mesurées au champ, les rendements moyens diffèrent d'un maximum de 2,9 % (témoin évalué avec le modèle quadratique).

6 CONCLUSION

Les essais de sous-solage réalisés dans cette étude ont généré des augmentations de rendement éphémères la première année après les travaux, sur deux des trois sites à l'étude. Les rendements mesurés en deuxième année sur deux sites ne semblaient pas avoir été influencés par les travaux de sous-solage. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène temporaire, mais il est difficile de les valider avec certitude. La première hypothèse serait liée au résultat éphémère du travail mécanique du sol. Sans amélioration additionnelle de l'état du sol par une colonisation de systèmes racinaires denses et de retour en biomasses, le sol retrouve rapidement son état antérieur compact suite au trafic renouvelé sur le terrain et à l'affaissement naturel du sol décompacté. De meilleures conditions de culture en 2016 pourraient constituer une deuxième hypothèse pour expliquer pourquoi les rendements n'ont pas été affectés par le sous-solage deux ans seulement après les travaux. De même, le dernier site sous-solé à l'automne 2015 n'a pas produit de résultat significatif sur les rendements de blé en 2016, un an après le sous-solage. Peu importe la véritable raison pour ce manque de réponse en deuxième année, ce constat de précarité des résultats avait aussi été observé sur une dizaine de sites d'essai de sous-solage réalisés chez les producteurs en 2012 et 2013 (Gasser et al., 2014). Des effets significatifs et positifs avaient été enregistrés sur deux des dix sites à l'essai la première année, mais seulement sur un site en deuxième année. Les conditions de sous-solage peuvent toujours être mises en cause pour expliquer ces effets mitigés. Ainsi, la profondeur de la zone compacte et l'ajustement de la hauteur de travail, les conditions de plasticité du sol ou de sa teneur en eau et les mesures mises en place après le sous-solage sont autant de facteurs qui peuvent influencer les résultats. Dans nos essais chez les producteurs, des engrais verts étaient implantés avant le sous-solage sur la plupart des sites et les sols demeuraient non travaillés jusqu'au printemps l'année suivante. La nature peu perméable du sous-sol rend cependant les conditions optimales pour le sous-solage peu fréquentes, car ces sols demeurent souvent trop humides en profondeur pour se fissurer adéquatement sous l'effet du sous-solage. Nous avons cependant réalisé ces essais de sous-solage à des dates où les sols étaient à des états de sécheresse les plus faibles, soit vers la fin du mois de septembre en 2014 et 2015.

Le sens du sous-solage semble avoir amélioré la performance de l'opération, mais cet effet n'était pas constant. Ainsi, le sous-solage avec le bélier opéré perpendiculairement aux drains a amélioré les rendements sur un site la première année, tandis que la sous-soleuse conventionnelle de producteur opéré perpendiculairement aux drains a seulement eu tendance à améliorer le rendement sur l'autre site. Le type de sous-soleuse ne semble pas avoir eu un effet important sur les rendements. Le bélier permettait de maintenir les étançons à des profondeurs plus constantes que les sous-soleuses conventionnelles opérées avec des tracteurs, mais dans les deux cas les profondeurs atteintes pouvaient être supérieures à 60 cm. L'analyse des profils a cependant révélé que les problématiques de compaction n'étaient pas les mêmes sur les trois sites, même si les profils réalisés en début de projet avaient laissé entrevoir des problèmes de compaction profonde sur les trois sites. En réalité sur le site St-Guillaume, l'argile Sainte-Rosalie souffrait davantage de compaction ou de déstructuration du sol en surface (0-30 cm) plutôt qu'en profondeur, tel qu'en témoignent les différents profils de masse volumique apparente. Sur les sites St-Henri et St-Pierre, la compaction augmentait avec la profondeur dans le loam argileux et l'argile lourde Kamouraska. Sur le site St-Henri, cette compaction était influencée par la position sur la planche, et était plus importante près de la surface du sol dans le bas de la planche. Certains sols argileux seraient donc naturellement

prompts à se compacter en profondeur ou encore présentent une granulométrie avec des formes d'argile et de limon qui ne se structurent pas de façon aussi efficace que d'autres argiles de la plaine du Saint-Laurent.

La modification des pratiques agricoles par un contrôle du trafic et de la circulation des tracteurs, épandeurs, moissonneuses et chars à grain, etc. serait donc essentielle pour prolonger le bénéfice des opérations de sous-solage (Raper et Bergtold, 2007). Lorsqu'aucun contrôle de la circulation de la machinerie n'est exercé dans le champ après des opérations de sous-solage, le sol reviendrait rapidement à son état compact initial. Par ailleurs, pour être efficace, le sous-solage devrait être suivi de cultures pouvant bénéficier de l'aération du sous-sol pour l'investir de leurs racines et produire un maximum de biomasse pour alimenter la méso et macrofaune et favoriser la structuration du sol. L'utilisation de cultures pérennes serait à privilégier dans ce sens, mais l'opération de sous-solage se rentabiliserait davantage à court terme avec des cultures commerciales comme le maïs-grain (Gasser et al., 2014). Sur le site St-Henri, le producteur a d'ailleurs semé deux années de suite du maïs-grain après avoir sous-solé la prairie. Les conditions de sol lors des récoltes au mois de novembre étaient évidemment loin d'être idéales pour assurer un effet positif à plus long terme du sous-solage. Donc pour être en mesure de contrôler et de réduire l'impact de la circulation de la machinerie sur les sols récemment sous-solés dans des conditions adverses, il faudrait choisir dans les régions plus froides, des cultures qui permettent d'amenuiser ces risques et d'augmenter le retour en biomasses racinaires et aériennes. Les cultures de céréales ou de canola suivies d'engrais verts ou de cultures de couvertures seraient ainsi plus appropriées.

L'usage de drones a permis d'acquérir des modèles numériques du terrain et de l'élévation des cultures à des stades critiques permettant d'estimer les rendements du maïs dans les zones non-récoltées de la parcelle. Une analyse plus approfondie des résultats a permis de quantifier l'effet de la distance aux drains sur les rendements en fonction des traitements de sous-solage réalisés. De même, des images prélevées avec des bandes spectrales dans le proche infra-rouge permettront de réaliser cette même analyse dans les cultures de blé et de soya, où la hauteur de ces plantes est un indicateur moins efficace pour le rendement. La démonstration de l'utilité de ces images dans un contexte de recherche à la ferme a été présentée dans le cadre d'activités de transfert scientifiques et pour les producteurs. Ces travaux seront approfondis dans le cadre du mémoire de maîtrise d'un étudiant inscrit à l'Université Laval.

RÉFÉRENCES

- Bédard, Y., S. Tessier, C. Laguë, Y. Chen et L. Chi. 1997. Soil compaction by manure spreaders equipped with standard and oversized tires and multiple axles. *Transactions of the ASAE*. 40 (1): 37-43.
- Brochu, Y. 1986. Résultats préliminaires de décompaction par sous-solage en sols drainés souterrainement. pp. 69-108. 13e Colloque de génie rural. Université Laval. R. Thériault (éd.). 220 p.
- Brunelle A. et V. Savoie. 2005. Diagnostic et correction de problèmes de drainage. Coordination des clubs conseils en Agroenvironnement. Longueuil, Qc. 4 p.
- Brochu Y. et D. Massicotte 2000. Module 7. Diagnostic et correction des problèmes de compaction et de drainage. Feuille 7A. Dans Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Québec. 20 p.
- Cochrane, L. P. Brenton, D. Holmstrom, J. van Roestel, L. Carter, C., Thompson. 1994. The effect of subsoiling and drainage treatments on soil and crop characteristics. Final report. CLBRR Contribution No. 94-49. 25 p.
- CRAAQ, 2007. Guide de référence technique en drainage souterrain et travaux accessoires. 51 pages + annexes.
- Gasser, M.-O. M.-H. Perron et M. Grenier. 2012. Effets bénéfiques combinés du sous-solage et des cultures à racines profondes pour décompacter le sol et améliorer la productivité des cultures. Rapport final. Projet CDAQ 6309 Défi-solution. Québec. 60 p.
- Häkansson, I. et R.C. Reeder 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load extent, persistence and crop response. *Soil Tillage and Research*. 29: 277-304.
- Lagacé, R. 2012. Conductivité hydraulique. Chapitre 6. Notes pour le cours Drainage GAE-3001. Pp. 65-100.
- Lagacé, R. 2012b. Modèles de drainage souterrain. Chapitre 7. Notes pour le cours Drainage GAE-3001. Pp. 101-126.
- Mehuys, G. 1986. Mesures de la compaction: aspects physique et économique. pp. 19-34. 13e Colloque de génie rural. Université Laval. R. Thériault (éd.). 220 p.
- Muller, L. 1988. Efficiency of subsoiling and subsurface drainage in heavy alluvial soils of the G.D.R. *Soil and Tillage Research*, 12:121-134.
- Rapper, R.L. & J.S. Bergtold. 2007. In-row subsoiling : A review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *American Society of Agricultural and Biological Engineeres*. 23(4) : 463-471.
- Reynolds, W.D. & D.E. Elrick. 1985. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship using the "Guelph permeameter". *Proceedings, National water well association conference on characterization and monitoring of the Vadose (unsaturated) zone*. Denver. Colorado. 25 pages.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. MAPAQ, Québec, 133 p.
- Thériault, R. (éditeur). 1986. Colloque de génie rural. Université Laval. 220 p.

- Weill, A. 2009. Les profils de sol. Un outil diagnostique de l'état des sols. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 122 p.
- Van Beers, W.F. 1965. La méthode du trou à la tarière : une mesure sur le terrain de la conductivité hydraulique du sol sous la nappe. Volume 1 de International Institute for Land Reclamation and Improvement Wageningen : Bulletin. Veenman & Zonen Eds. 28 pages.

ANNEXE A – DESCRIPTION DES PROFILS PÉDOLOGIQUES

Site St-Guillaume

	Profil 1	Profil 2	Profil 3
			
Profondeur enracinement	69 cm	70 cm	
Horizon Ap	0-28 cm	0-28 cm	0-27 cm
Couleur	Brun noir	Brun	Brun
Texture	Lourde	Lourde	Lourde
Structure	Agrégats	Agrégats	Agrégats
Consistance humide	Très ferme / compacte	Très ferme / compacte	Très ferme / compacte
Marbrures	-	-	-
Horizon B	Bg1 : 28-49 cm Bg2 : 49-69 cm	Bg1 : 28-51 cm Bg2 : 51-72 cm	Bg1 : 27-56 cm Bg2 : 56-80 cm
Couleur	Gris-brun	Gris-brun	Gris-brun
Texture	Lourde	Lourde	Lourde
Structure	Bg1 : Massive Bg2 : Massive	Bg1 : Massive Bg2 : Polyédrique angulaire	Bg1 : Massive Bg2 : Massive
Consistance humide	Très ferme / compacte	Très ferme / compacte	Très ferme / compacte
Marbrures	Fréquentes (2-20 % surface)	-	Fréquentes (2-20 % surface)
Horizon C	> 69 cm	> 72 cm	> 80 cm
Couleur	Gris	Gris	Gris
Texture	Lourde	Lourde	Lourde
Structure	Polyédrique angulaire	Polyédrique angulaire	Polyédrique angulaire
Consistance humide	Très ferme / compacte	Ferme / compaction modérée	Ferme / compaction modérée
Marbrures	-	-	-

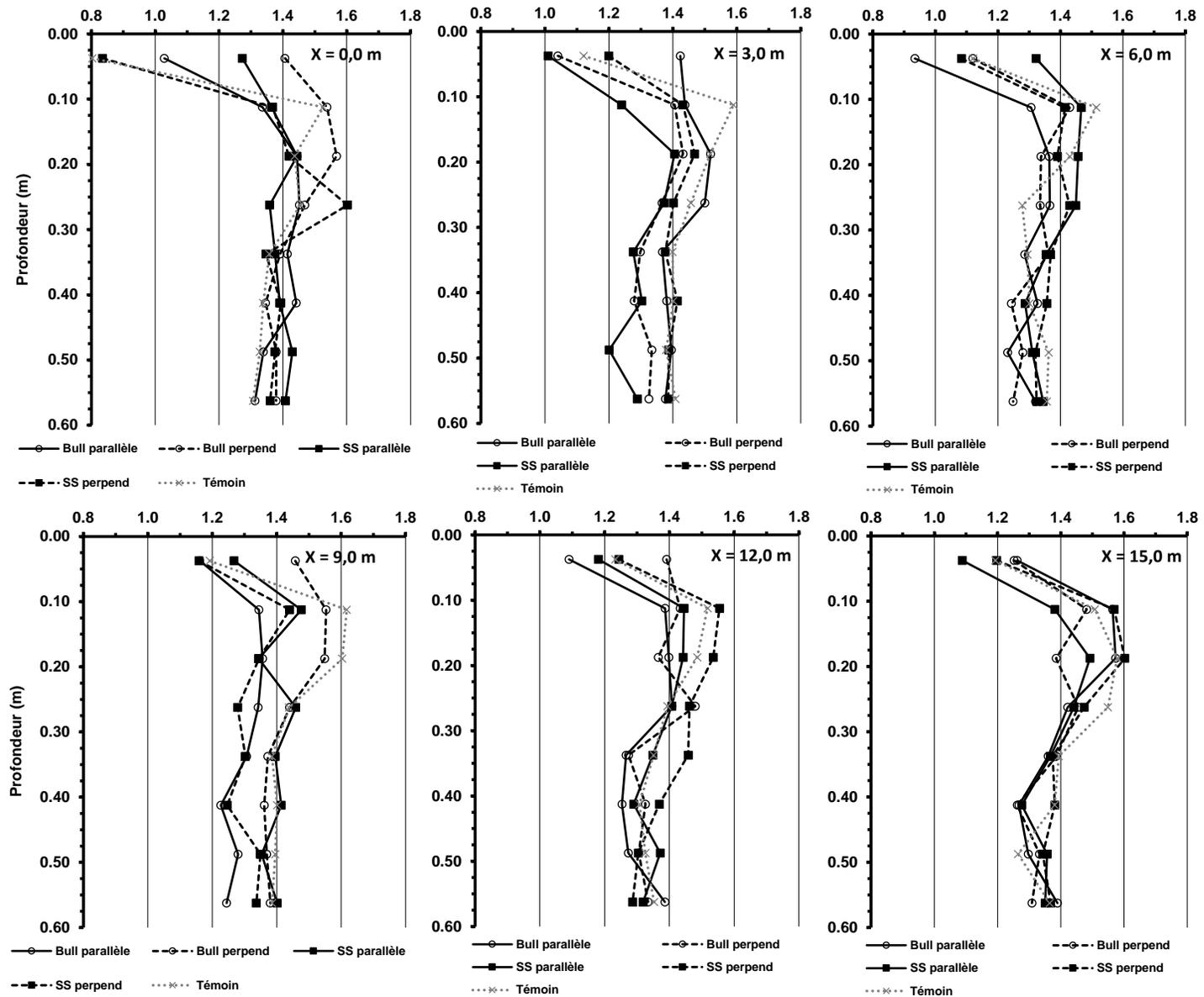
Site St-Henri

	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
				
Profondeur enracinement	70 cm	65 cm	70 cm	
Horizon Ap	0-30 cm	Ap1 : 0-15 cm Ap2 : 15-44 cm	0-26 cm	0-45 cm
Couleur	Brun gris	Brun noir	Brun gris foncé	Noir
Texture	Lourde	Lourde	Loam limoneux	Humifère
Structure	Agrégats	Agrégats	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire
Consistance humide	Ferme / compaction modérée	Ferme / compaction modérée	Friable / compaction faible	Friable / compaction faible
Marbrures	Rares (< 2% surface)	Ap 1 : Rares (< 2% surface) Ap2 : Fréquentes (2-20 % surface)	Absentes	Absentes
Horizon B	Bg1 : 30-50 cm Bg2 : 50-70 cm	44-65 cm	23-90 cm	45-70 cm
Couleur	Brun gris	Noir	Gris foncé	Gris foncé
Texture	Lourde	Lourde	Argile limoneuse	Argile lourde
Structure	Bg1 : Massive Bg2 : Massive	Agrégats	Massive	Massive
Consistance humide	Très ferme / compacte	Ferme / compaction modérée	Très ferme / compacte	Très ferme / compacte
Marbrures	Rares (< 2% surface)	Fréquentes (2-20 % surface)	Fréquentes (2-20 % surface)	Fréquentes (2-20 % surface)
Horizon C	> 70 cm	> 65 cm	> 90 cm	> 70 cm
Couleur	Gris	Gris	Gris foncé	Gris foncé
Texture	Lourde	Lourde	Loam argileux	Argile lourde
Structure	Polyédrique angulaire	Polyédrique subangulaire	Massive	Massive
Consistance humide	Ferme / compaction modérée	Ferme / compaction modérée	Ferme / compaction modérée	Ferme / compaction modérée
Marbrures	Rares (< 2% surface)	Fréquentes (2-20 % surface)	-	-

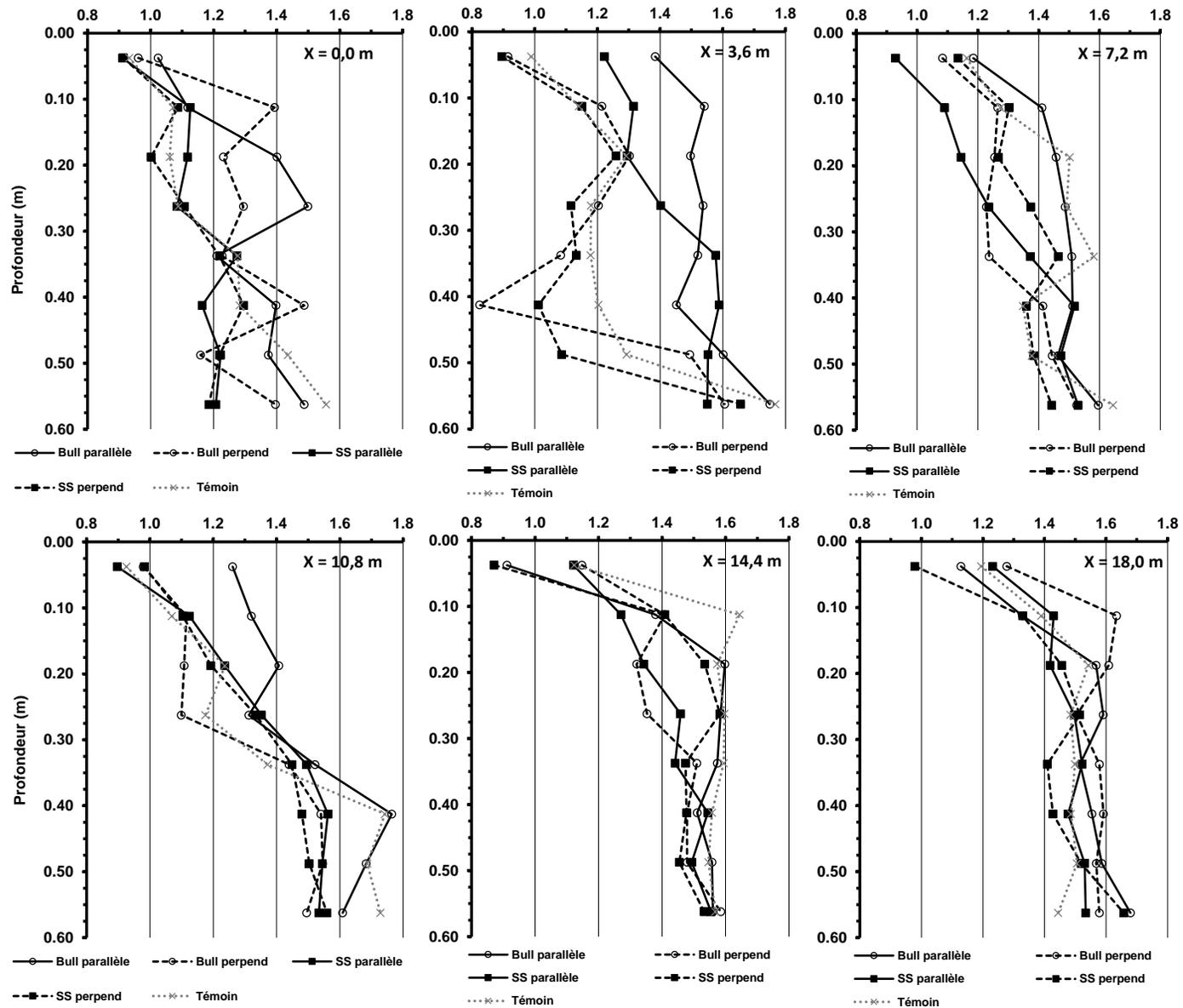
Site St-Pierre

	Profil 1	Profil 2	Profil 3
			
Profondeur enracinement	70 cm	65 cm	50 cm
Horizon Ap	0-25 cm	Ap1 : 0-16 cm Ap2 : 16-27 cm	0-25 cm
Couleur	Brun - brun foncé	Brun foncé	Brun foncé
Texture	Lourde	Lourde	Lourde
Structure	Polyédrique angulaire	Polyédrique angulaire	Massive
Consistance humide	Très ferme / compacte	Ferme / compaction modérée	Très ferme / compacte
Marbrures	Fréquentes (2-20 % surface)	Ap1 : Absentes Ap2 : Fréquentes (2-20 % surface)	Rares (< 2% surface)
Horizon B	Bg1 : 25-45 cm Bg2 : 45-65 cm	Bg1 : 27-46 cm Bg2 : 46-75 cm	Bg1 : 25-50 cm Bg2 : 50-80 cm
Couleur	Rouille	Rouille	Bg1 : Olivâtre Bg2 : Brun bleuté
Texture	Lourde	Lourde	Lourde
Structure	Bg1 : Polyédrique angulaire Bg2 : Polyédrique subangulaire	Bg1 : Polyédrique angulaire Bg2 : Polyédrique subangulaire	Bg1 : Massive Bg2 : Massive
Consistance humide	Bg1 : Très ferme / compacte Bg2 : Ferme / compaction modérée	Très ferme / compacte	Très ferme / compacte
Marbrures	Nombreuses (> 20% surface)	Bg1 : Nombreuses (> 20% surface) Bg2 : Fréquentes (2-20 % surface)	Fréquentes (2-20 % surface)
Horizon C	> 65 cm	> 75 cm	> 80 cm
Couleur	Bleu-gris	Bleu-gris	Bleu-gris
Texture	Lourde	Lourde	Lourde
Structure	Polyédrique subangulaire	Lamellaire	Lamellaire
Consistance humide	Très ferme / compacte	Friable / compaction faible	Ferme / compaction modérée
Marbrures	Fréquentes (2-20 % surface)	Rares (< 2% surface)	Rares (< 2% surface)

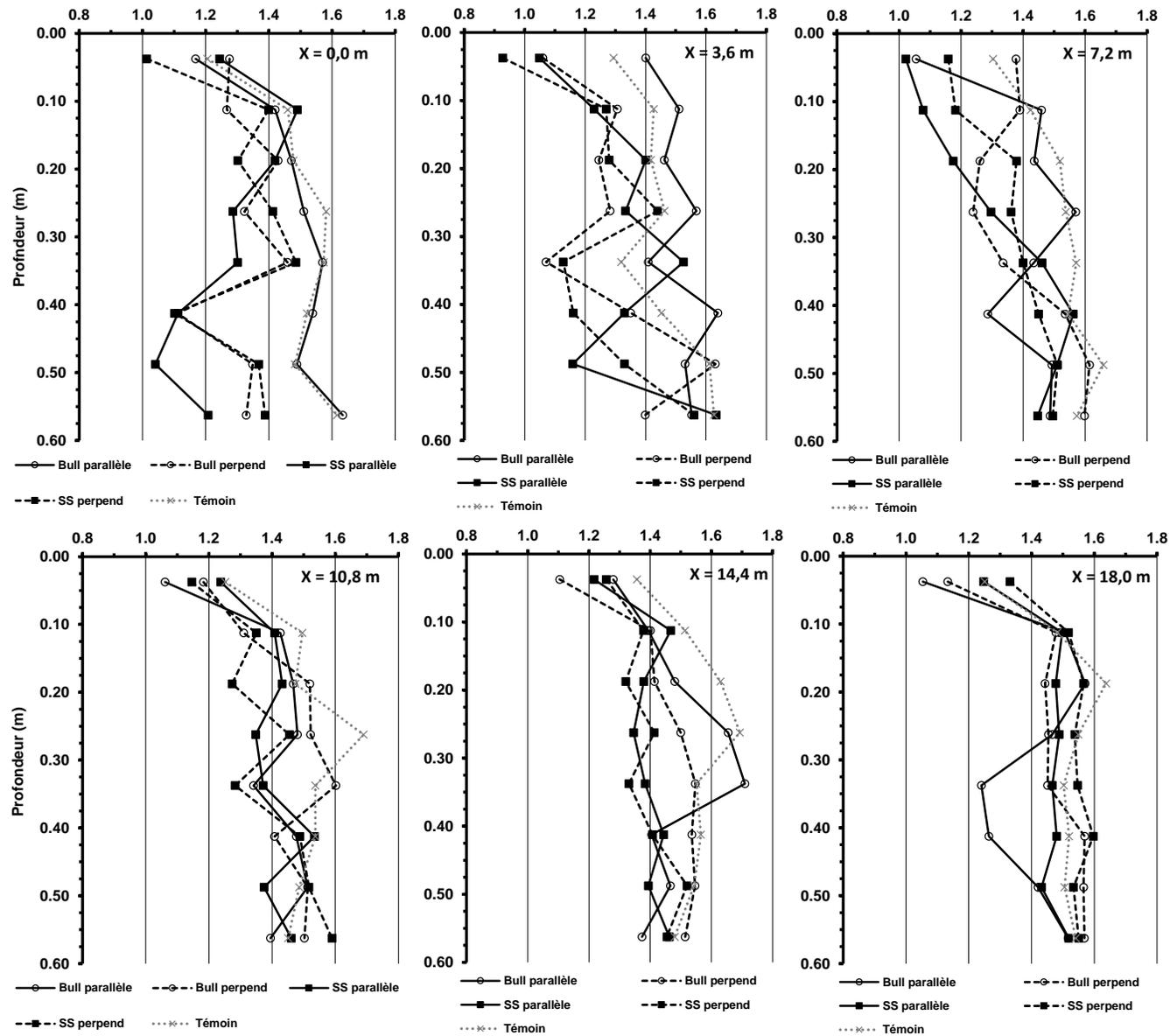
ANNEXE B PROFILS DE MVA POUR LE SITE ST-GUILLAUME EN 2015



ANNEXE C PROFILS DE MVA POUR LE SITE ST-HENRI EN 2015



ANNEXE D PROFILS DE MVA POUR LE SITE ST-HENRI EN 2016



ANNEXE E PROFILS DE MVA POUR LE SITE ST-PIERRE EN 2016

