

Programme d'appui pour un secteur agroalimentaire innovateur

Compaction du sol et productivité de la pomme de terre

Projet 12-310

Carl Boivin, M.Sc., agr. - IRDA

Daniel Bergeron, M.Sc., agr. – MAPAQ

Mars 2013

Cultivons l'avenir, une initiative fédérale–provinciale–territoriale

Équipe de réalisation

FERME VICTORIN DROLET INC.

Victorin Drolet	Producteur
Norbert Drolet	Producteur

INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN
AGROENVIRONNEMENT (IRDA)

Carl Boivin	Chercheur
Paul Deschênes	Professionnel de recherche
Stéphane Nadon	Technicien agricole
Jessy Caron	Attaché de recherche
Michaël Lemay	Technicien agricole
Michèle Grenier	Statisticienne
Nicolas Watters	Étudiant d'été
Paul Harrison	Étudiant d'été

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION
DU QUÉBEC (MAPAQ)

DIRECTION RÉGIONALE CAPITALE NATIONALE (DRCN)

Daniel Bergeron	Conseiller en horticulture
Jérôme Carrier	Technicien agricole

INSTITUT DE TECHNOLOGIE AGROALIMENTAIRE (ITA)

Vincent Lamarre	Enseignant au campus de La Pocatière
-----------------	--------------------------------------

LA COOP UNIVERT

Maxime Proulx	Expert conseil laitier et végétal
---------------	-----------------------------------

AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA

Athyna Cambouris	Chercheure
Isabelle Perron	Professionnelle de recherche
Mario Deschênes	Technicien

Table des matières

1	DESCRIPTION DU PROJET	6
1.1	Introduction.....	6
1.2	Objectif général.....	8
1.3	Objectifs spécifiques.....	8
2	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	9
2.1	Site expérimental	9
2.2	Matériel végétal et régie de culture.....	10
2.3	Traitements comparés	10
2.4	Dispositif expérimental et analyses statistiques.....	10
2.5	Collecte des données.....	11
2.5.1	Caractérisation du site	11
2.5.2	Conditions météorologiques.....	11
2.5.3	La conductivité électrique apparente du sol mesurée avec le VÉRIS 3100.....	12
2.5.4	Mesure de la compaction du sol avec un pénétromètre.	12
2.5.5	Conductivité hydraulique saturée mesurée avec un infiltromètre.....	12
2.5.6	Suivi de la teneur en eau du sol.....	14
2.5.7	Courbe de désorption en eau du sol	14
2.5.8	Récolte des tubercules et poids en matière sèche des parties aériennes.	14
2.5.9	Évaluation de la gale commune et de la rhizoctonie sur les tubercules récoltés	14
2.5.10	Poids spécifique des tubercules récoltés	15
2.5.11	Diagnostic des risques de compaction des sols.....	15
3	RÉSULTATS ET ANALYSES.....	16
3.1	Résultats obtenus en fonctions des objectifs spécifiques.....	16
3.1.1	Développer des outils diagnostiques abordables permettant de solutionner les problématiques de compaction en sol agricole	16
3.1.2	Évaluer l'impact financier de la compaction	27
4	CONCLUSION	29
4.1	Diffusion des résultats.....	31
5	REMERCIEMENTS	36
6	BIBLIOGRAPHIE.....	37
7	ANNEXE.....	38
7.1	Pluviométrie.....	38
7.2	Rapport produit par Perron, Cambouris et Deschênes, novembre 2012.	39
7.3	Rapport produit par Lamarre, mars 2013.....	47

Liste des figures

Figure 1. Résistance du sol à pénétration (kPa), selon la profondeur, mesurée dans un champ où certaines zones ont été sous-solées.	7
Figure 2. Couvert végétal de la culture au site expérimental.....	9
Figure 3 : Schématisation de la prise de mesure avec le pénétromètre à cône.	12
Figure 4. Schéma descriptif de l'infiltromètre à charge constante de Côté.....	13
Figure 5: Schéma de l'installation des sondes TDR dans la butte de sol.	14
Figure 6. Comparaison des valeurs moyennes de conductivité électrique apparente de surfaces (0-30 cm) des parcelles non sous-solées vs sous-solées.	17
Figure 7. Comparaison des valeurs moyennes de conductivité électrique apparente de surfaces (0-100 cm) des parcelles non sous-solées vs sous-solées.	17
Figure 8. Carte représentant la moyenne de la résistance mesurée (kPa) avec le pénétromètre dans l'horizon 15-45 cm.....	19
Figure 9. Corrélation entre la résistance moyenne du sol à la pénétration (kPa) et la conductivité électrique apparente moyenne mesurée dans la couche 0-30 cm de sol.	20
Figure 10. Variation de la teneur en eau volumique du sol (cm^3/cm^3) dans le temps selon les neuf zones considérées dans la butte pour une parcelle sous-solée.	22
Figure 11. Variation de la teneur en eau volumique du sol (cm^3/cm^3) dans le temps selon les neuf zones considérées dans la butte pour une parcelle non sous-solée.	22
Figure 12. Courbes de désorption en eau selon le traitement (0 à 100 kPa).....	25
Figure 13. Monsieur Daniel Bergeron (MAPAQ) expliquant l'impact de la compaction sur la profondeur d'enracinement des plants de pommes de terre.	31
Figure 14. Madame Athyna Cambouris (AAC) expliquant le fonctionnement du VÉRIS.	32
Figure 15. Monsieur Carl Boivin (IRDA) présentant le pénétromètre et l'infiltromètre à charge constante de Côté.....	33
Figure 16. Monsieur Louis Robert (MAPAQ) qui s'affaire à expliquer aux participants comment faire un profil de sol et ce que celui-ci révèle pour le site à l'essai..	34
Figure 17. Monsieur Vincent Lamarre (MAPAQ) qui discute du sous-solage.	35

Liste des tableaux

Tableau 1. Dates des principales opérations culturales.	10
Tableau 2. Caractéristiques agronomiques du sol au 25 octobre 2012.....	11
Tableau 3. Résistance moyenne mesurée par le pénétromètre dans l’horizon de sol 15 à 45 cm (kPa).	18
Tableau 4. Vitesse d’infiltration de l’eau dans le sol (cm ³ /h) mesurée avec un infiltromètre selon la parcelle et le traitement; non sous-solé (non SS) et sous-solé (SS).	21
Tableau 5. Densité apparente du sol dans la couche compactée et sous cette couche (g/cm ³) et diamètre moyen des particules de sol (DMP) en mm selon la parcelle et le traitement.	26
Tableau 6. Poids total et nombre de tubercules récoltés, poids moyen d’un tubercule et poids en matière sèche des plants dont les tubercules ont été récoltés selon la parcelle.	27
Tableau 7. Évaluation de la qualité des tubercules récoltés en termes d’indice de gale, d’indice de rhizoctonie et du poids spécifique.....	28

1 DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Introduction

Depuis quelques années, des baisses de rendement étaient observées dans certains champs de la ferme du requérant, faisant suite à un jaunissement des plants en cours de saison. Après des essais de fertilisation infructueux pour contrer le dépérissement, des efforts ont été consentis pour comprendre la dynamique de la plante et les causes de son faible enracinement. Après avoir constaté des zones compactées, des premiers essais de sous-solage ont été effectués à l'automne 2010 et les résultats obtenus ont démontré une meilleure croissance et une tendance à des meilleurs rendements dans les sections sous-solées. La compaction du sol est un facteur limitatif dans plusieurs cultures et cette situation ne fait pas exception pour la pomme de terre. En effet, des études mettent en relation la compaction du sol dans cette production et les impacts négatifs sur cette dernière. Selon Stalham et al. (2007), la compaction est identifiée comme un facteur limitatif à la croissance racinaire (densité et profondeur), au développement végétatif du plant et aux rendements en tubercules. Les auteurs ont observé que le taux de croissance racinaire est diminué de moitié dès l'atteinte d'une valeur de résistance du sol à la pénétration de 1500 kilopascals (kPa).

Des mesures de résistance à la pénétration ont été réalisées en 2011 avec un pénétromètre. Ces dernières ont été réalisées dans un champ de la Ferme Victorin Drolet quelques jours après un sous-solage. Les valeurs obtenues, dans les zones du champ volontairement non sous-solées ont démontré des valeurs comparables à celles présentées comme étant limitatives à la productivité de la pomme de terre. Ces mesures sont présentées à la figure Figure 1. La courbe en bleue représente la résistance moyenne du sol en kPa pour une zone non sous-solée du champ, alors que celle en rouge, pour une zone sous-solée du même champ.

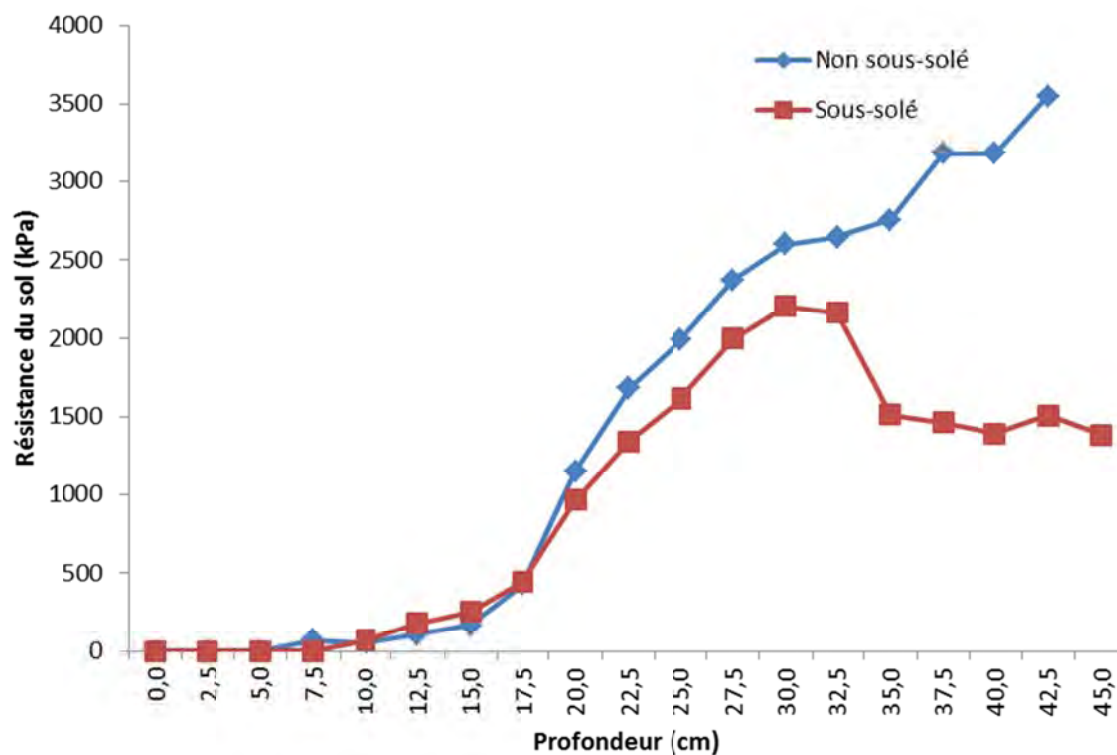


Figure 1. Résistance du sol à pénétration (kPa), selon la profondeur, mesurée dans un champ où certaines zones ont été sous-solées.

D'autres méthodes comme celle des profils de sol sont utilisées pour mesurer et diagnostiquer la compaction d'un sol. Toutefois, si cette dernière est très efficace, elle devient rapidement laborieuse si on veut l'utiliser comme méthode de diagnostic pour l'ensemble des superficies en culture. Déterminer spécifiquement les zones d'un champ qui sont compactées, en les géoréférençant avec un outil de diagnostic abordable, permettrait de réaliser des économies importantes pour l'entreprise aux prises avec un problème de compaction de sol. En effet, sous-soler implique des coûts importants, surtout lorsque l'ensemble des superficies le sont, en l'absence d'outils conviviaux et abordables de diagnostics.

1.2 Objectif général

Réduire la charge de travail et les coûts associés au sous-solage en associant la géoréférençant à une méthode de profilage des sols à grande échelle. Conséquemment, il serait possible d'intervenir spécifiquement dans certaines zones du champ plutôt que d'effectuer un sous-solage sur l'ensemble de la superficie.

1.3 Objectifs spécifiques

- Développer des outils diagnostiques abordables permettant de solutionner les problématiques de compaction en sol agricole.
- Évaluer l'impact financier de la compaction.
 - Relier la problématique du dépérissement des plants et des baisses de rendement au degré de compaction du sol.
 - Quantifier les pertes économiques conséquentes à la diminution des rendements en condition de sol compacté.
- Produire un document de transfert qui inclut une présentation des outils de diagnostics retenus et la façon de s'en servir.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Site expérimental

Le dispositif expérimental a été implanté en condition de production commerciale à la Ferme Victorin Drolet inc. Cette entreprise est située à Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (Québec), dans la région de Portneuf. La texture du sol était un sable grossier loameux (85,7 % sable, 5,9 % limon et 8,4 % argile). Une photo du site où les plants de pommes de terre sont en « pleine floraison » est présentée à la Figure 2.



Figure 2. Couvert végétal de la culture au site expérimental.

2.2 Matériel végétal et régie de culture

Le cultivar de pomme de terre utilisé pour réaliser les essais était le Péribonka. La régie de culture était celle du producteur et cette dernière était sous sa responsabilité (travail du sol, implantation, irrigation, renhaussement des plants, fertilisation et traitements phytosanitaires) (Tableau 1). La distance entre les rangs était de 92,44 cm (36 pouces) et la distance entre 2 plantons sur le rang était de 25,4 cm (10 pouces) pour une densité théorique de plantation de 43 056 plantons/ha.

Tableau 1. Dates des principales opérations culturales.

Opérations	Dates
Sous-solage	Novembre 2011
Plantation	Début mai 2012
Sarclage	Mi-juin 2012
Renhaussement	Fin juin 2012
Défanage (naturel)	Fin août 2012
Récolte (producteur)	Mi-septembre 2012

2.3 Traitements comparés

Les deux traitements auxquels le cultivar Péribonka a été soumis sont les suivants :

- Sol non sous-solé (non SS)
- Sol sous-solé (SS)

2.4 Dispositif expérimental et analyses statistiques

Le design du dispositif expérimental était un plan en blocs complets aléatoires où chacun des deux traitements était répété quatre fois pour un total de huit parcelles ou unités expérimentales (4 blocs x 2 traitements). Chacune des 8 parcelles était d'une largeur de 14 m (45 pieds) et d'une longueur de 91 m (300) pieds.

Le poids et le nombre de tubercules récoltés, l'indice de gale et de rhizoctonie, le poids spécifique des tubercules, le poids en matière sèche des plants, la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol mesurée avec l'infiltromètre et la densité du sol dans la couche compactée et sous cette dernière ont été analysés avec la procédure Mixed de SAS (Littell, 2006). Des corrélations ont également été effectuées entre les différents paramètres mesurés pour vérifier s'il existe une relation entre ces derniers.

2.5 Collecte des données

2.5.1 Caractérisation du site

Les analyses de sol ont été réalisées sur des échantillons composites prélevés dans la strate de sol 0-20 cm dans chacune des 8 parcelles le 25 octobre 2012. Les sols ont été tamisés à 2 mm puis séchés à l'air à 21 °C. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivis d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des Productions Végétales du Québec, 1988). Le contenu en matière organique (MO) totale a été mesuré selon la méthode d'oxydation par voie humide de Walkley Black (Allison, 1965). Le N_{tot} , préalablement extrait par digestion Kjeldahl, a été déterminé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon (McGill et Figueiredo, 1993). Le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique. Les résultats de cette caractérisation sont présentés au Tableau 2 selon la parcelle.

Tableau 2. Caractéristiques agronomiques du sol au 25 octobre 2012.

Paramètres	Valeurs selon la parcelle							
	1	2	3	4	5	6	7	8
pH_{eau}	6,60	6,07	5,81	5,67	5,72	5,75	5,84	5,82
M.O. (%)	3,86	4,18	4,60	4,30	3,90	3,99	4,52	3,79
N_{tot} (%)	0,114	0,143	0,130	0,168	0,147	0,123	0,145	0,141
Éléments Mehlich-3 (mg/kg b.s.)								
P	197	195	117	176	189	128	171	165
K	120	102	73	63	51	69	77	82
Ca	1429	1118	772	750	889	658	943	766
Mg	93	92	65	59	71	58	73	75

2.5.2 Conditions météorologiques

Les épisodes de pluie ont été enregistrés avec un acqui-siteur de données HOBO UA-003-64. La température et l'humidité relative de l'air ambiant ont été mesurées avec une sonde HOBO Pro v2 (modèle U23-001).

2.5.3 La conductivité électrique apparente du sol mesurée avec le VÉRIS 3100

La conductivité électrique apparente (CEa) du sol a été mesurée dans le champ avec le Vérís 3100 (Figure 14). Cet appareil applique un courant électrique dans le sol et en mesure le voltage résultant. Les mesures ont été prises à deux différentes profondeurs dans le sol, soit dans la strate 0-30 cm et dans la strate de 0-100 cm. Les résultats sont illustrés sur une carte où les variations mesurées sont identifiées par des couleurs différentes. Ces mesures et l'analyse de ces dernières ont été réalisées par l'équipe de madame Athyna Cambouris d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (voir point 7.2).

2.5.4 Mesure de la compaction du sol avec un pénétromètre.

La résistance du sol à la pénétration a été mesurée avec un pénétromètre Fieldscout SC900 de Spectrum (Figure 15). Cet appareil enregistre les valeurs de résistance en unité de pression (kPa). L'appareil est muni d'une sonde reliée à un cône qui est d'une longueur de 1,3 cm avec un angle de 30 degrés. Les mesures sont enregistrées à tous les 2,5 cm de profondeur à l'aide d'ultrasons. Ces mesures ont été effectuées en octobre en conditions d'humidité de sol près de la capacité au champ. Les lectures ont été effectuées à 45 endroits dans chacune des 8 parcelles. Une coordonnée GPS est associée à chacune des mesures (Figure 3).

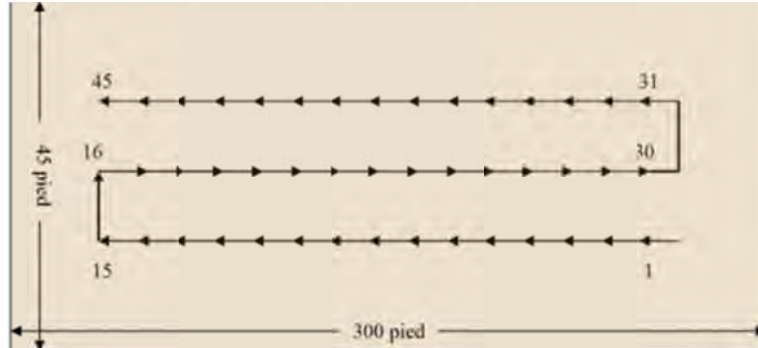


Figure 3 : Schématisation de la prise de mesure avec le pénétromètre à cône.

2.5.5 Conductivité hydraulique saturée mesurée avec un infiltromètre.

La conductivité hydraulique saturée a été mesurée au champ avec un infiltromètre à charge constante de Côté (Figure 4 et Figure 15) (Banton et al., 1991). La surface impactée par la mesure est d'environ 78,5 cm², et ce, avec une charge d'eau faible (hauteur de 3,5 cm), se rapprochant ainsi des conditions de précipitation ou d'irrigation. Les infiltrations ont été effectuées à raison d'un exercice par parcelle, et ce, à 20 cm de profondeur au centre de la butte de sol.

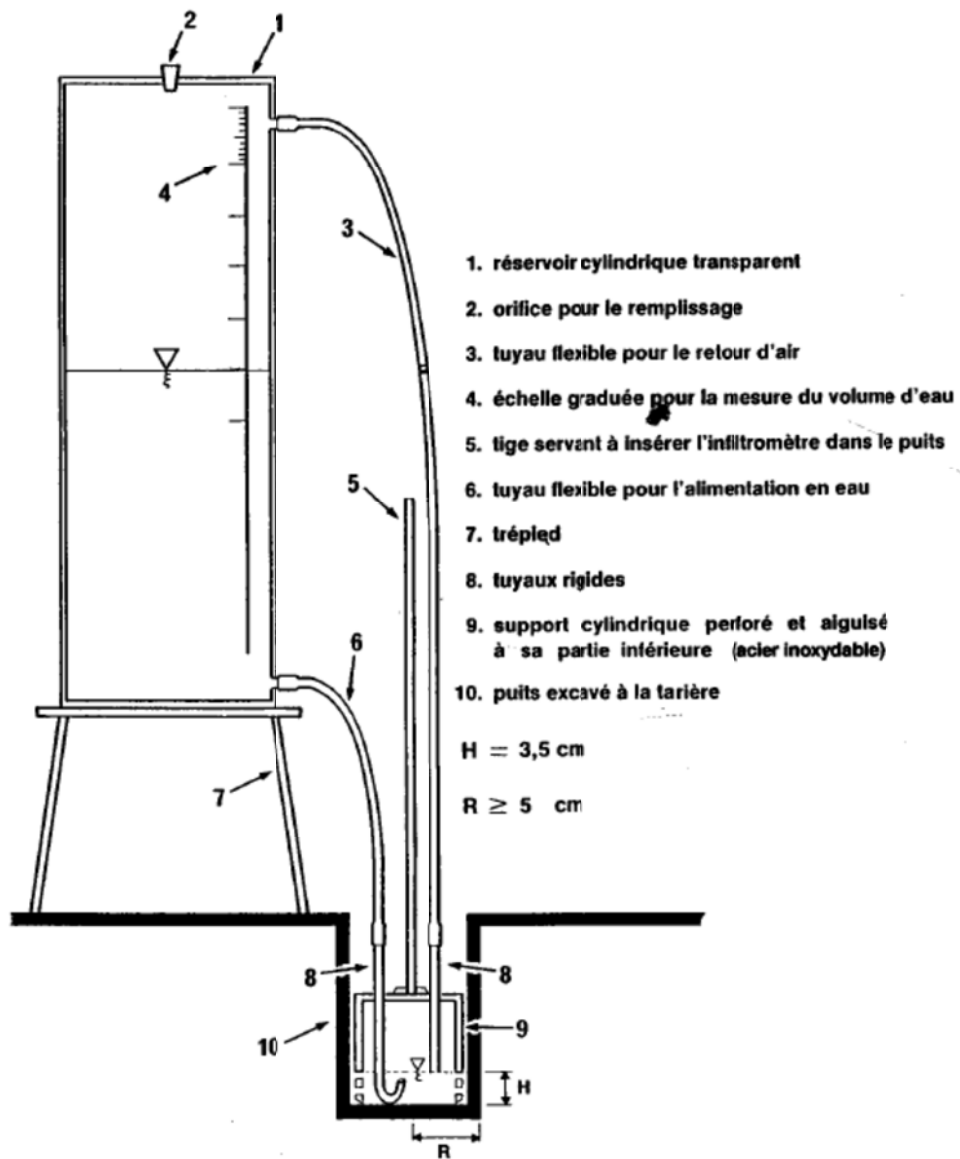


Figure 4. Schéma¹ descriptif de l'infiltromètre à charge constante de Côté.

¹ Tiré de Banton et al., 1991

2.5.6 Suivi de la teneur en eau du sol

L'installation de neuf sondes TDR (réflectométrie dans le domaine temporel) a été effectuée dans deux parcelles, soit un site par traitement. Les sondes étaient superposées dans la butte de sol comme illustré sur la Figure 5. Ce type de sonde mesure la constante diélectrique apparente du sol et la relie empiriquement à la teneur en eau volumique du sol.

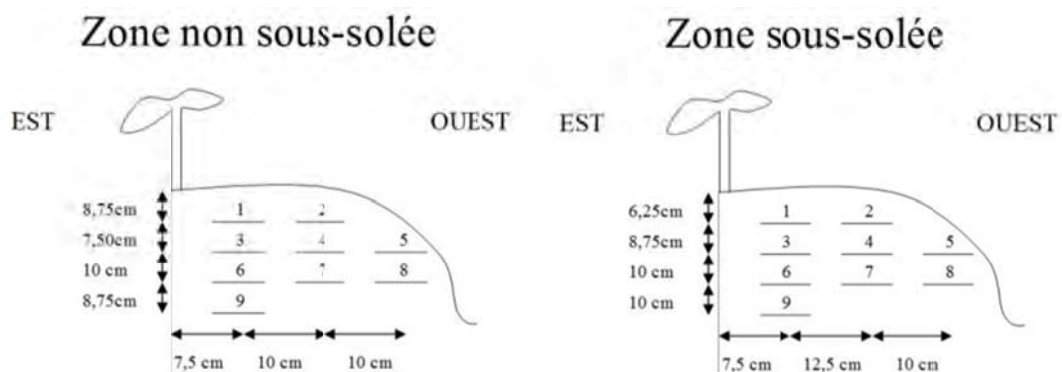


Figure 5: Schéma de l'installation des sondes TDR dans la butte de sol.

2.5.7 Courbe de désorption en eau du sol

Des échantillons de sol non perturbé ont également été prélevés à l'aide de cylindres dont la hauteur et le diamètre est de 6,4 cm (2,5 po). Le sol prélevé l'a été dans l'horizon compris entre 18 et 22 cm de profondeur. Les analyses sont effectuées en laboratoire afin de déterminer la courbe de désorption en eau du sol (Topp et al., 1993).

2.5.8 Récolte des tubercules et poids en matière sèche des parties aériennes.

La récolte a été effectuée le 28 août. Les tubercules de cinq plants de pommes de terre consécutifs d'un même rang ont été récoltés, et ce, dans les huit parcelles du dispositif. Les tubercules ont été pesés un à un. La partie aérienne des plants a été séchée à 105 ° C et pesée afin d'obtenir le poids en matière sèche des plants.

2.5.9 Évaluation de la gale commune et de la rhizoctonie sur les tubercules récoltés

Une évaluation du niveau d'infestation de deux maladies, soit la gale commune (*Streptomyces scabies*) et la rhizoctonie (*rhizoctonia solani*) a été effectuée sur l'ensemble des pommes de terre récolté. À l'aide d'une grille d'évaluation, un indice est obtenu en fonction de la pondération accordée à chaque différence observée sur les

tubercules de pomme de terre. La grille d'évaluation utilisée est celle développée par le centre de recherche Les Buissons (MAPAQ). L'indice calculé par cette méthode utilise un facteur de pondération variant de 1 à 5 et qui tient compte à la fois de l'étendue et du type de symptôme observé sur les tubercules.

2.5.10 Poids spécifique des tubercules récoltés

Le poids spécifique a été mesuré à partir d'un sous-échantillon de 3 kg de tubercules par parcelle. Le sous échantillon a d'abord été pesé (poids dans l'air). Les tubercules ont ensuite été plongés dans l'eau et le poids noté à nouveau (poids dans l'eau). Le poids spécifique est le résultat de la division du poids dans l'air par la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau.

2.5.11 Diagnostic des risques de compaction des sols

Parallèlement aux essais réalisés au champ, une appréciation des machineries utilisées, de leurs opérations et des pratiques culturales a été réalisée par monsieur Vincent Lamarre afin d'évaluer leurs impacts possibles sur le sol (voir rapport au point 7.3)

3 RÉSULTATS ET ANALYSES

3.1 Résultats obtenus en fonctions des objectifs spécifiques

3.1.1 Développer des outils diagnostiques abordables permettant de solutionner les problématiques de compaction en sol agricole

3.1.1.1 Existe-t-il une différence de la conductivité électrique apparente (CEa) pour une parcelle non sous-solée versus une parcelle sous-solée?

Extrait du rapport Perron, Cambouris et Deschênes (2012) préparé dans le cadre de ce projet. Rapport présenté en annexe au point 7.2.

« La mesure de la conductivité électrique apparente est un intégrateur de plusieurs propriétés physico-chimiques des sols (Corwin et Lesch 2003). Par exemple, des auteurs ont trouvé des corrélations avec la salinité salinity (Lesch et al. 1995), la teneur en eau des sols, la texture (Williams et Hoey 1987), la profondeur au substratum et les rendements (Cambouris et al. 2006) la matière organique (Banton et al. 1997) ainsi que la topographie (Fridgen et al. 2000). Plus récemment, Rácz et Szüle (2009) ont mis en évidence l'utilisation du VERSI 3100 pour évaluer la décompaction du sol. »

« Les figures 4 et 5² illustrent les valeurs moyennes des mesures de CEa des parcelles SS et non SS. Dans ce projet de recherche, l'analyse des résultats n'a pas révélé de correspondance entre les valeurs mesurées de CEa et les méthodes de travail du sol. Contrairement à ce qui a été rapporté par Rácz et Szüle (2009), les différences entre les parcelles non sous-solées et sous-solées ne sont pas plus grandes pour les mesures de CEa de surface (Figure 4)² que pour les mesures acquises en profondeurs (Figure 5)². »

²Les figures 4 et 5 font référence à celles présentées dans le rapport en annexe au point 7.2, il s'agit des figures 6 et 7 dans le présent rapport.

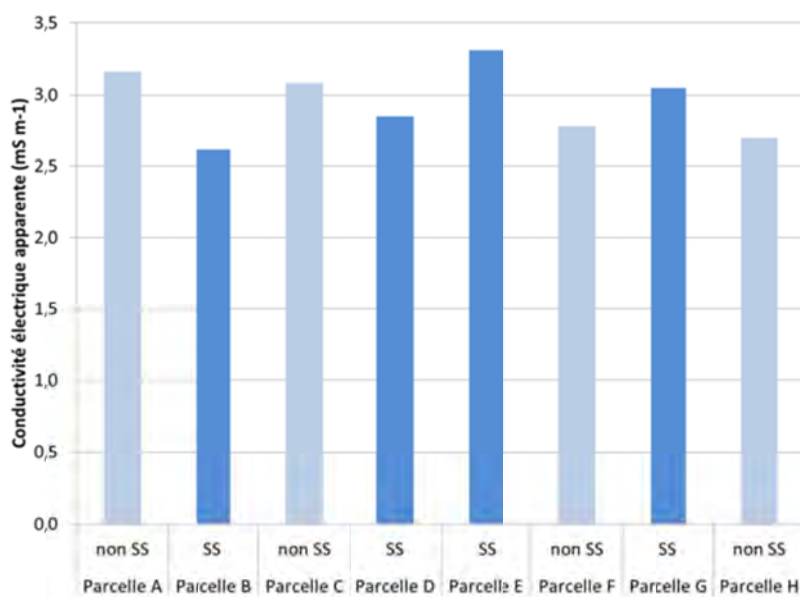


Figure 6. Comparaison des valeurs moyennes de conductivité électrique apparente de surfaces (0-30 cm) des parcelles non sous-solées vs sous-solées³.

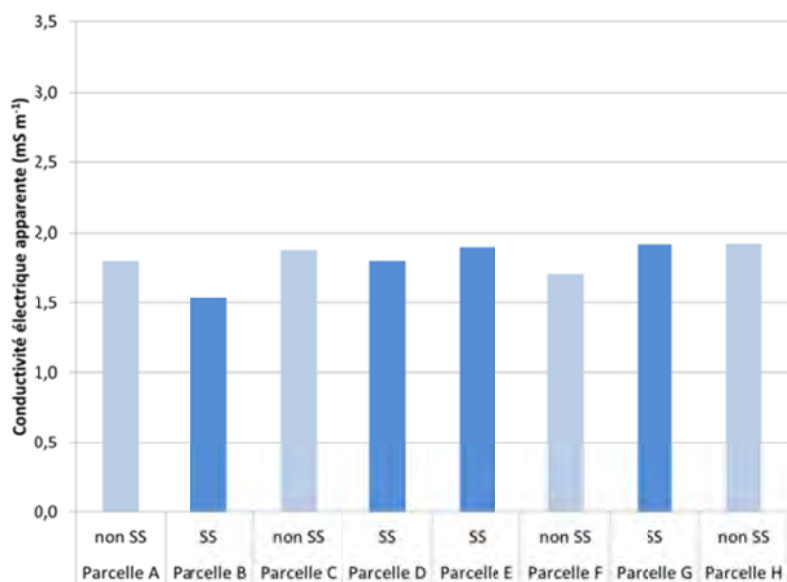


Figure 7. Comparaison des valeurs moyennes de conductivité électrique apparente de surfaces (0-100 cm) des parcelles non sous-solées vs sous-solées.

³ Les lettres identifiant les parcelles (A à H) correspondent, respectivement, aux numéros attribués à ces parcelles dans le reste du rapport (7, 6, 3, 2, 8, 5, 4 et 1).

3.1.1.2 Pénétromètre

Les valeurs de résistance moyenne et maximale du sol à la pénétration, pour l'horizon 15 à 45 cm, sont présentées au Tableau 3 pour chacune des 8 parcelles. Au bas de ce tableau, les valeurs ont été regroupées en moyennes par traitement. Ces dernières semblent plus basses pour les parcelles sous-solées comparativement à celles non sous-solées. En effet, ces valeurs sont respectivement de 2007 et 3666 kPa pour la résistance moyenne et la résistance maximale alors que des valeurs de 2381 et 4005 kPa ont respectivement été obtenues pour la résistance moyenne et la résistance maximale pour les parcelles non sous-solées. Stalham et al. rapportent que le taux de croissance racinaire des plants de pommes de terre est réduit de moitié dès l'atteinte de valeurs de résistance de 1500 kPa. Cette référence indique que les valeurs observées, même si elles sont plus basses dans les zones sous-solées, demeurent élevées et indiquent que la croissance racinaire est négativement affectée.

La résistance moyenne mesurée dans l'horizon 15-45 cm a également été illustrée à la Figure 8. Présenté selon la parcelle, l'ordre de grandeur de la résistance moyenne est présenté avec des couleurs différentes, et ce, par accroissement de 1000 kPa. Cette carte a été réalisée avec des valeurs de résistance à la pénétration mesurées à l'automne, soit près d'un an après le sous-solage. Cette carte révèle une grande hétérogénéité dans les valeurs mesurées.

Tableau 3. Résistance moyenne mesurée par le pénétromètre dans l'horizon de sol 15 à 45 cm (kPa).

Parcelles	Résistance moyenne (kPa)	Valeur maximale de résistance (kPa)
1 - non SS	3188	4697
2 - SS	2038	3705
3 - non SS	1952	3416
4 - SS	2601	4045
5 - non SS	2370	4074
6 - SS	1662	3491
7 - non SS	2014	3831
8 - SS	1728	3424
Moyenne non SS	2381	4005
Moyenne SS	2007	3666

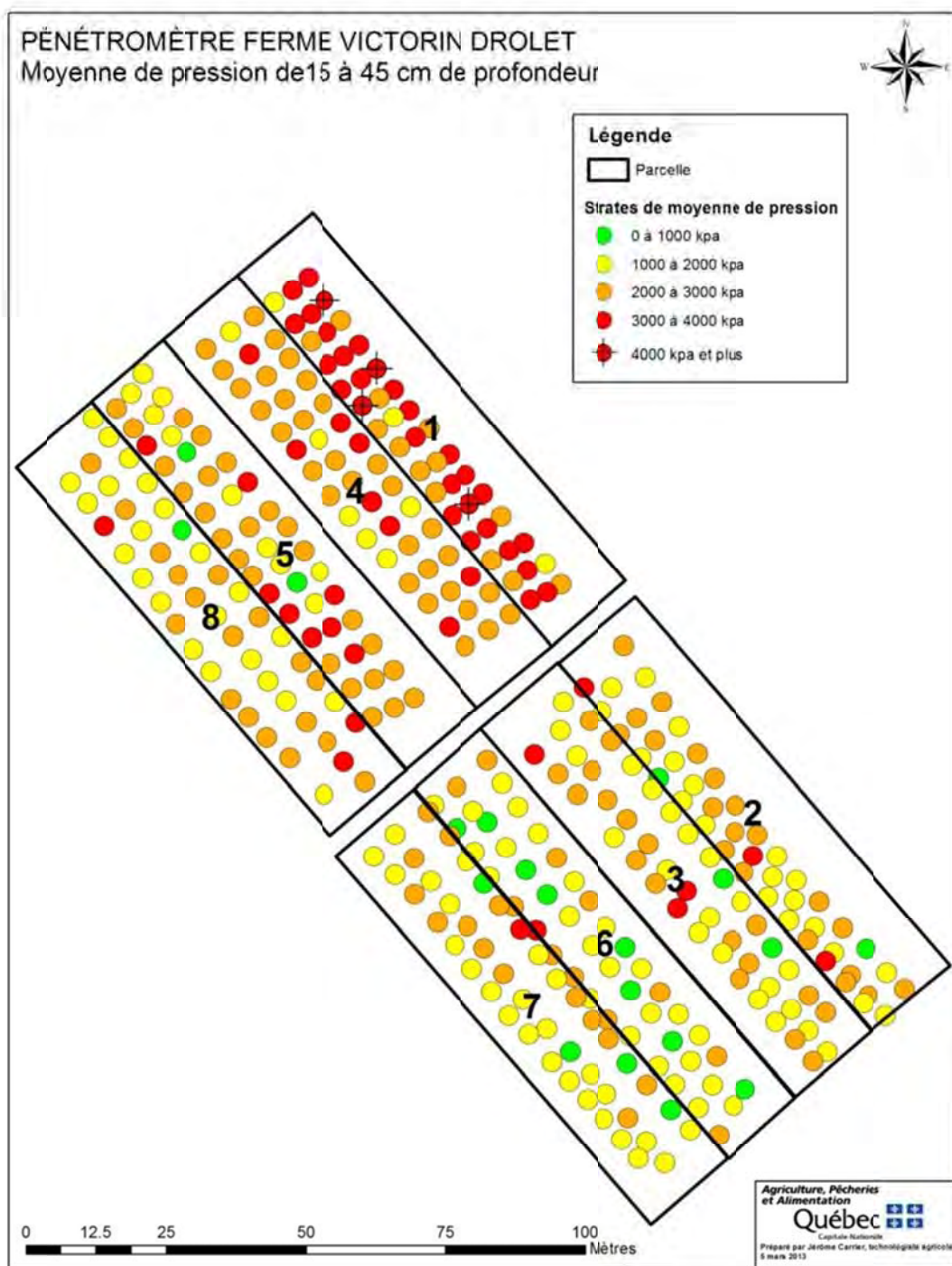


Figure 8. Carte représentant la moyenne de la résistance mesurée (kPa) avec le pénétromètre dans l'horizon 15-45 cm.

Les valeurs moyennes de résistance à la pénétration du sol dans l'horizon 15-45 cm (Tableau 3) obtenues dans les 8 parcelles ont été mises en relation avec les valeurs moyennes de conductivité électrique apparente du sol à l'aide du coefficient de régression R^2 (Figure 9). Ce dernier, qui peut être exprimé en pourcentage⁴, mesure l'ordre de grandeur de la relation entre deux variables. Plus ce coefficient est élevé, plus la variation d'un facteur peut expliquer la variation d'un second facteur. Les résultats obtenus (R^2 de 0,1088) indiquent une force de relation plutôt faible entre l'ordre de grandeur de la résistance à la pénétration et de la conductivité électrique apparente du sol.

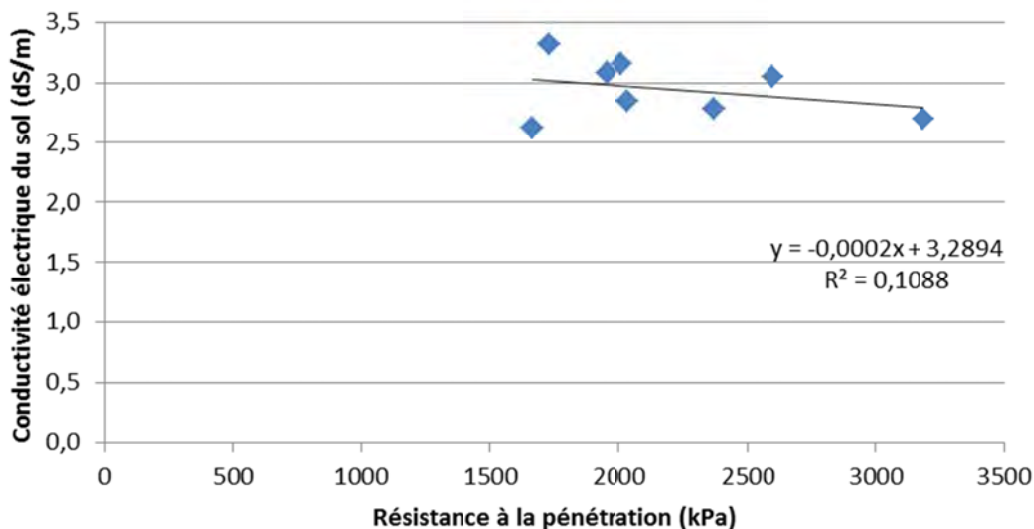


Figure 9. Corrélation entre la résistance moyenne du sol à la pénétration (kPa) et la conductivité électrique apparente moyenne mesurée dans la couche 0-30 cm de sol.

3.1.1.3 La conductivité hydraulique saturée du sol mesurée avec un infiltromètre

La conductivité hydraulique saturée (K_s) correspond à la vitesse d'écoulement de l'eau à l'intérieur d'un sol saturé, signifiant que la majorité des pores de ce dernier est comblée par de l'eau. Les valeurs obtenues sont présentées au tableau suivant selon la parcelle. Les moyennes obtenues par traitements sont significativement différentes entre les deux traitements à $P < 0,05$. Par conséquent, la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol des parcelles non sous-solées est significativement plus faible que celle mesurée dans les parcelles sous-solées. Ce résultat indique que la compaction du sol est un facteur qui intervient dans la diminution de la vitesse d'infiltration de l'eau.

⁴ Il faut extraire la racine carrée du coefficient R^2 pour obtenir la correspondance en pourcentage. Par exemple, un R^2 de 0,1088 équivaut à 33 %.

Tableau 4. Vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol (cm³/h) mesurée avec un infiltromètre selon la parcelle et le traitement; non sous-solé (non SS) et sous-solé (SS).

Parcelles	Vitesse d'infiltration (cm ³ /h)
1 - non SS	1838
2 - SS	2881
3 - non SS	1165
4 - SS	3156
5 - non SS	4535
6 - SS	5589
7 - non SS	1738
8 - SS	2077
Moyenne non SS	2319 a
Moyenne SS	3426 b

Les résultats obtenus avec l'infiltromètre vont de pair avec ceux obtenus avec les sondes TDR installées dans la butte. Les Figure 10 et Figure 11 représentent la variation de la teneur en eau volumique du sol dans le temps, et ce, selon la zone de la butte de sol considérée (voir disposition des neuf sondes présentée à la Figure 5). Par exemple, une courbe se retrouvant au bas du graphique indique une plus faible teneur en eau du sol qu'une courbe se situant au haut du graphique. Les variations de la teneur en eau sont influencées par les prélèvements de la plante, les pertes par évaporation (surtout près de la surface du sol) et les apports en eau par la pluie et les irrigations. La couche compactée est en profondeur et les sondes 6, 7 et 9 (lignes pointillées) sont aux alentours de cette zone, soit entre 25 et 35 cm. Lorsque l'on compare les deux graphiques (sondes 6, 7 et 9) on constate que la teneur en eau mesurée par ces sondes (lignes pointillées) est plus élevée pour le traitement sous-solé. Cette situation pourrait s'expliquer par la plus grande difficulté pour l'eau à se rendre à cette profondeur.

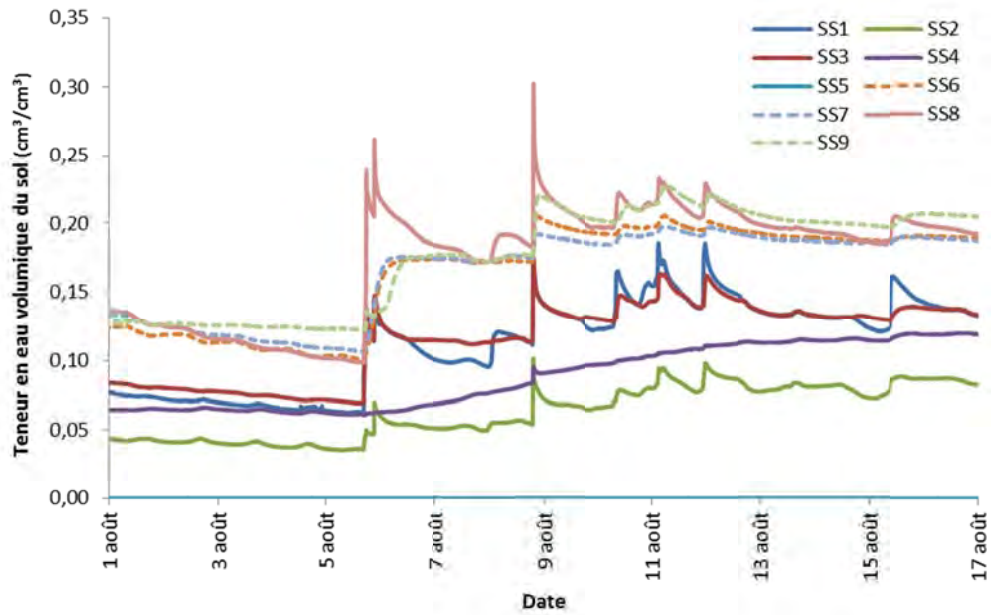


Figure 10. Variation de la teneur en eau volumique du sol (cm^3/cm^3) dans le temps selon les neuf zones considérées dans la butte pour une parcelle sous-solée.

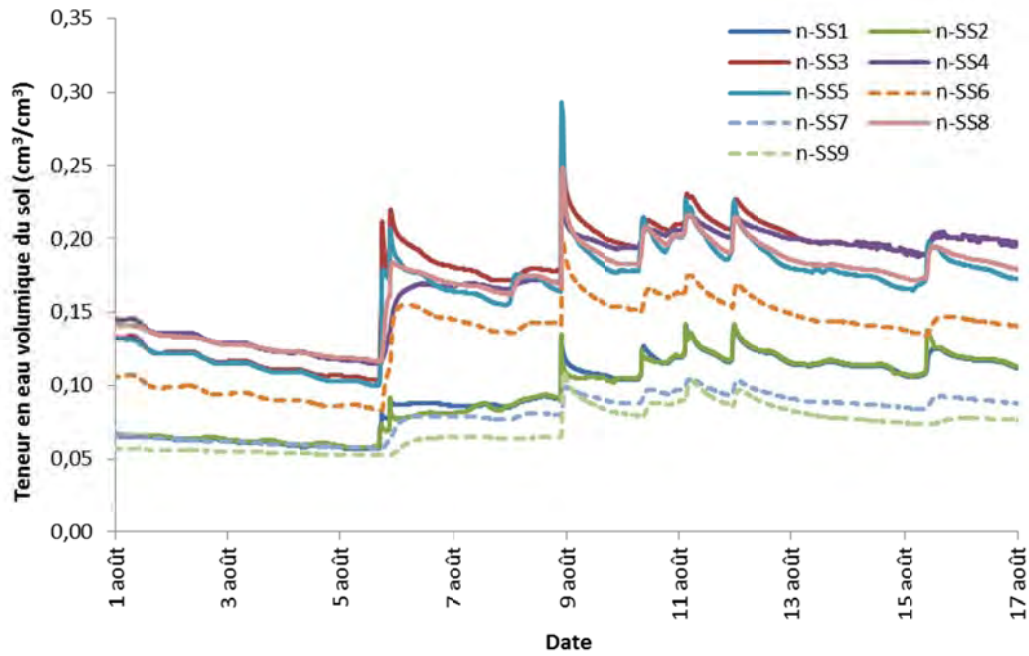


Figure 11. Variation de la teneur en eau volumique du sol (cm^3/cm^3) dans le temps selon les neuf zones considérées dans la butte pour une parcelle non sous-solée.

3.1.1.4 Portrait de l'entreprise au regard de ses opérations culturales

Monsieur Vincent Lamarre était chargé de dresser un portrait de l'entreprise au regard de ses opérations culturales. Le rapport complet est en annexe (voir point 7.3) et l'extrait suivant en est la conclusion.

« L'entreprise ne devrait pas faire de changements drastiques au niveau de sa machinerie agricole. En premier lieu, il est nécessaire d'augmenter la performance technique par les actions suivantes :

- *Équilibrer les charges sur les tracteurs et ajuster la pression des pneus en conséquence;*
- *Vérifier régulièrement la pression des pneus;*
- *Appliquer le concept de gestion intégrée des sols;*
- *Porter une attention particulière aux conditions d'humidité du sol pour la réalisation des opérations mécanisées.*

En second lieu, lorsque l'entreprise fera l'acquisition de machines ou d'équipements agricoles, elle pourra considérer les éléments suivants :

- *Porter une attention particulière au choix d'un pneu minimisant la pression au sol lors de l'achat d'un nouveau tracteur, ou lors du remplacement de pneus sur sa machinerie agricole;*
- *Implanter le concept de gestion du trafic et de zones de passage préférentielles de la machinerie par guidage GPS-RTK;*
- *Privilégier les étançons droits de type minimum till lors de l'achat d'une sous-soleuse.*

La réduction de l'impact des opérations culturales sur les sols est un travail de tous les jours qui requiert l'élaboration d'une stratégie tant technique qu'agronomique. L'ouverture de l'entreprise à la réalisation de ce diagnostic est déjà un point de départ important à l'optimisation des pratiques culturales. »

3.1.1.5 Autres caractéristiques physiques du sol

3.1.1.5.1 Courbe de désorption en eau du sol

La teneur en eau volumique mise en relation avec la tension du sol permet de faire ressortir le comportement hydrodynamique d'un sol. Lorsque le sol est saturé, une tension nulle peut être observée; les courbes démontrent une teneur en eau à saturation d'environ $0,60 \text{ cm}^3$ d'eau par cm^3 de sol. Suite à une saturation, l'eau située dans les macropores n'est pas adsorbée par le sol et sera perdue en profondeur par lessivage. Le volume d'eau retenu par les micropores du sol et les forces d'adhésion des particules de sol correspond à la capacité au champ (CC); cette valeur est d'environ $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ pour ce sol (2,5 kPa). Passé les valeurs 10-12,5 kPa de tension, les 2 courbes se stabilisent à une valeur moyenne de teneur en eau de $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Ce $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ n'est pas facilement accessible aux plants étant donné sa forte adsorption par le sol. Effectivement, la variation de la teneur en eau est très faible passé 10 kPa, malgré une hausse de tension. La teneur en eau de $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ à la CC doit donc être retranché du $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (plateau) afin d'avoir un portrait plus juste de l'eau disponible aux plants ainsi que du volume de sol agissant comme un réservoir, ce qui laisse une teneur en eau d'environ $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Les deux courbes, soit la bleue pour le traitement non sous-solé et la rouge pour celui sous-solé, sont comparables. Toutefois, la valeur de teneur en eau pour le traitement sous-solé est respectivement de 0,4 et $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ plus élevée à 2,5 et 5 kPa que les valeurs aux mêmes points pour le traitement non sous-solé. Les échantillons ont été prélevés près de la zone compactée, mais un peu au-dessus de celle-ci. À titre informatif, les valeurs de teneur en eau à 1500 kPa sont respectivement de 7,5 et 9,0 kPa pour le traitement non sous-solé et sous-solé.

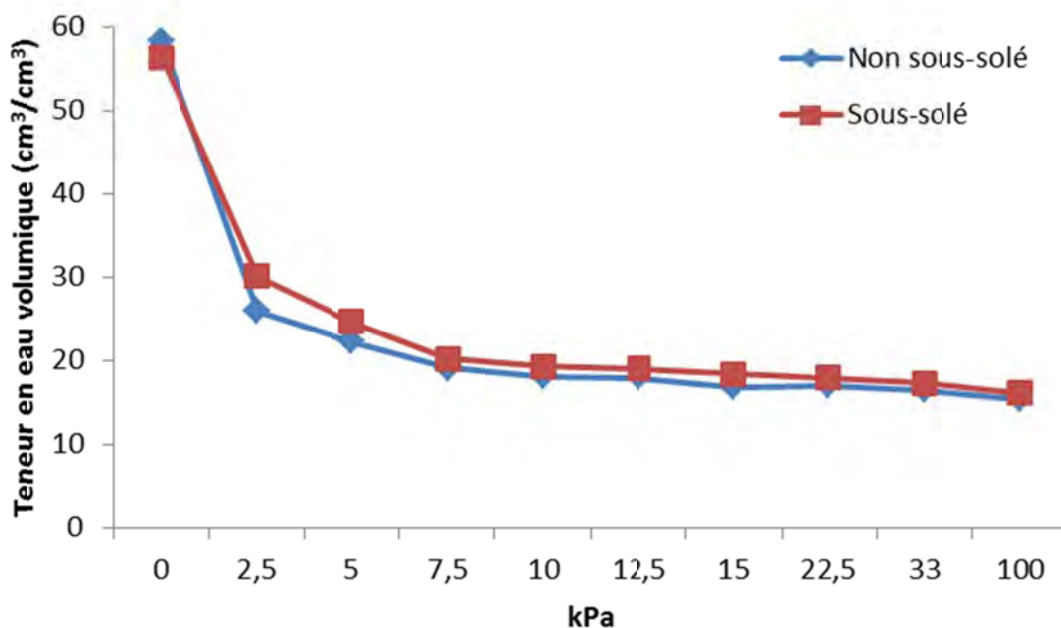


Figure 12. Courbes de désorption en eau selon le traitement (0 à 100 kPa).

3.1.1.5.2 Densité apparente du sol et stabilité des agrégats

La densité apparente du sol correspond au poids de ce dernier par unité de volume de sol sec (g/cm^3). Comme la densité apparente considère la porosité du sol et que la compaction du sol augmente la densité de ce dernier, cette mesure permet d'évaluer le niveau de compaction. Au gnificativement non différente (Tableau 5).

Tableau 5, les valeurs de densité apparente mesurée dans les huit parcelles sont présentées. Quoique ces résultats indiquent des valeurs élevées, aucune différence significative n'a été obtenue entre les moyennes des deux traitements. Toutefois, il est à noter que les valeurs dépassaient $1,3 \text{ g}/\text{cm}^3$ de sol. Cette valeur est considérée comme un seuil indicateur d'un problème de compaction du sol.

La distribution et la stabilité des agrégats du sol sont des indicateurs utiles pour évaluer la structure d'un sol. Ces deux paramètres déterminent la dimension et la persistance des pores envers les contraintes externes comme le compactage. Les résultats obtenus sont fidèles à ce que l'on peut s'attendre d'un sable grossier et en présence de cultures sarclées, soit peu d'agrégats. Cette situation implique un sol qui supporte mal le passage

de la machinerie conséquente aux opérations culturales. De plus, la moyenne pour les deux traitements est significativement non différente (Tableau 5).

Tableau 5. Densité apparente du sol dans la couche compactée et sous cette couche (g/cm^3) et diamètre moyen des particules de sol (DMP) en mm selon la parcelle et le traitement.

Parcelles	Densité apparente couche de sol compactée (g/cm^3)	Densité apparente du sol sous la strate compactée (g/cm^3)	Stabilité des agrégats DMP (mm)
1 - non SS	1,52	1,23	0,32
2 - SS	1,27	1,59	0,27
3 - non SS	1,39	1,51	0,15
4 - SS	1,48	1,52	0,26
5 - non SS	1,43	1,47	0,25
6 - SS	1,47	1,58	0,18
7 - non SS	1,42	1,59	0,23
8 - SS	1,44	1,58	0,21
Moyenne non SS	1,44	1,45	0,24
Moyenne SS	1,42	1,57	0,23

3.1.2 Évaluer l'impact financier de la compaction

3.1.2.1 Coût du sous-solage

Le coût retenu pour le sous-solage est celui présenté dans le AGDEX 740/825 (mars 2012) des Références économiques du CRAAQ. Dans ce document, les coûts fixes et variables associés à la machinerie (sous-soleuse à 3 dents) sont respectivement de 7,34 \$ et 56,60 \$/h. À cela s'ajoute, 29,59 \$/h en coûts fixes et réparation pour le tracteur. Ce document propose une capacité effective de 1,28 ha/h ce qui donne donc un coût total de 73,23 \$/ha.

3.1.2.2 Relier la problématique du dépérissement des plants et des baisses de rendements au degré de compaction du sol

Le poids en tubercules de cinq plants, le nombre de tubercules y correspondant, le poids moyen d'un tubercule et le poids en matière sèche des parties aériennes des plants dont les tubercules ont été récoltés sont présentés au Tableau 6. L'analyse statistique indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux traitements pour ces paramètres. De plus, aucun dépérissement des plants n'a été observé plus hâtivement dans les parcelles non sous-solées au cours de la saison. L'absence de différence entre le poids en matière sèche indique un développement des plants qui est comparable d'un traitement à l'autre.

Tableau 6. Poids total et nombre de tubercules récoltés, poids moyen d'un tubercule et poids en matière sèche des plants dont les tubercules ont été récoltés selon la parcelle.

Parcelles	Poids récolté 5 plants (g)	Poids récolté équivalent t/ha	Nb tubercules 5 plants	Poids moyen d'un tubercule (g)	Poids matière sèche 5 plants (g)
1 - non SS	7999	68,9	54	148,1	34,6
2 - SS	6744	58,1	46	146,6	39,6
3 - non SS	6066	52,2	42	144,4	34,8
4 - SS	7593	65,4	47	161,6	33,9
5 - non SS	5720	49,3	35	163,4	35,1
6 - SS	5561	47,9	34	163,5	29,3
7 - non SS	5902	50,8	38	155,3	30,1
8 - SS	7584	65,3	56	135,4	34,3
Moyenne non SS	6422	55,3	42	152,8	33,8
Moyenne SS	6870	59,2	46	151,8	34,3

3.1.2.3 Quantifier les pertes économiques conséquentes à la diminution des rendements en condition de sol compacté

La qualité des tubercules récoltés a été évaluée en leur attribuant un indice de gale et de rhizoctonie ainsi qu'en prenant leur poids spécifique. Au Tableau 7, ces critères sont présentés et l'analyse statistique n'indique pas de différence significative entre les moyennes obtenues pour les deux traitements en ce qui a trait aux maladies. Toutefois, le poids spécifique des tubercules récoltés dans les parcelles non sous-solées était significativement plus bas ($P < 0,05$) que celui des tubercules récoltés dans les parcelles sous-solées.

Tableau 7. Évaluation de la qualité des tubercules récoltés en termes d'indice de gale, d'indice de rhizoctonie et du poids spécifique.

Parcelles	Indice de gale	Indice de rhizoctonie	Poids spécifique
1 - non SS	2,519	0,781	1,0733
2 - SS	2,261	0,320	1,0764
3 - non SS	0,595	0,013	1,0737
4 - SS	0,787	0,119	1,0752
5 - non SS	0,971	0,583	1,0733
6 - SS	1,184	0,967	1,0744
7 - non SS	0,162	0,039	1,0763
8 - SS	0,571	0,000	1,0774
Moyenne non SS	1,062	0,354	1,0742 b
Moyenne SS	1,201	0,351	1,0758 a

4 CONCLUSION

La mesure de la conductivité électrique avec le VÉRIS 3100 n'a pas été efficace pour discriminer les zones du champ à l'étude qui ont été sous-solées de celles qui ne l'ont pas été à l'automne 2011. Par contre, l'utilisation d'un pénétromètre a été efficace pour mettre en relief les zones sous-solées et non sous-solées. En effet, les valeurs moyennes de résistance à la pénétration du sol dans la couche 15-45 cm avaient respectivement, 2381 et 2007 kPa pour les parcelles non sous-solées et sous-solées. De plus, cet appareil a permis d'apprécier quantitativement la résistance du sol à la pénétration. L'examen des valeurs obtenues révèle un sol avec une grande résistance à la pénétration, et ce, même en zones non sous-solées. De plus, la distribution et la variation des valeurs obtenues indiquent une grande hétérogénéité à l'intérieur du dispositif. Enfin, des corrélations n'ont pas permis de mettre en évidence une relation entre les valeurs de conductivité électrique apparente du sol et les valeurs de résistance du sol à la pénétration ($R^2 = 0,1088$).

Maintenant, un autre outil a été efficace pour identifier les parcelles sous-solées et non sous-solées, soit l'infiltromètre à charge constante de Côté. Les valeurs d'infiltration étaient significativement plus élevées ($P < 0,05$) dans les parcelles sous-solées comparativement à celles des parcelles non sous-solées, soit respectivement 3426 et 2319 cm³/h. D'autres mesures ont également été efficaces pour identifier des conditions de sol compacté. Des sondes de type TDR installées à une profondeur correspondant à la couche de sol compacté indiquaient des teneurs en eau volumique du sol plus élevée pour les parcelles sous-solées. Les valeurs de densité apparente du sol mesurées dans les parcelles n'ont pas permis d'identifier celles qui avaient été sous-solées. De plus, des valeurs moyennes de 1,42 et 1,44 g/cm³ ont respectivement été obtenues dans les parcelles non sous-solées et sous-solées. L'ordre de grandeur de ces valeurs est indicateur d'une problématique de compaction. Ces valeurs viennent renforcer le constat réalisé lors de l'étude des valeurs élevées de résistance à la pénétration obtenues avec le pénétromètre. Il en va de même avec les valeurs de stabilité des agrégats obtenues. Ces dernières, en plus d'être comparables entre les deux traitements, révèlent une mauvaise stabilité structurale. Ce sol résiste mal aux passages de la machinerie qui sont conséquents aux opérations culturales durant la saison et lors de la récolte.

En ce qui a trait au dépérissement des plants observés par le producteur les années antérieures, cette situation n'a pas été constatée en 2012. De plus, les rendements mesurés ne sont pas significativement différents. Le poids en tubercules pour 5 plants atteint en moyenne 6422 g dans les parcelles non sous-solées et 6870 g dans les parcelles sous-

solées. Le poids moyen par tubercule est respectivement de 152,8 et 151,8 g pour les parcelles non sous-solées et sous-solées. Enfin, le poids en matière sèche des plants de pommes de terre dont les tubercules ont été récoltés n'est pas significativement différent. Une différence de poids aurait pu indiquer un développement moins important ou un dépérissement plus hâtif des plants croissants dans les parcelles non sous-solées. L'incidence de la gale et de la rhizoctonie sur les tubercules est un autre paramètre qui était évalué. Aucune différence n'a été observée entre les deux traitements. Enfin, le poids spécifique des tubercules récoltés dans les parcelles non sous-solées était significativement inférieur ($P < 0,05$) à celui des tubercules récoltés dans les parcelles sous-solées, respectivement 1,0742 et 1,0758.

Le nombre d'épisodes de précipitations durant la saison 2012 était particulièrement faible. Si cette situation réduit les risques d'asphyxie des plants en condition de sol compacté, elle peut devenir très limitative pour la nutrition hydrique du plant. En effet, la faible profondeur d'enracinement a été compensée par une bonne régie d'irrigation. De plus, la superficie des parcelles non sous-solées était relativement faible par rapport à celle des superficies sous-solées. Ainsi, les zones compactées ont peut-être profité du sous-solage des parcelles sous-solées. Toutefois, les valeurs de résistance à la pénétration et celles ayant trait à la densité apparente du sol étaient élevées, que le sol ait été ou non sous-solé.

4.1 Diffusion des résultats

Une activité de discussion et d'information a été organisée dans le cadre de ce projet sur le lieu des essais. Lors de cette demi-journée, les propriétaires de l'entreprise agricole, messieurs Victorin et Norbert Drolet, des intervenants du MAPAQ, de l'IRDA, d'AAC ont partagé avec les participants les résultats préliminaires et présenté les différents outils de diagnostics utilisés dans ce projet.



Figure 13. Monsieur Daniel Bergeron (MAPAQ) expliquant l'impact de la compaction sur la profondeur d'enracinement des plants de pommes de terre.



Figure 14. Madame Athyna Cambouris (AAC) expliquant le fonctionnement du VÉRIS.



Figure 15. Monsieur Carl Boivin (IRDA) présentant le pénétromètre et l'infiltromètre à charge constante de Côté.



Figure 16. Monsieur Louis Robert (MAPAQ) qui s'affaire à expliquer aux participants comment faire un profil de sol et ce que celui-ci révèle pour le site à l'essai.



Figure 17. Monsieur Vincent Lamarre (MAPAQ) qui discute du sous-solage.

5 REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme d'appui à l'innovation en 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.

Les auteurs tiennent également à remercier monsieur Louis Robert (MAPAQ) pour la réalisation du profil de sol lors de l'activité de discussion et d'information du 11 octobre 2012.

6 BIBLIOGRAPHIE

Allison, L.E. 1965. Organic Carbon. Dans: C.A. Black et al. (ed.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph no. 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, p. 1367-1378.

Banton, O., D. Côté et M. Trudelle. 1991. Détermination au champ de la conductivité hydraulique saturée à l'aide de l'infiltromètre à charge constante de Côté. Can. J. Soil Sci. 71 : 119-126.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Méthode PH-1. Détermination du pH à l'eau. Agdex 533. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Québec, QC.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Mars 2012. Machinerie – Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés. AGDEX 740/825. 25 p.

Gee, G.W. et J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. Dans: A. Klute (ed) Methods of soil analysis. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI.

Hatley, D., J. Wiltshire, B. Basford et S. Royale. 2005. Soil compaction and potato crops. Research review. PJSOC. 57 pp.

Littell, R.C., G.A. Milliken, W.W. Stroup, R.D. Wolfinger et O. Schabenberger. 2006. SAS System for Mixed Models, second edition. Cary, NC : SAS Institute inc.

McGill, W.B. et C.T. Figueiredo. 1993. Total nitrogen. p. 201-211. Dans: M.R. Carter (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

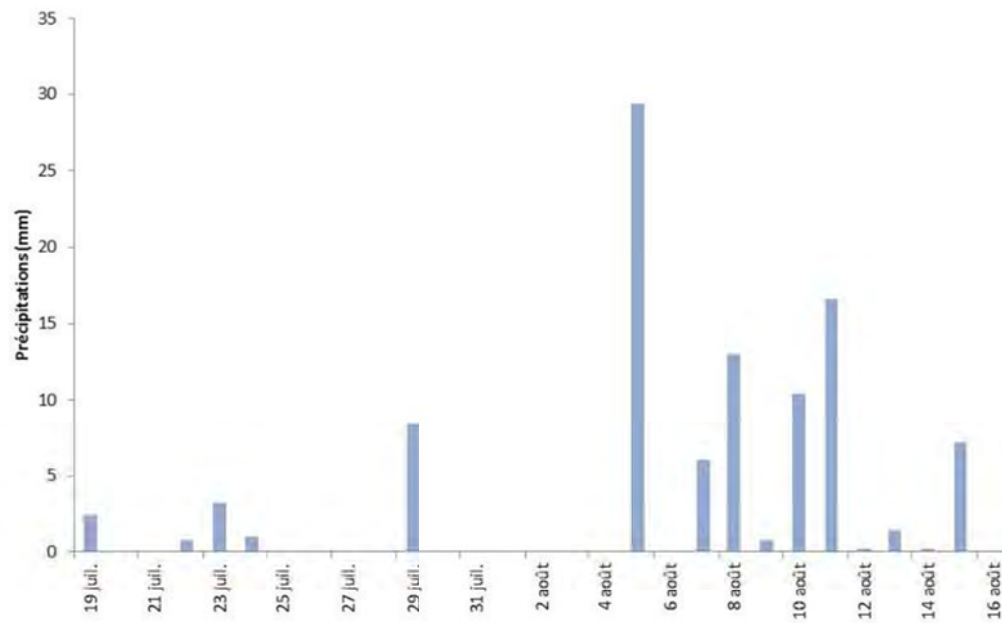
Stalham, M.A., E.J., Allen, A.B., Rosenfeld et F.X., Henry. 2007. Effects of soil compaction in potato (*Solanum tuberosum*) crops. Journal of Agricultural Science. 145, 295-312.

Topp, G.C., Y.T. Galganov, B.C. Ball, et M.R. Carter. 1993. Soil water desorption curves. p. 569-580. Dans: M.R. Carter (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

Tran, T. et R.R, Simard. 1993. Mehlich III-extractable nutrients. p. 43-50 Dans : M.R. Carter (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, London, UK.

7 ANNEXE

7.1 Pluviométrie



7.2 Rapport produit par Perron, Cambouris et Deschênes, novembre 2012.



COMPARAISON DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE APPARENTE (CE_a) MESURÉE AVEC LE VERIS 3100 DE PARCELLES NON SOUS-SOLÉES (NON SS) ET SOUS-SOLÉES (SS).



Novembre 2012

**Isabelle Perron,
Athyna Cambouris,
Mario Deschênes**

**Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision, AAC
979, avenue de Bourgogne #140, Québec (Québec) G1W 2L4**

Introduction

La mesure de la conductivité électrique apparente est un intégrateur de plusieurs propriétés physico-chimiques des sols (Corwin et Lesch 2003). Par exemple, des auteurs ont trouvé des corrélations avec la salinité salinity (Lesch et al. 1995), la teneur en eau des sols, la texture (Williams et Hoey 1987), la profondeur au substratum et les rendements (Cambouris et al. 2006) la matière organique (Banton et al. 1997) ainsi que la topographie (Fridgen et al. 2000). Plus récemment, Rácz et Szüle (2009) ont mis en évidence l'utilisation du VERSI 3100 pour évaluer la décompaction du sol.

Question de recherche

Existe-il une différence de la CEa pour une parcelle non SS versus une parcelle SS?

Conditions d'acquisition des données de la CEa

L'acquisition des données de la CEa issues du VERIS 3100 a été effectuée le 9 octobre 2012 après la récolte sur un champ en production commercial de 21 ha de pomme de terre. Les conditions d'humidité du champ étaient optimales car l'acquisition a eu lieu 48 heures après une précipitation de 13,3 mm de pluie. Par contre les conditions de terrain en creux et bosses dues au passage de la récolteuse de la pomme de terre ont pu influencer la qualité des données.

Résultats

Les statistiques descriptives des données brutes de conductivité électrique apparente (CEa) mesurés sur la parcelle Norbert Drolet sont présentées au Tableau 1. La densité d'échantillonnage mesurée par l'appareil VERIS 3100 est très élevée. Celles-ci sont différentes, bien que l'appareil prenne les mesures de façon simultanées puisque des données erronées ont été enregistrées par l'appareil et que celles-ci ont été retirées du jeu de données. L'acquisition de données erronées est probablement due aux conditions de terrain en creux et bosses qui s'en suivent après une récolte de pomme de terre. Quarante-huit heures avant le passage du VERIS une précipitation de 13,3 mm a été enregistrée le samedi 6 octobre favorisant les conditions d'acquisitions de données de VERIS dans ce type de sol (sableux).

Tableau 1. Statistiques descriptives des données brutes de conductivité électrique apparente (CEa) mesurés sur la parcelle Norbert Drolet.

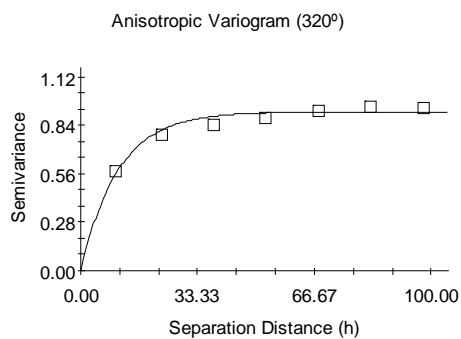
	n	Données ha ⁻¹	Minimum mS m ⁻¹	Maximum mS m ⁻¹	Moyenne mS m ⁻¹	Écart-type mS m ⁻¹	CV %
CEa 0-30 cm	12 490	595	0.2	8.3	2.87	1.02	35.5
CEa 0-100 cm	11 710	557	0.6	7.2	1.98	0.71	35.8

Les résultats de l'analyse variographique sont présentés au Tableau 2 et les deux modèles sont illustrés à la Figure 1.

Tableau 2. Paramètres géostatistiques de l'analyse variographique des données brutes de conductivité électrique apparente (CEa) mesurés sur la parcelle Norbert Drolet.

	Modèle	Direction	Pépite (C ₀)	Plateau (C ₀ +C)	Portée (A ₀) mineure	Portée (A ₀) majeure
CEa 0-30 cm	Exponentielle	Anisotropique	0	0.92	10.0	32.0
CEa 0-100 cm	Exponentielle	Anisotropique	0	0.47	10.8	32.3

a)



b)

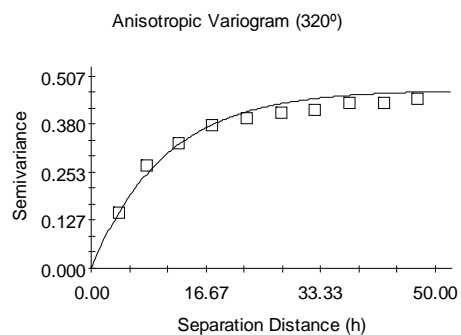


Figure 1. Semivariogrammes a) CEa 0-30 cm et b) CEa 0-100 cm.

Suite à l'analyse variographique l'interpolation par krigeage a permis d'obtenir les cartes matricielles de la CEa des sols pour la parcelle à l'étude (Figure 2 a et b). L'analyse de validation croisée révèle une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0.4 pour la carte de CEa 0-30 cm et de 0.5 pour la carte de CEa 0-100 cm, ces valeurs indiquent que les valeurs estimées par les modèles de prédiction sont précises.

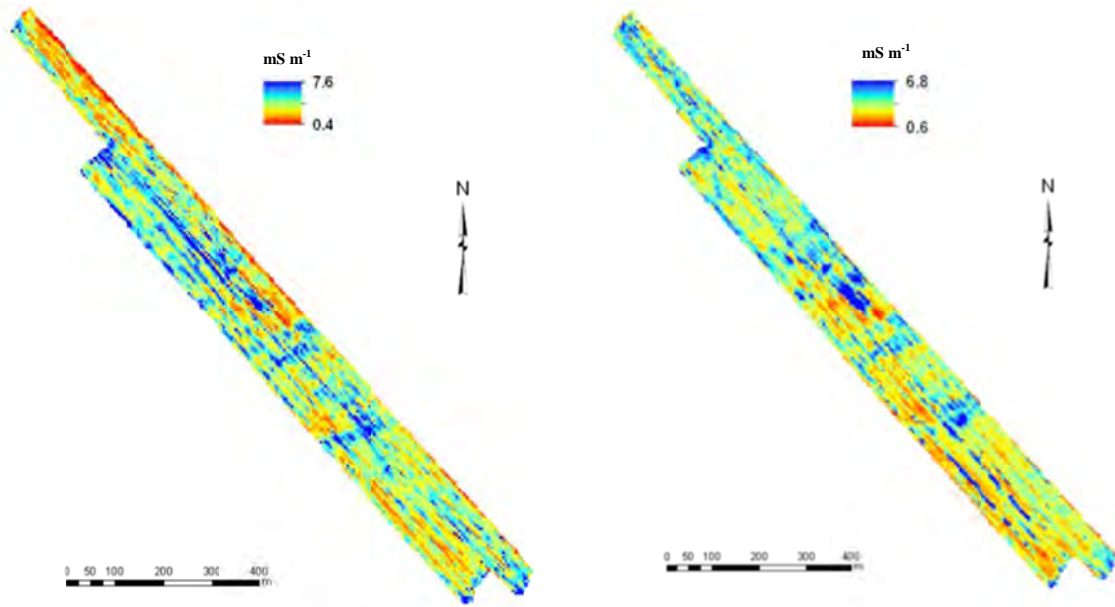


Figure 2. a) Conductivité électrique apparence (CEa) en surface (0-30 cm) b) CEa en profondeur (0-100 cm)

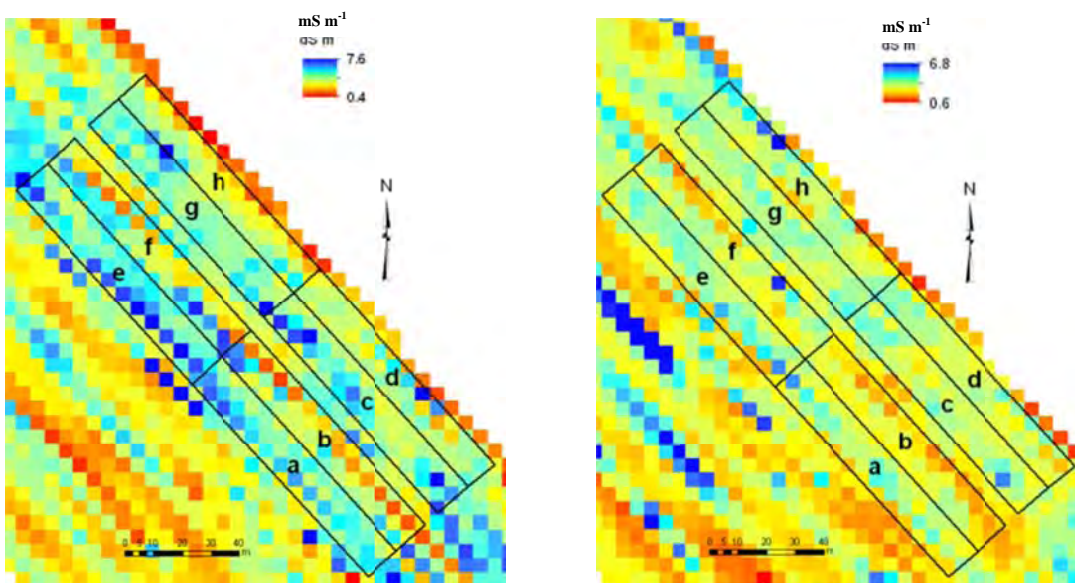


Figure 3. a) Conductivité électrique apparence (CEa) en surface (0-30 cm) b) CEa en profondeur (0-100 cm) de la zone du dispositif expérimental.

Une analyse statistique des données ponctuelles de la CEa de chacune des parcelles a ensuite été réalisée afin de déterminer si le sous-solage a influencé les valeurs mesurées de CEa. Les résultats sont présentés aux tableaux 3 et 4.

Tableau 3. Statistiques descriptives des données de CEa 0-30 cm mesuré dans chacune des parcelles à l'étude.

		CEa 0-30 cm					
		n	Minimum mS m ⁻¹	Maximum mS m ⁻¹	Moyenne mS m ⁻¹	Écart-type mS m ⁻¹	CV %
Parcelle A	non SS	80	1.8	4.8	3.2	0.7	20.9
Parcelle B	SS	94	0.6	5.1	2.6	0.9	32.4
Parcelle C	non SS	71	1.8	5.6	3.1	0.7	23.7
Parcelle D	SS	76	1.6	4.9	2.9	0.6	22.1
Parcelle E	SS	90	1.8	5.3	3.3	0.7	21.8
Parcelle F	non SS	86	1.1	5.1	2.8	0.9	32.4
Parcelle G	SS	63	2.1	4.0	3.1	0.4	12.1
Parcelle H	non SS	86	1.8	4.7	2.7	0.5	18.1

Tableau 4. Statistiques descriptives des données de CEa 0-100 cm mesurés dans chacune des parcelles à l'étude.

		CEa 0-100 cm					
		n	Minimum mS m ⁻¹	Maximum mS m ⁻¹	Moyenne mS m ⁻¹	Écart-type mS m ⁻¹	CV %
Parcelle A	non SS	78	1.2	2.9	1.8	0.4	22.2
Parcelle B	SS	88	0.4	2.4	1.5	0.3	19.5
Parcelle C	non SS	70	1.4	3.2	1.9	0.3	15.7
Parcelle D	SS	76	1.2	2.6	1.8	0.2	13.3
Parcelle E	SS	88	1.2	3.1	1.9	0.4	18.4
Parcelle F	non SS	80	0.8	4.0	1.7	0.5	26.3
Parcelle G	SS	63	1.5	2.3	1.9	0.2	9.4
Parcelle H	non SS	86	1.2	3.6	1.9	0.4	22.9

Les figures 4 et 5 illustrent les valeurs moyennes des mesures de CEa des parcelles SS et non SS. Dans ce projet de recherche, l'analyse des résultats n'a pas révélé de correspondance entre les valeurs mesurées de CEa et les méthodes de travail du sol. Contrairement à ce qui a été rapporté par Rácz et Szüle (2009), les différences entre les parcelles non sous-solées et sous-solées ne sont pas plus grandes pour les mesures de CEa de surface (Figure 4) que pour les mesures acquises en profondeurs (Figure 5).

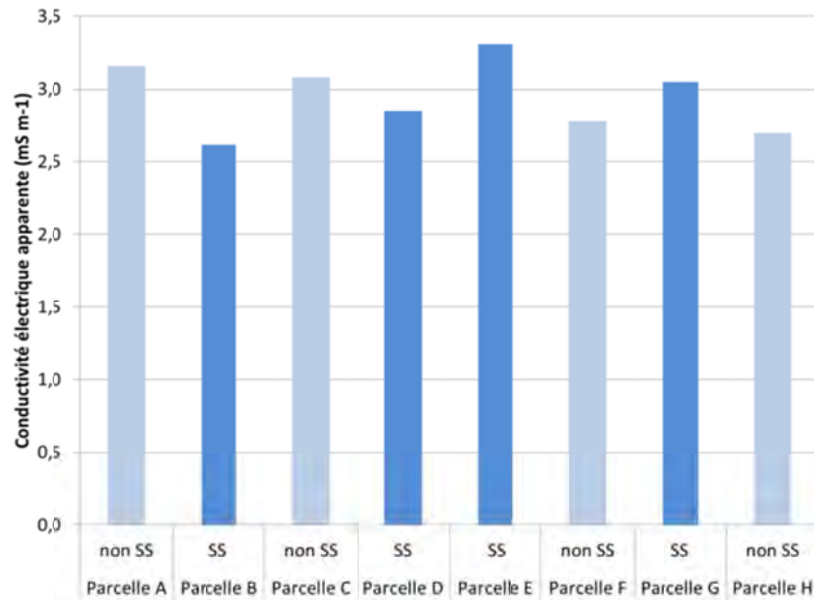


Figure 4. Comparaison des valeurs moyennes de conductivité électrique apparente de surfaces (0-30 cm) des parcelles non sous-solées vs sous-solées.

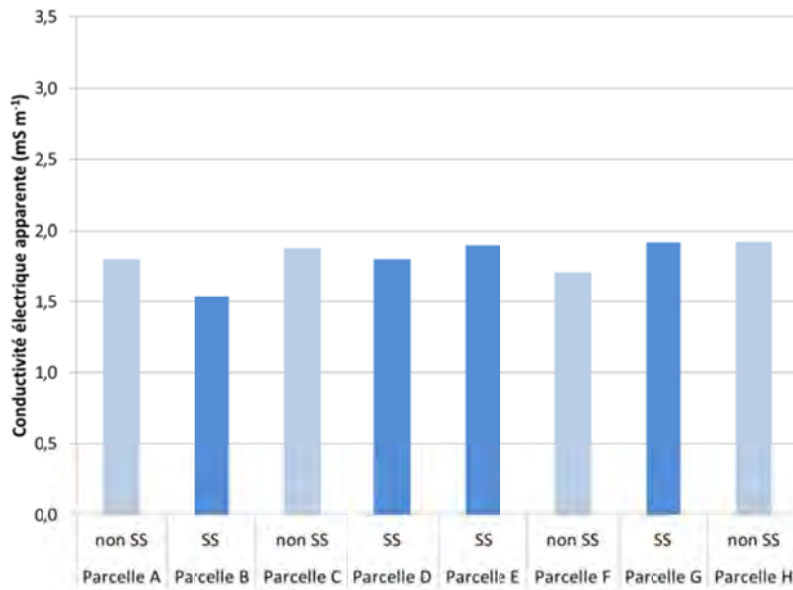


Figure 5. Comparaison des valeurs moyennes de conductivité électrique apparente de surfaces (0-100 cm) des parcelles non sous-solées vs sous-solées.

Références

- Banton, O, M.-K. Seguin et M.-A. Cimon. 1997. Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 61: 1010-1017.
- Corwin, D.L. et S.M. Lesch. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles and guidelines. *Agron. J.*, 95: 455-471.
- Cambouris, A.N., M.C. Nolin, B.J. Zebarth et M.C. Laverdière. 2006. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties. *Amer. J. Potato Res.*, 83: 5 (2006): 381-395.
- Fridgen, J.J., N.R. Kitchen et K.A. Sudduth. 2000. Variability of soil and landscape attributes within sub-field management zones. [CD-ROM computer file]. In: PC Robert et al. (Eds.), *Proc. 5th Intern. Conf. Prec. Ag.*, St-Paul, Minnesota.
- Lesch, S.M., D.J. Strauss et J.D. Rhoades. 1995. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: I. Statistical predictions models: a comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resour. Res.*, 31: 373-386.
- Rácz P. et Szüle Z. (2009) Relationship between the looseness of soil and the electric conductivity, *Res. Agr. Eng.*, 55 (2009): 136-140.
- Williams, B.G. et D. Hoey. 1987. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salts and clay contents of soils. *Aust. J. Soil. Res.*, 25: 21-27.

7.3 Rapport produit par Lamarre, mars 2013.

DIAGNOSTIC DES RISQUES DE COMPACTION DES SOLS

RAPPORT DE VISITE
de la Ferme Victorin Drolet inc.

présenté à
M. Norbert Drolet

Par
Vincent Lamarre, Ing

Mars 2013

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	3
2.	COMPRÉHENSION DU MANDAT	5
3.	PRÉSENTATION SOMMAIRE DE L'ENTREPRISE	7
4.	SOMMAIRE DES OPÉRATIONS MÉCANISÉES	9
5.	RISQUES OPÉRATIONNELS	11
6.	RECOMMANDATIONS	13
6.1.	LES MACHINERIES ET LEURS MODES D'UTILISATION	13
6.1.1	LES TRACTEURS	13
6.1.2	MOISSONNEUSE BATTEUSE	19
6.1.3	PULVÉRISATEUR À RAMPE.....	20
6.1.4	REMORQUES À POMMES DE TERRE	20
6.1.5	SOUS-SOLEUSE.....	21
6.2.	LES OPÉRATIONS CULTURALES.....	22
6.3.	LES CONDITIONS DE SOL LORS DES OPÉRATIONS CULTURALES	22
7.	CONCLUSION	23

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'un projet de recherche sur la compaction des sols en culture de pommes de terre, l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), ont développé un dispositif expérimental pour effectuer, sur la Ferme Victorin Drolet Inc., un diagnostic de la compaction et évaluer l'incidence des pratiques culturales sur celle-ci. Ce dispositif expérimental *in situ* a été utilisé pour effectuer le suivi du projet. Parallèlement, une appréciation des machineries utilisées, de leurs opérations et des pratiques culturales était nécessaire afin d'évaluer leurs impacts possibles sur le sol.

2. COMPRÉHENSION DU MANDAT

Dans le but de dresser un portrait complet de l'entreprise au regard de ses opérations culturales, il était nécessaire d'identifier et d'évaluer les machines utilisées. L'utilisation de tracteurs et de la machinerie agricole est essentielle pour accomplir les opérations culturales de l'entreprise. Donc, outre une saine gestion des sols et une bonne planification des opérations culturales, il est important de s'assurer que la machinerie utilisée minimise l'impact sur les sols.

Le MAPAQ et l'IRDA m'ont mandaté en juillet dernier pour effectuer une visite de l'entreprise et de son parc à machinerie et ce, en vue de faire des recommandations permettant d'augmenter sa performance technique.

3. PRÉSENTATION SOMMAIRE DE L'ENTREPRISE

La Ferme Victorin Drolet Inc. est une entreprise de production de pommes de terre d'une superficie totale de 250 hectares en culture, dont 80 hectares en rotation. La production de céréales de semence est faite comme culture de rotation. Généralement le plan de culture prévoit un an de production de pommes de terre, pour une année de céréales de semence. La majorité des sols de l'entreprise sont de la série Pont-Rouge. On retrouve également la série Morin dans la zone où le projet s'est effectué.

Présentement M. Norbert Drolet assure la relève de l'entreprise, ce dernier étant actionnaire majoritaire. Son père Victorin a régulièrement été impliqué dans des projets avec le milieu universitaire, dont un sur les bilans hydriques dans les cultures de pommes de terre en 1992, projet auquel j'ai participé comme professionnel de recherche. Vu son implication dans le présent projet, son fils Norbert semble avoir autant d'intérêt que son père pour la recherche appliquée.

4. SOMMAIRE DES OPÉRATIONS MÉCANISÉES

Après la culture de céréales de semence, un semis d'engrais vert est effectué avec un semoir Case 5100 modifié. L'ajout de disques sur la partie avant du châssis devant les unités de semis, permet d'effectuer un semis direct, sans travail du sol au préalable. La paille est préalablement récoltée avant d'effectuer le semis. En fin de saison, l'engrais vert est broyé au sol et enfoui avec un chisel ou une herse à disques.

Au printemps, un travail du sol est réalisé avec le passage d'un chisel muni de socs de type patte d'oie de 24 pouces de largeur, suivi d'un passage de vibroculteur pour finaliser le lit de semence. Le semis de pommes de terre suit le hersage.

L'application de l'engrais s'effectue en trois étapes. Une partie est appliquée au semis, une autre lors d'un sarclage et le reste lors du buttage des rangs. Le tracteur John Deere 7220 est utilisé pour effectuer ces opérations.

Pour la protection phytosanitaire, plusieurs passages sont nécessaires pour l'application des pesticides. En fin de saison de croissance, le passage d'un étauçon en forme de C avant le dernier passage du pulvérisateur, permet d'ameublir les entre-rangs et de faciliter l'infiltration de l'eau qui pourrait nuire à la conservation des pommes de terre postrécolte.

5. RISQUES OPÉRATIONNELS

Les risques opérationnels liés à la compaction des sols comportent trois éléments, et chacun d'eux peut avoir, selon la gestion qui en est faite, une incidence plus ou moins importante. Il s'agit des :

- machineries et de leur mode d'utilisation;
- opérations culturales;
- conditions de sol lors des opérations culturales.

L'entreprise a une certaine latitude dans l'évolution de ses pratiques visant à réduire la pression exercée sur les sols. Les recommandations de ce rapport porteront principalement sur les machineries et leur mode d'utilisation. Ce rapport a pour but d'identifier des pistes de solution et non de formuler des recommandations à être appliquées sans évaluations supplémentaires.

6. RECOMMANDATIONS

6.1. LES MACHINERIES ET LEURS MODES D'UTILISATION

6.1.1 LES TRACTEURS

OBSERVATIONS

Les tracteurs de l'entreprise sont utilisés pour les opérations culturales en lien avec la production de pommes de terre et des cultures de rotation. Ils sont utilisés l'hiver pour du déneigement à forfait. L'utilisation annuelle des tracteurs diversifie les activités économiques de l'entreprise, et permet de maintenir des emplois à l'année. Les critères de performance des pneus utilisés pour le déneigement ne sont pas les mêmes que pour les opérations culturales. Ainsi, l'utilisation d'un pneu à gomme souple offrant une bonne adhérence sur la glace et une bonne traction dans la neige est à privilégier pour le déneigement. Quant aux opérations culturales, l'utilisation d'un pneu offrant une surface de contact au sol maximale avec une bonne flexibilité dans les flancs et une pression de gonflage minimum est à privilégier. De plus, la culture de la pomme de terre exige des pneus étroits pour les opérations culturales. Les pneus présentement utilisés sur les tracteurs de l'entreprise, sont un compromis de performance pour les activités agricoles et non agricoles.

Ci-dessous, le tableau 1 qui décrit les caractéristiques des pneus dont étaient équipés les tracteurs de l'entreprise au moment de la visite en juillet 2012

		John Deere 7410	John Deere 7220	Deutz Agroton 118
Pneus	Éléments			
Avant	Fabricant	Good year	Firestone	Firestone
	Modèle	Super Tracking	All Traction	All Traction
	Dimension	14.9R30	380/85 R30	380/85 R30
	Indice de vitesse	A8	A8	A8
Arrière	Fabricant	Firestone	Firestone	Firestone
	Modèle	Radial 9000	All Traction	All Traction 23 ⁰
	Dimension	380/90 R46	420/80 R46	14.9 R46

		John Deere 7410	John Deere 7220	Deutz Agrotan 118
	Indice de vitesse	A8	A8	A8

	John Deere 7410	John Deere 7220	Deutz Agroton 118
Choix pour les opérations culturales <i>(Bon – Moyen – Élevé)</i>	Bon	Bon	Bon

Tableau 1 : Caractéristiques des pneus installés sur les tracteurs de l'entreprise

RECOMMANDATIONS

Pour minimiser la pression exercée au sol, l'entreprise pourrait choisir des pneumatiques radiaux à basse pression. Cependant, ces pneus sont moins adaptés aux opérations de déneigement. Pour les opérations de travail du sol, des pneus jumelés pourraient être installés sur le pont avant et le pont arrière du tracteur. L'utilisation de roues jumelées permet de réduire de près de 50% la pression de gonflage des pneus.

La culture en rangs oblige l'utilisation de pneus étroits. Le choix du pneu devrait privilégier un diamètre de jante maximal permis par le fabricant du tracteur. Des jantes de diamètre supérieur à 46 pouces augmentent l'empreinte du pneu au sol. De plus, une hauteur de flanc correspondant à un minimum de 70% de la largeur de la semelle, maximisera le volume d'air du pneu et réduira sa pression de gonflage. Avec un ratio minimum de 80 (réf. Tableau 1, caractères en gras), l'entreprise maximise déjà les volumes d'air des pneus utilisés sur ses tracteurs.

Avant même de penser à remplacer des pneus de tracteurs, il faut techniquement s'assurer du parfait équilibrage du tracteur et de l'ajustement de la pression des pneus en fonction de la charge. L'attelage d'un tracteur au pulvérisateur ou au semoir à pommes de terre, exige l'équilibrage des charges pour optimiser l'efficacité de traction et réduire le glissement des pneus. On doit viser un ratio de 40 à 45% pour le pont avant et 55 à 60% pour le pont arrière.

L'évaluation du report de charge d'un bloc frontal est faite avec la formule suivante :

$$\left(\frac{\text{Distance du centre de l'essieu avant au centre de masse du bloc frontal (m)}^{\text{Figure 1}}}{\text{Empattement (m)}^{\text{Figure 2}}} \right) \times 100$$



Figure 1 :

Mesure du centre de l'essieu avant au centre de masse du bloc frontal



Figure 2 :

Mesure de l'empatement

Si le ratio obtenu est de 40%, un bloc frontal de 800 kg aura un report de charge de 320 kg provenant de l'essieu arrière. Dans le cas où le pont avant est trop léger, l'ajout de lest frontal est nécessaire. Une fois l'équilibrage des charges effectué, le réglage de la pression des pneus tiendra compte de la charge par essieu en opération et de la vitesse maximale de déplacement à la charge maximale. La charte technique fournie par le fabricant du pneu permet l'ajustement de la pression de gonflage.

Éviter tout lestage liquide dans les pneus car cela a pour effet de limiter la flexion du pneu radial dans ses flancs. Privilégier plutôt le lestage solide tel que des segments de roue, bloc frontal ou arrière.

6.1.2 MOISSONNEUSE BATTEUSE

OBSERVATION

La moissonneuse batteuse de l'entreprise est équipée de pneus en biais 30.5L-32 sur son pont avant. Un changement pour des pneus de type radial, améliorerait grandement l'impact sur le sol par une augmentation de la surface de contact d'environ 20% par rapport aux pneus actuellement utilisés. De plus, la pression au sol de pneus de type radial est plus uniforme que celle de pneus de type biais.

RECOMMANDATION

Le tableau 2 compare un pneu de type biais au pneu de type radial pour une charge de 10 000 livres (20 000 livres sur l'essieu). L'utilisation d'un pneu radial tel que le MEGAXBIB en remplacement d'un pneu biais, permet de réduire de 4 psi la pression de gonflage et donc, de réduire l'impact sur le sol. Le pneu CEREXBIB offre à peu près les mêmes performances mais avec une capacité de charge de 18 000 livres. Ce tableau présente deux exemples concrets. Cependant, plusieurs autres modèles de pneus de différents fabricants peuvent offrir les mêmes performances.

PNEU	BKT	MICHELIN	MICHELIN
Modèle	TR-137 Biais	MEGAXBIB Radial	CEREXBIB Radial
Dimensions	30.5L-32 12 plis	800/65 R32	800/65 R32
Cote vitesse (km/h)	30	40	40
Pression (psi)	20	16	17 à 18 000lbs

Tableau 2 : Exemples de pneus à carcasse radiale en remplacement d'un pneu de type biais pour une moissonneuse batteuse avec une charge sur l'essieu de 20 000 livres.

Il est important d'évaluer la charge totale imposée sur le pont avant de la moissonneuse batteuse, incluant le tablier de récolte, et d'ajuster la pression des pneus en conséquence.

6.1.3 PULVÉRISATEUR À RAMPE

OBSERVATION

Le pulvérisateur est une machine régulièrement utilisée en production de pommes de terre. Le modèle utilisé par l'entreprise possède un essieu de type tandem à 4 roues, avec des pneus de type Implement 11.25L, et une rampe de 62 pieds de largeur. Bien que quatre roues supportent le pulvérisateur, ces dernières, de petites dimensions, procurent peu de surface de contact au sol.

RECOMMANDATION

La tendance est le remplacement d'essieu tandem par un essieu simple muni de roues à grand diamètre de jante. Les quatre pneus de type Implement sont alors remplacés par deux pneus radiaux dont le diamètre de jante est d'au minimum 38 pouces. L'empreinte par pneu au sol est plus grande et la résistance au roulement est réduite. Le tableau 3 compare le pneu de type Implement en configuration tandem à des pneus radiaux installés sur un essieu simple.

PNEU	GoodYear	MICHELIN	MICHELIN
Modèle	Biais Implement	AGRIBIB RC	AGRIBIB
Dimensions	11.25L-24	320/85 R38	12.4 R38
Configuration	Tandem 4 roues	Simple	Simple
Vitesse (km/h)	25	25 Cyc	10
Pression (psi)	30	17	20

Tableau 3 : Exemples de pneus à carcasse radiale en remplacement d'un pneu de type biais pour un pulvérisateur remorqué pour une charge de 8 000 livres.

6.1.4 REMORQUES À POMMES DE TERRE

OBSERVATION

Les remorques utilisées par l'entreprise sont équipées en majorité de pneus de type Implement 11L-15. Ces pneus de petites dimensions, requièrent généralement une pression de 40 psi et plus pour supporter sa charge maximale.

RECOMMANDATION

Lors du remplacement d'une remorque, l'entreprise devrait privilégier des pneus biais à basse pression, du même type de ceux que l'on retrouve sur les épandeurs à lisier. Le pneu Alliance 328 en est un exemple. Le pneu radial, de par ses qualités à répartir la charge uniformément au sol, serait un choix encore plus approprié. Cependant, on le retrouve principalement sur les remorques de fabricants européens. Il est pour l'instant difficile d'obtenir cette option au Québec par manque de disponibilité et d'intérêt des fabricants. L'utilisation de pneus radiaux sur les remorques est beaucoup plus répandue en Europe qu'au Québec.

6.1.5 SOUS-SOLEUSE

OBSERVATION

Pour effectuer ses opérations de sous-solage, l'entreprise utilise un chisel de la compagnie Glencoe, adapté avec des pattes de sous-solage à son extrémité arrière. Cette adaptation mécanique permet de briser les zones de compaction qui se situent à faible profondeur. Cette configuration ne permet pas un transfert de poids sur l'essieu arrière du tracteur, et d'assurer la stabilité de la profondeur de travail. Malgré tout, l'outil offre des performances intéressantes pour les conditions d'opérations actuelles.

RECOMMANDATION

Si les zones de compaction migrent en profondeur, l'entreprise devra opter pour une sous-soleuse portée qui est dédiée à des efforts de tirage importants et à un meilleur contrôle de profondeur. Le chisel modifié par l'entreprise ne sera pas suffisamment robuste pour des efforts de tirage lourds. Les opérations de sous-solage devraient être précédées d'un diagnostic complet permettant d'identifier la zone de compaction et l'étendue des zones à travailler dans un champ.

6.2. LES OPÉRATIONS CULTURALES

RECOMMANDATIONS

La gestion des opérations culturales devrait se faire dans un concept de gestion intégrée des sols, où une opération doit être considérée comme étant une intervention pouvant influencer le sol pour plusieurs années. Ainsi le travail du sol, l'aménagement des terres, la fertilisation, les rotations et le choix des cultures doivent être intégrés ensemble comme stratégie de développement durable.

Pour minimiser les risques de compaction des sols, une gestion des passages (control trafic) par l'utilisation de système de géopositionnement RTK, permettrait de cibler des zones de passage préférentielles de la machinerie. Pour des opérations avec des fréquences de passage élevées telles que la pulvérisation de pesticides, le guidage RTK limiterait les zones de compaction et permettrait de cibler facilement les passages de sous-soleuse si nécessaire.

6.3. LES CONDITIONS DE SOL LORS DES OPÉRATIONS CULTURALES

RECOMMANDATIONS

La culture de pommes de terre implique des passages répétés de la machinerie dans les champs et ce, dans des conditions de sol pas toujours appropriées. L'amélioration de la performance technique au niveau du choix et de l'utilisation des pneumatiques et la gestion des passages par guidage GPS, permettront de limiter les impacts lors des opérations culturales.

7. CONCLUSION

L'entreprise ne devrait pas faire de changements drastiques au niveau de sa machinerie agricole. En premier lieu, il est nécessaire d'augmenter la performance technique par les actions suivantes :

- **Équilibrer** les charges sur les tracteurs et ajuster la pression des pneus en conséquence;
- **Vérifier** régulièrement la pression des pneus;
- **Appliquer** le concept de gestion intégrée des sols;
- **Porter** une attention particulière aux conditions d'humidité du sol pour la réalisation des opérations mécanisées.

En second lieu, lorsque l'entreprise fera l'acquisition de machines ou d'équipements agricoles, elle pourra considérer les éléments suivants :

- **Porter** une attention particulière au choix d'un pneu minimisant la pression au sol lors de l'achat d'un nouveau tracteur, ou lors du remplacement de pneus sur sa machinerie agricole;
- **Implanter** le concept de gestion du trafic et de zones de passage préférentielles de la machinerie par guidage GPS-RTK;
- **Privilégier** les étançons droits de type minimum till lors de l'achat d'une sous-soleuse.

La réduction de l'impact des opérations culturales sur les sols est un travail de tous les jours qui requiert l'élaboration d'une stratégie tant technique qu'agronomique. L'ouverture de l'entreprise à la réalisation de ce diagnostic est déjà un point de départ important à l'optimisation des pratiques culturales.