

RAPPORT FINAL

Effets bénéfiques combinés du sous-solage et des cultures à racines profondes pour décompacter le sol et améliorer la productivité des cultures

6309

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

Décembre 2012

Marc-Olivier Gasser, Chercheur et chargé de projet



Liste des chercheurs impliqués :

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph.D.

Chercheur, IRDA

Responsables de l'institution de recherche :

Dr. Stéphane P. Lemay, ing., Ph.D.

Directeur scientifique, IRDA

M. Roch Joncas, ing., agr., M.Sc.

Directeur scientifique adjoint, IRDA

Équipe de réalisation :

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph.D.

Chercheur, IRDA

Marie-Hélène Perron, agr., M.Sc.

Professionnelle de recherche, IRDA

Michèle Grenier, M.Sc.

Biostatisticienne, IRDA

Caroline Dufour-L'Arrivée, agr., M.Sc.

Professionnelle de recherche, IRDA

Michel Lemieux

Technicien, IRDA

Audrey Ouellet

Étudiante d'été 2009, 2010, IRDA

Partenaires :

Louis Robert, agr.

Conseiller agricole, MAPAQ

Benoit Legault

Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec



L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée 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 des Parcs (MDDEFP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).

Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités d'acquisition de connaissances, de recherche, de développement et de transfert visant à favoriser le développement durable de l'agriculture.

Pour en savoir plus :

www.irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

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 financé dans le cadre du PASCAA d'AAC. Québec. 60 p. + annexes.

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | DESCRIPTION DU PROJET | 7 |
| 1.1 | Objectif général | 7 |
| 1.2 | Objectifs spécifiques | 8 |
| 1.3 | Activités réalisées | 9 |
| 1.4 | Activités réalisées (suite) | 10 |
| 2 | MATÉRIEL ET MÉTHODES | 11 |
| 2.1 | Site expérimental | 11 |
| 2.2 | Caractérisation du sol et du site | 11 |
| 2.2.1 | Propriétés physico-chimiques du sol | 11 |
| 2.2.2 | Conductivité électromagnétique | 12 |
| 2.2.3 | Teneur en eau volumique | 13 |
| 2.3 | Propriétés initiales du sol | 13 |
| 2.4 | Données climatiques | 15 |
| 2.5 | Sous-solage | 17 |
| 2.6 | Calendrier des opérations culturales | 17 |
| 2.7 | Paramètres expérimentaux suivis | 20 |
| 2.7.1 | Rendements | 21 |
| 2.7.2 | Profils racinaires | 21 |
| 2.7.3 | Masse volumique apparente et porosité | 22 |
| 2.7.4 | Résistance du sol au pénétromètre | 23 |
| 2.7.5 | Teneur en eau volumique | 24 |
| 2.7.6 | Propriétés chimiques des sols | 24 |
| 2.8 | Traitements statistiques | 24 |
| 3 | RÉSULTATS ET ANALYSE | 27 |
| 3.1 | Résultats obtenus et analyse | 27 |
| 3.1.1 | Rendements | 27 |
| 3.1.2 | Profils racinaires | 32 |
| 3.1.3 | Masse volumique apparente, porosité, teneurs en eau et en air du sol | 36 |
| 3.1.4 | Teneur en eau du sol suivie au TDR | 41 |
| 3.1.5 | Résistance à l'enfoncement | 42 |
| 3.1.6 | Propriétés chimiques du sol | 46 |
| 3.1.7 | Bilan économique | 48 |
| 3.2 | Discussion | 50 |
| 4 | CONCLUSIONS | 54 |
| 5 | Références | 56 |
| 6 | Remerciements | 58 |

| | | |
|-----|-------------------------------|----|
| 6.1 | Diffusion des résultats | 59 |
| 7 | Histoire d'une réussite..... | 60 |
| 8 | ANNEXES | 61 |

Liste des figures

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure 1 : | Dispositif expérimental en carré latin et en tiroir..... | 12 |
| Figure 2 : | Propriétés physiques initiales du sol en 2008..... | 15 |
| Figure 3 : | Répartition des précipitations durant les saisons de croissances de 2008 à 2011. | 16 |
| Figure 4 : | Sous-soleuse à trois dents tractée par un bulldozer (a) et bande sous-solée sur le dispositif expérimental (b)..... | 17 |
| Figure 5 : | Indice racinaire (N) basé sur le nombre et la grosseur des racines (adapté de Tardieu et Manichon, 1986). | 22 |
| Figure 6 : | Dimension des plantules de luzerne (a) et de radis huileux (b), le 4 novembre 2009..... | 29 |
| Figure 7 : | Profils de sol sous la culture de luzerne en 2010 dans la parcelle témoin (a) et sous l'effet du sous-solage (b) et du drain agricole (c)..... | 32 |
| Figure 8 : | Profils de sol après la culture de maïs en 2011 dans la parcelle témoin (a) et sous l'effet du sous-solage (b) et du drain agricole (c). | 33 |
| Figure 9 : | Le grillage placé perpendiculairement à la surface des racines pour lire les indices de densité racinaire.. | 33 |
| Figure 10 : | Profils des densités racinaires de maïs relevés le 11 novembre 2011 sur les parcelles témoin TE (a), sous-solées SS (b) et sur le drain agricole DR (c). | 34 |
| Figure 11 : | Masse volumique apparente, porosité totale, et teneur en air en 2009 (a), 2010 (b) et 2011 (c) en fonction de la profondeur et des traitements du sol..... | 37 |
| Figure 12 : | Masse volumique apparente, porosité totale et teneur en air du sol en 2009 (a), 2010 (b) et 2011 (c) (Teneur en air non disponible en 2011) en fonction de la profondeur du sol et des cultures/précédents culturaux. | 39 |
| Figure 13 : | Relation entre la teneur en air et la masse volumique apparente à différentes profondeurs dans le sol en 2009 (a) et en 2010 (b) selon les effets du sous-solage et de la présence d'un drain agricole. | 41 |
| Figure 14 : | Relation entre la teneur en air et la masse volumique apparente à différentes profondeurs dans le sol selon les différentes cultures et précédents culturaux en 2010. | 41 |
| Figure 15 : | Évolution de la teneur en eau du sol en 2010 (de 0-60 cm de profondeur) sous l'effet des cultures/précédents culturaux (a) et sous l'effet du sous-solage (SS) combiné à la luzerne (LU) par rapport à la culture de soya (SO) (b)..... | 42 |
| Figure 16 : | Profil de résistance à la pénétration ou indice n en fonction de la profondeur d'enfoncement du cône et des traitements sur le sol (témoin, présence de drain agricole ou sous-solage,) (a) ou des précédents culturaux (b) en 2009, 2010 et 2011..... | 43 |
| Figure 17 : | Profils latéraux de résistance à la pénétration dans le sol réalisés en 2011. Indice n cumulé en fonction de la profondeur et de la dent de sous-soleuse dans des parcelles sous-solées (a) ou de la distance du drain dans les parcelles drainées (b)..... | 45 |

| | |
|---|----|
| Figure 18: Relation entre la teneur en eau volumique et la résistance à l'enfoncement du cône exprimée en nombre de coups cumulés pour atteindre 60 cm de profondeur en 2009 (a), 2010 (b) et 2011 (c)..... | 46 |
| Figure 19 : Plan d'élévation du dispositif expérimental (a) et teneur en eau du sol de 0 à 20 cm de profondeur le 22 septembre 2008 (b)..... | 61 |
| Figure 20 : Conductivité électromagnétique mesurée avec le Versi 3100 de 0 à 30 (a) et de 0 à 100 cm de profondeur (b)..... | 62 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Propriétés physiques initiales du sol en 2008 | 13 |
| Tableau 2 : Granulométrie détaillée du sol..... | 14 |
| Tableau 3 : Propriétés chimiques initiales du sol en 2008..... | 14 |
| Tableau 4 : Précipitations mensuelles entre les mois de mai et novembre de 2008 à 2011..... | 15 |
| Tableau 5 : Rendements de l'orge en 2009, selon les traitements physiques apportés aux parcelles..... | 28 |
| Tableau 6 : Rendements moyens en biomasse de matière sèche de soya et de luzerne en 2010 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture. | 30 |
| Tableau 7 : Rendements moyens de maïs-grain (14,5% d'humidité relative) en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture..... | 31 |
| Tableau 8 : Densité racinaire moyenne sous l'effet des différents traitements sol et à quatre profondeurs | 35 |
| Tableau 9 : Effet du sous-solage et la présence du drain agricole sur la résistance à l'enfoncement en 2010 aux profondeurs de 300 à 450 mm et 450 à 600 mm. | 44 |
| Tableau 10 : Effet du sous-solage et la présence du drain agricole sur la résistance à l'enfoncement en 2011 aux profondeurs de 300 à 450 mm et 450 à 600 mm. | 44 |
| Tableau 11 : Coût des interventions de sous-solage (bulldozer à trois dents) et des cultures utilisées pour remédier à la compaction | 48 |
| Tableau 12 : Augmentation nécessaire de rendement de différentes cultures selon les prix du marché de 2012 pour rentabiliser les interventions de sous-solage ou les cultures de radis huileux ou de luzerne. | 49 |
| Tableau 13 : Teneur en eau sur base humide (14,5% d'humidité relative) du maïs-grain en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture. | 63 |
| Tableau 14 : Masse volumique apparente* des sols (moyenne du profil) en fonction des traitements (sol, culture) et des interactions entre les effets sol, culture et profondeur en 2009, 2010 et 2011. | 64 |
| Tableau 15 : Teneur en eau volumique* des sols (moyenne du profil) en fonction des traitements (sol, culture) et des interactions entre les effets sol, culture et profondeur en 2009 et 2010. | 65 |
| Tableau 16 : Teneur en air volumique* des sols (moyenne du profil) en fonction des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture en 2009 et 2010. | 66 |
| Tableau 17 : Teneur en eau volumique* de 0 à 60 cm de profondeur dans le sol (moyenne de 9 dates) en 2010 et effets des traitements (sol, culture) et des interactions sol x culture x date..... | 67 |
| Tableau 18 : Teneur en eau volumique* de 0 à 60 cm de profondeur dans le sol (moyenne de 2 dates) en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et des interactions sol x culture x date..... | 68 |

| | |
|---|----|
| Tableau 19 : Résistance à l'enfoncement* mesurée de 0 à 75 cm de profondeur dans le sol et effets des traitements (sol, culture) et des interactions sol x culture x profondeur en 2009, 2010 et 2011..... | 69 |
| Tableau 20 : Teneurs en matière organique et en azote dans le sol de 0 à 15 cm de profondeurs en 2010 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture. | 70 |
| Tableau 21 : pH à l'eau et teneurs en éléments extraits à la solution Mehlich-3 dans le sol de 0 à 15 cm de profondeur en 2010 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture. | 71 |
| Tableau 22 : Teneurs en matière organique et en azote dans le sol de 0 à 15 cm de profondeurs en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture. | 72 |
| Tableau 23 : pH à l'eau et teneurs en éléments extraits à la solution Mehlich-3 dans le sol de 0 à 15 cm de profondeur en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture. | 73 |

1 DESCRIPTION DU PROJET

Le passage répété de la machinerie et des équipements lourds, notamment les charrues, les tracteurs et les chargements de gros volumes tels les citernes à lisier et les boîtes à grain provoquent la compaction du profil de sol. Dans la plupart des sols agricoles, la compaction des horizons inférieurs a pour effet de réduire l'aération, le développement des racines et l'exploitation des réserves en eau et en nutriments dans le sol nuisant ainsi à la productivité des cultures. Déjà en 1990, l'inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec soulignait que plus de 100 000 ha de sols cultivés pour la plupart en monoculture souffraient de compaction, tandis que près de 430 000 ha de sols souffraient d'une détérioration de la structure. D'autres études ont démontré l'effet de la fréquence des cultures annuelles sur la compaction des sols (Michaud, 1995; Reynolds et al., 1995). Il est relativement fréquent de recommander le sous-solage des sols dont les horizons sous-jacents sont compacts (Negi et al., 1981). Par contre, les effets ne sont pas toujours prévisibles en termes de durée et dépendent des conditions climatiques qui prévalent. Certaines études ont démontré les effets bénéfiques des cultures pérennes comme les prairies et les luzernières pour augmenter la stabilité structurale et la perméabilité des sols (Raimbault et Vyn, 1991; Reynolds et al., 1995). Jusqu'à présent, les études sur la compaction ne permettent pas d'élaborer des recommandations sur les pratiques et les séquences culturales à adopter suite à des pratiques de sous-solage de façon à profiter des conditions d'amélioration de la perméabilité de la zone décompactée, de la structure du sol et de sa productivité. Du point de vue environnemental, peu d'études permettent de quantifier l'efficacité accrue des prélèvements d'engrais, la réduction des pertes d'intrants et des émissions de GES en lien avec l'amélioration de la productivité du sol par le sous-solage.

Le présent projet vise à développer une expertise de terrain sur les moyens à privilégier pour réduire les problèmes de compaction des sols qui surviennent de plus en plus avec l'augmentation de la fréquence des cultures annuelles, comme le maïs et le soya, combinée à l'intensité des opérations culturales et au trafic d'équipements lourds. Des solutions axées sur le choix des cultures à mettre en place à la suite des opérations de sous-solage sont explorées afin de bénéficier au maximum de ces opérations dans une perspective de développement durable.

Les résultats présentés dans le rapport suivant reposent sur la combinaison du sous-solage et de l'implantation de cultures à racines profondes dans la rotation afin d'améliorer le profil cultural, de développer la structure du sol et finalement d'augmenter la productivité du sol.

1.1 Objectif général

Le projet vise à évaluer les performances du sous-solage et des cultures à racines profondes pour améliorer la productivité des sols compactés et souffrant d'un mauvais drainage.

1.2 Objectifs spécifiques

De manière plus spécifique, le projet vise à :

- Évaluer les accroissements de rendements des cultures d'orge, de soya, de luzerne et de maïs résultant du sous-solage d'un sol souffrant de compaction en profondeur.
- Évaluer les effets bénéfiques additionnels résultant des cultures à racines profondes comme le radis huileux et la luzerne pour améliorer la structure et maintenir à plus long terme les effets du sous-solage.
- Installer un site de démonstration pour les producteurs afin de faciliter le transfert technologique sur les pratiques favorisant l'amélioration de la structure des sols.
- Développer une expertise de terrain sur les moyens à privilégier pour réduire les problèmes de compaction des sols résultant de la culture intensive et du trafic d'équipements lourds.

1.3 Activités réalisées

| Activités | Date prévue | Date réelle | Finalités | Notes |
|---|-------------------------|------------------------|--|--|
| Produire le protocole de recherche détaillé, planifier et installer le dispositif, sous-soler les parcelles, mesurer les conditions initiales | Août 2008 –Oct 2008 | Août 2008 –Oct 2008 | Planification du projet | |
| Travail de terrain, semis, entretien, récolte. Mesures des rendements et des propriétés physiques du sol | Avril 2009 –Nov 2009 | Avril 2009 –Nov 2009 | Évaluer l'effet du sous-solage sur les rendements de la culture d'orge en première année et les propriétés physiques | <i>Embauche d'une étudiante d'été au lieu d'un étudiant à la maîtrise</i> |
| Présentation des travaux lors de journées de démonstration | Juin 2010 – Juil 2011 | Août 2009 – sept 2009 | Installer un site de démonstration | |
| Analyse des résultats | Sept. 2009 - Avril 2010 | Sept. 2009 - juin 2010 | Produire le premier rapport d'étape | <i>Effet mitigé du sous-solage sur les rendements d'orge</i> |
| Travail de terrain, semis, entretien, récolte. Mesures des rendements et des propriétés physiques du sol | Avril 2010 –Nov 2010 | Avril 2010 –Nov 2010 | Évaluer l'effet du sous-solage et des cultures à racines profondes sur les rendements des cultures en deuxième année et les propriétés physiques | <i>Embauche d'une étudiante d'été au lieu d'un étudiant à la maîtrise</i> |
| Présentation des travaux lors de journées de démonstration | Juin 2010 – Juil 2011 | Août 2010 – sept 2011 | Présenter le site de démonstration | |
| Analyse des résultats | Sept. 2010 - Avril 2011 | Sept. 2010- juin 2011 | Produire le deuxième rapport d'étape | <i>Effet mitigé du sous-solage sur les rendements de soya et de luzerne. Nouveau passage de sous-soleuse prévu mais non réalisé en raison des mauvaises conditions météos en sept. 2010.</i> |

1.4 Activités réalisées (suite)

| Activités | Date prévue | Date réelle | Finalités | Notes |
|--|------------------------|-------------------------------|---|--|
| Travail de terrain, semis, entretien, récolte. Mesures des rendements et des propriétés physiques du sol | Avril 2011 –Nov 2011 | Avril 2011 –Nov 2011 | Évaluer l'effet du sous-solage et des cultures à racines profondes sur les rendements des cultures en troisième année et les propriétés physiques | |
| Analyse des résultats | Sept. 2011 – Juin 2012 | Sept. 2011 – Nov.2012 | Produire le rapport final | |
| Favoriser des réseaux d'échanges d'informations | Oct. 2008- Juil 2012 | Oct. 2008- Déc 2012 | Développer une expertise de terrain | <i>Développement de nouveaux projets sur la compaction des sols, travail en réseau à faire</i> |
| Présentation orales des résultats lors de colloques | Non prévu | Fév. et mars 2012; janv. 2013 | Présenter les résultats | |

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Site expérimental

Le dispositif expérimental, mis en place à l'automne 2008, est situé à la station expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon sur un loam limoneux de la série Lebras. Le champ sur lequel est situé le dispositif a été remodelé en planche arrondie (32 m x 140 m) à la fin des années soixante-dix et drainé artificiellement en 1991 avec des drains agricoles situés à 0,9 m sous la surface du sol et espacés d'environ 11 m. Le champ était en prairie depuis plus de 5 ans et avait reçu à plusieurs occasions des apports de lisier. La prairie était principalement composée de phléole avec de minces bandes de luzerne survivant sur les drains agricoles. Le sol a été diagnostiqué en 2008 comme souffrant d'un mauvais drainage et de compaction à plusieurs endroits sous la couche de labour entre 0,25 et 0,40 m de profondeur. La pente maximale du terrain est inférieure à 4% et la topographie du terrain est présentée à la Figure 4 de l'annexe A. L'expérience est réalisée sur un dispositif de 2745 m² divisé en 27 unités expérimentales tel que présenté à la Figure 1. Neuf parcelles principales de 9,15 m de large x 30 m de long sont disposées en carré latin (3 x 3) et subdivisées en trois sous-parcelles de 3,05 m de large x 30 m de long. Les 3 traitements en parcelles principales sont constitués de trois séquences culturales et les traitements en sous-parcelles sont constitués du sol non sous-solé (témoin), du sol sous-solé et du sol non sous-solé situé sur les drains agricoles. Tous les traitements sont répétés trois fois dans un dispositif en tiroir.

2.2 Caractérisation du sol et du site

Avant d'entreprendre les travaux de sous-solage en septembre 2008, le sol a été échantillonné et une sonde mesurant la conductivité électromagnétique (Veris 3100) a été passée à la surface du sol afin de caractériser les propriétés initiales du sol (Sudduth et al., 2003). Cette caractérisation devait permettre de comparer et d'expliquer les résultats obtenus après l'application des traitements et lors des analyses subséquentes.

2.2.1 Propriétés physico-chimiques du sol

Les propriétés physico-chimiques initiales (24 sept. 2008) ont été déterminées sur du sol prélevé avec des sondes de 38 mm de diamètre montées sur un échantillonneur de sol hydraulique (Giddings). Deux carottes de sol de 60 cm de longueur ont été prélevées par parcelle, à intervalle régulier (10 et 20 m) sur le sens de la longueur de la parcelle. Les carottes de sol ont été séparées en huit sections de 0-7,5 7,5-15 15-22,5 22,5-30 30-37,5 37,5-45 45-52,5 et 52,5-60 cm de profondeurs avant d'être réunies par profondeur pour former des échantillons composites. La masse volumique apparente, la teneur en eau volumique ainsi que les autres propriétés dérivées (porosité totale, teneur en air) ont été déterminées sur ces échantillons (Culley, 1993). Ces derniers ont été pesés humides. Un sous échantillon de sol a été pesé humide, séché à 105°C pendant 24

heures et pesé à nouveau afin de déterminer la teneur en eau et les propriétés physiques. Le sol restant a été séché à l'air libre avant l'analyse des propriétés chimiques.

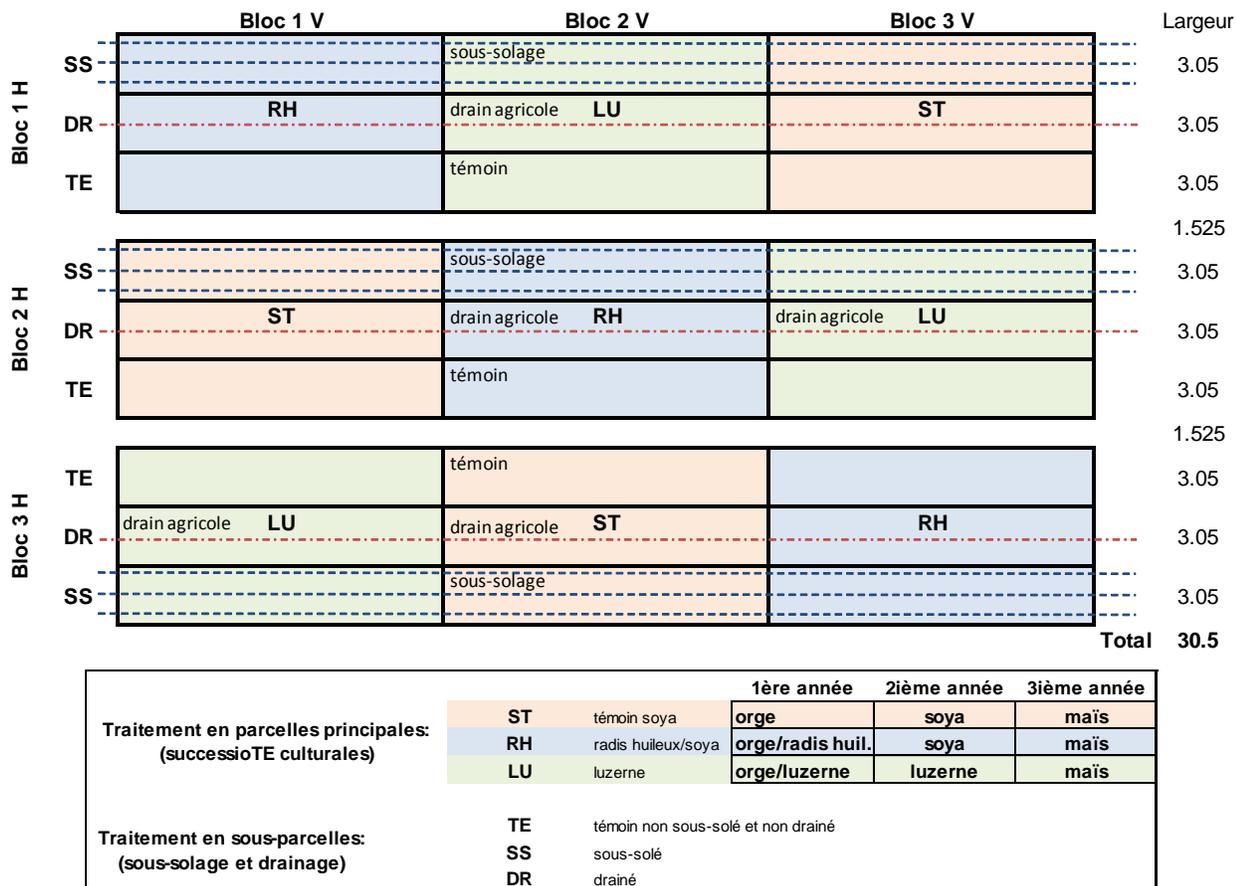


Figure 1 : Dispositif expérimental en carré latin et en tiroir

2.2.2 Conductivité électromagnétique

Des mesures de la conductivité électromagnétique (CE) du sol ont été réalisées le 21 septembre 2008 à 30 et 100 cm de profondeur dans le sol avec une sonde Veris 3100 tirée par une camionnette à quatre roues motrices (Sudduth et al., 2003). Les résultats ont été interpolés par techniques géostatistiques (production de semi-variogrammes et krigeage) et spatialisés à l'aide du module Geostatistical Analyst de ArcGIS (version 9.2) et sont présentés sous forme de carte à la Figure 20a et Figure 20b de l'Annexe A. La conductivité électromagnétique du terrain varie généralement selon les propriétés physicochimiques du sol comme la texture, la teneur en eau, la masse volumique apparente et la conductivité électrique. Ces propriétés sont généralement influencées par la position sur le terrain et les actions anthropiques, comme le drainage de surface, le nivellement et la présence d'anciens chemins de ferme. L'analyse des cartes présentées en Annexe (Figure 20) démontre une conductivité électromagnétique généralement plus élevée dans les zones plus basses du terrain, mais une zone de conductivité électromagnétique plus élevée semble également traverser le milieu du dispositif en profondeur dans le sol.

2.2.3 Teneur en eau volumique

La teneur en eau volumique du sol a été mesurée le 22 septembre 2008 avec un appareil TDR 300 FieldScout (Spectrum technologies, inc.) muni d'une sonde de 20 cm et le 23 septembre 2008 avec un appareil TDR Trase (Soil moisture equipment, inc.) muni d'une sonde de 50 cm, juste après le passage de la sonde de conductivité électromagnétique. Avant les traitements en 2008, les mesures de teneur en eau volumétrique de 0 à 20 cm de profondeur (Figure 19b en Annexe) semblent partiellement reliées aux mesures de conductivité électromagnétique (Figure 20 en Annexe), mais elles semblent davantage reliées à la position des drains agricoles et à l'élévation sur le terrain (Figure 19a).

2.3 Propriétés initiales du sol

Le Tableau 1 et le Tableau 2 présentent quelques propriétés physiques initiales par profondeur moyenne de 15 cm, tandis que le Tableau 3 présente quelques propriétés chimiques initiales du sol. Le sol est associé à la série Lebras développée sur un dépôt meuble de limon argileux d'origine fluviale et sa texture est relativement homogène sur sa profondeur. La classe texturale de l'ensemble des analyses granulométriques (72 observations) varie selon la teneur en limon entre le loam limoneux, le loam limono-argileux, le loam argileux et le loam. Toutefois, en moyenne par profondeur (Tableau 1), la classe texturale varie à la limite entre un loam argileux et un loam limoneux. La masse volumique apparente (MVA) du sol augmente de façon importante en profondeur dans le sol, tandis que la teneur en air, relevée au moment de l'échantillonnage du sol pour la MVA, diminue aussi de façon importante avec la profondeur.

Tableau 1 : Propriétés physiques initiales du sol en 2008

| Profondeur cm | Sable | Limon | Argile | MVA [†] | Teneur en eau volumique | Teneur en air volumique | TEV/Porosité [‡] |
|------------------|-------|-------|--------|------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | % | | | | cm ³ /cm ³ | | |
| 0-15 | 22,1 | 49,7 | 28,2 | 1,29 | 0,35 | 0,16 | 0,69 |
| 15-30 | 22,4 | 50,7 | 26,9 | 1,47 | 0,33 | 0,11 | 0,75 |
| 30-45 | 21,3 | 51,1 | 27,7 | 1,59 | 0,32 | 0,08 | 0,79 |
| 45-60 | 21,7 | 51,2 | 27,1 | 1,70 | 0,30 | 0,06 | 0,83 |

†MVA : masse volumique apparente

‡TEV : teneur en eau volumique

Le fractionnement des sables et des limons indiquent aussi une augmentation avec la profondeur des fractions de sable très fin et de limon grossier au détriment des sables fin à très grossier (Tableau 2). L'aspect massique du sol en profondeur et sa structure inexistante en lien avec sa masse volumique élevée et sa faible porosité pourraient s'expliquer par les teneurs plus élevées en sable très fin et limon grossier en profondeur.

Tableau 2 : Granulométrie détaillée du sol

| Profondeur cm | Sable très grossier. | Sable grossier. | Sable moyen | Sable fin | Sable très fin | Limon grossier. | Limon moyen | Limon fin | Argile | Matière organique |
|------------------|----------------------------|--------------------|----------------|--------------|-------------------|--------------------|----------------|--------------|--------|----------------------|
| | % | | | | | | | | | |
| 0-15 | 0,9 | 1,7 | 2,9 | 8,1 | 8,6 | 16,2 | 22,4 | 11,1 | 28,2 | 4,1 |
| 15-30 | 0,7 | 1,4 | 2,4 | 6,7 | 11,2 | 16,9 | 21,4 | 12,3 | 26,9 | 2,1 |
| 30-45 | 0,5 | 0,9 | 1,6 | 5,8 | 12,4 | 16,9 | 21,7 | 12,4 | 27,7 | 1,0 |
| 45-60 | 0,1 | 0,8 | 1,3 | 5,4 | 14,2 | 17,5 | 21,3 | 12,4 | 27,1 | 0,5 |

Le sol était faiblement pourvu en phosphore et en potassium extrait à la solution Mehlich-3 (Tableau 3). Le pH du sol était légèrement acide sur certaine partie du dispositif (voir Annexe C pour plus de détails). Ces informations ont justifié un apport de chaux et de lisier de porc en 2009 pour augmenter la fertilité du site et assurer une implantation convenable de la luzerne après la récolte de l'orge à la fin de l'été 2009.

Tableau 3 : Propriétés chimiques initiales du sol en 2008

| Profondeur cm | pH | pH SMP | P _{M3} | K _{M3} | Mg _{M3} | Al _{M3} | P _{M3} /Al _{M3} |
|------------------|-----|--------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------------------------|
| | | | mg/kg | | | | % |
| 0-15 | 6,1 | 6,5 | 20 | 49 | 140 | 1215 | 1,6 |
| 15-30 | 5,9 | 6,6 | 18 | 32 | 130 | 1240 | 1,5 |
| 30-45 | 5,9 | 6,8 | 17 | 42 | 276 | 1013 | 1,6 |
| 45-60 | 6,1 | 7,0 | 10 | 52 | 379 | 767 | 1,3 |

La Figure 2 présente certaines propriétés physiques initiales du sol le 24 septembre 2008 avant le passage de la sous-soleuse. Les mesures révèlent un sol dont la masse volumique apparente (MVA) augmente avec la profondeur. La MVA était en moyenne de 1,34 g/cm³ à 15 cm, de 1,53 g/cm³ à 30 cm et de 1,61 g/cm³ à 45 cm de profondeur. Le sol était en prairie depuis plus de 5 ans et n'avait pas été travaillé depuis. Par ailleurs, à cette date, l'eau occupait plus de 70% de la porosité totale du sol en surface (0-30 cm) et plus de 80% de la porosité à plus de 30 cm de profondeur. À partir de cette profondeur, la capacité d'air était inférieure à la valeur critique de 0,10 cm³/cm³. Sous cette valeur critique, les racines des plantes croissent peu, donc elles ne sont pas susceptibles d'explorer le sol à des profondeurs supérieures à 30 cm. Le sol présentait donc des symptômes importants de compaction en profondeur.

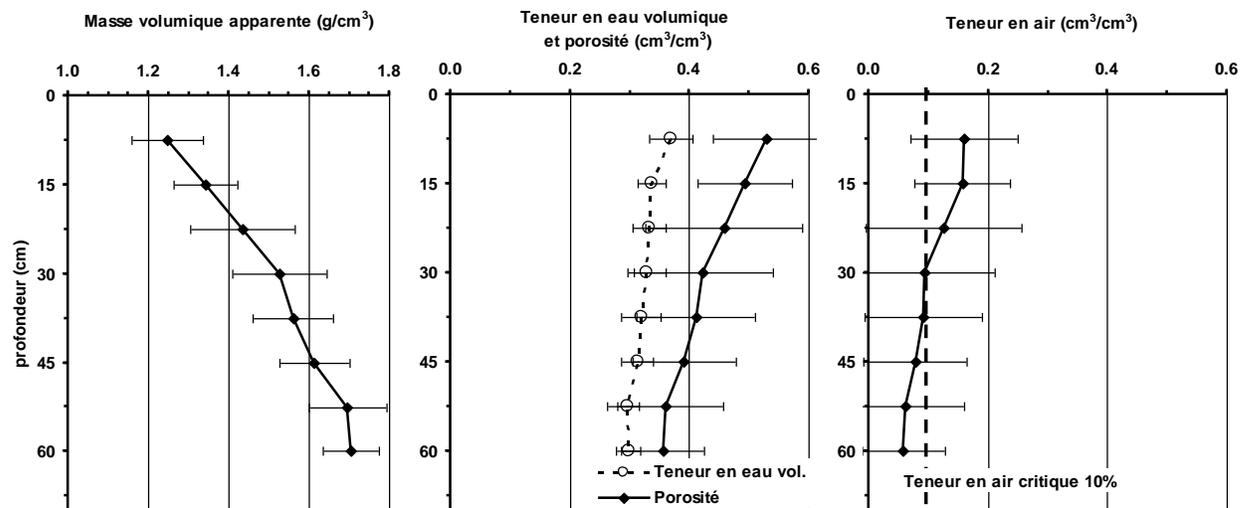


Figure 2 : Propriétés physiques initiales du sol en 2008

2.4 Données climatiques

Les données climatiques de pluviométrie et de température de l'air et du sol sont enregistrées quotidiennement à tous les 10 minutes dans une station météorologique automatisée située sur la station expérimentale à moins de 500 m de distance du dispositif. Les précipitations pour les saisons de croissance 2008 à 2011 sont présentées au Tableau 4 et à la Figure 3.

Tableau 4 : Précipitations mensuelles entre les mois de mai et novembre de 2008 à 2011.

| | Mai | Juin | Juillet | Août | Sept. | Oct. | Nov. | Somme |
|-------------|-----|------|---------|------|-------|------|------|-------|
| | mm | | | | | | | |
| 2008 | 63 | 205 | 192 | 91 | 116 | 83 | 49 | 798 |
| 2009 | 93 | 136 | 173 | 157 | 66 | 92 | 98 | 817 |
| 2010 | 44 | 168 | 59 | 85 | 222 | 107 | 141 | 826 |
| 2011 | 165 | 106 | 131 | 221 | 170 | 102 | 48 | 944 |

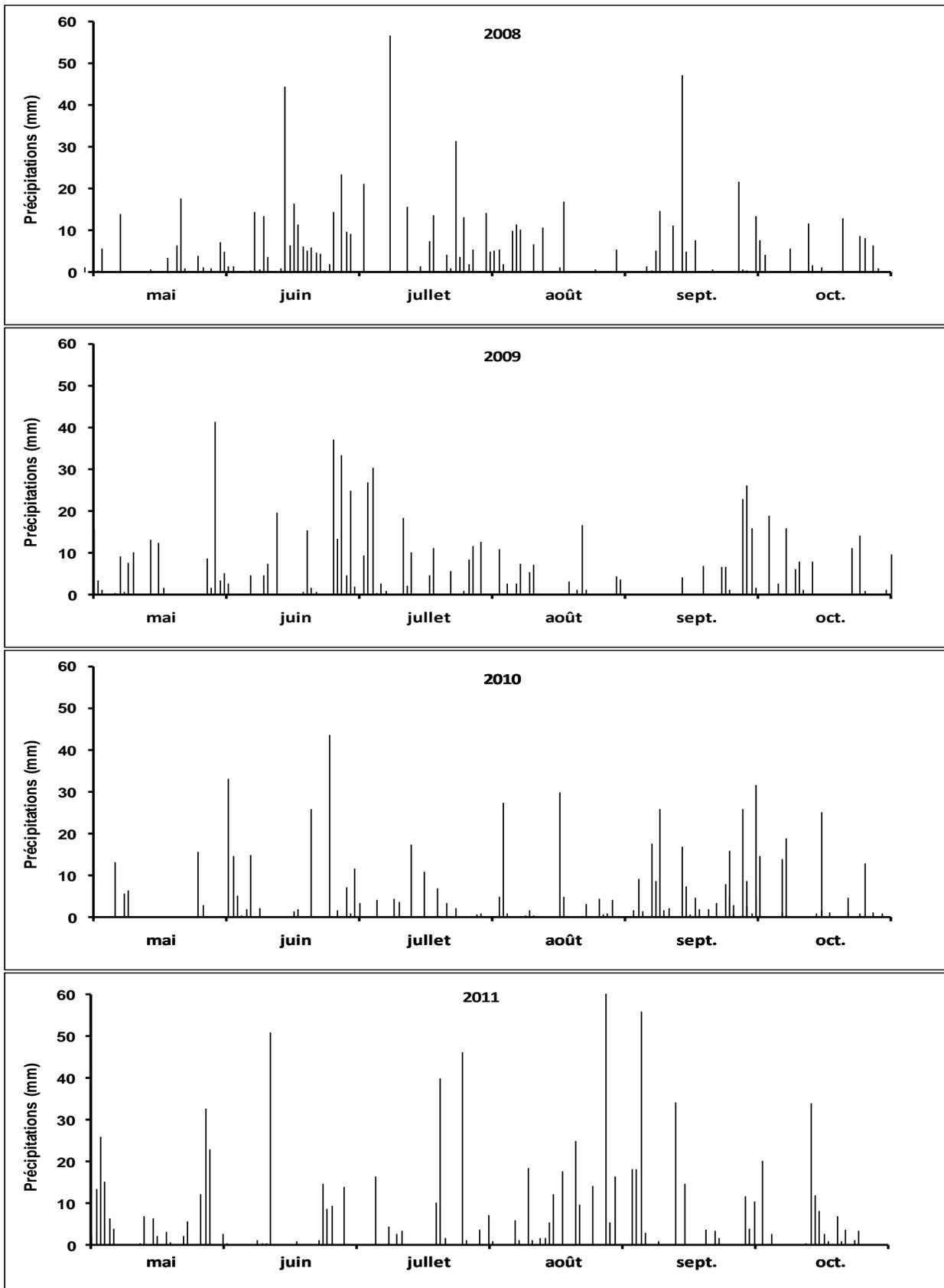


Figure 3 : Répartition des précipitations durant les saisons de croissances de 2008 à 2011.

2.5 Sous-solage

Les travaux de sous-solage ont été réalisés le 29 septembre 2008 dans le sens des drains en bandes alternées de 3,05 m (10') de largeur. Malgré le temps relativement sec à la fin du mois d'août et du début de septembre, des précipitations importantes ont eu cours durant la deuxième semaine de septembre (voir Figure 3a), nous obligeant à retarder les travaux de sous-solage vers la fin de septembre.

La tâche a été effectuée par une sous-soleuse à trois étançons espacés de 112 cm (44") tractée par un bulldozer de marque Dresser Inter de 225 HP sur chenilles de 60 cm (24"), exerçant au sol une pression de 9,0 lbs/po² (Figure 4a). La profondeur d'exécution a varié de 60 à 70 cm (24" à 27") afin de défoncer la couche compactée située aux alentours de 50 cm (20"). Tel que recommandé dans la littérature, un cycle de gel-dégel, ayant pour objectif de fissurer davantage le sol, avait été planifié durant l'hiver 2009 avant tout nouveau passage de machinerie. Le nivellement des sillons créés par la sous-soleuse a été exécuté à la pelle de tracteur le 21 avril 2009.



Figure 4 : Sous-soleuse à trois dents tractée par un bulldozer (a) et bande sous-solée sur le dispositif expérimental (b).

2.6 Calendrier des opérations culturales

2009

Tous les travaux relatifs à la culture de l'orge et des engrais verts en 2009 ont été exécutés en semis direct et en respectant les recommandations en vigueur. La fertilisation a été ajustée en fonction des résultats obtenus des analyses de sol réalisées à l'automne 2008.

Le 4 mai 2009, 2 tm/ha de chaux granulaire ont été appliquées avec un semoir à céréale.

Le 5 mai 2009, 30 m³/ha de lisier de porc d'engraissement provenant d'une préfosse a été appliqué uniformément à la grandeur du dispositif pour rehausser la fertilité du sol. Un léger hersage au vibroculteur a été exécuté en surface (<3 cm) pour faciliter l'incorporation du lisier dans le sol tout en conservant les propriétés de la culture en semis direct.

Le 6 mai 2009, l'orge Newdale (variété brassicole) a été semée à la grandeur du dispositif au taux de 165 kg/ha en rangs espacés de 19,05 cm (7,5") avec un semoir à semis direct GreatPlains; 40 kg/ha de N, 30 kg/ha de P₂O₅ et 40 kg/ha de K₂O ont été apportés avec le semoir.

Le 11 juin 2009, un traitement herbicide de 1 litre/ha de Buctril M a été appliqué avec un pulvérisateur pour le contrôle des adventices à feuilles larges.

Le 20 août 2009, les parcelles ont été récoltées avec une moissonneuse-batteuse de parcelles (Wintersteiger, modèle Elite). Les pailles ont aussi été récoltées à l'arrière de la batteuse avec une bêche pour évaluer les rendements de pailles.

Le 28 août 2009, à la suite de la récolte de l'orge, les parcelles du traitement RH ont été ensemencées en radis huileux (Variété Diacon) au taux de 16 kg/ha et celles du traitement LU ont été ensemencées en luzerne (Variété Caribou) au taux de 17 kg/ha (Figure 1). Le radis huileux a reçu 50 kg N/ha au semis et la luzerne a été fertilisée à raison de 10 kg/ha de N, 15 kg/ha de P₂O₅ et 30 kg/ha de K₂O. Conformément au protocole établi, aucun semis n'a été effectué sur les parcelles du traitement TE.

2010

Les travaux relatifs à la culture de soya et de luzerne ont été réalisés tel que prévu. Toutefois, la luzerne a été ressemée en raison d'un manque à la levée important dans certaines parcelles. Aussi, le premier semis de soya accusait un manque à la levée important et une nouvelle variété a été semée le 15 juin. Par ailleurs, les rendements en soya ont été mesurés en biomasse aérienne dans le but de hâter la récolte pour procéder au sous-solage des parcelles au mois de septembre.

Le 12 mai 2010, la luzerne de variété Caribou a été ressemée pour le traitement LU avec le semoir Great Plains au taux de 15 kg ha⁻¹; un engrais minéral a été apporté selon la formule 10-15-30 à un taux de 100 kg ha⁻¹.

Le 18 mai 2010, le soya de variété Phoenix a été semé pour les traitements TE et RH avec le semoir Great Plains à un taux de 134 kg ha⁻¹; 15 kg N ha⁻¹, 45 kg P₂O₅ ha⁻¹ et 60 kg K₂O ha⁻¹ ont été apportés au même moment.

Le 4 juin 2010, un traitement herbicide de 2 l ha⁻¹ de Venture a été appliqué sur la luzerne et le soya.

Le 15 juin 2010, du à un manque à la levée important, les parcelles en soya (T1 et T2) ont été tondue à environ 2 pouces de la surface du sol. Le semis de soya a été refait à cette même date avec une autre variété, le Apollo Round Up Ready, à un taux de 124 kg ha⁻¹ et un espacement de 7 pouces entre les rangs. Le semoir Great Plains a été utilisé pour ce semis.

Le 21 juin 2010, la première coupe de luzerne a été effectuée.

Le 9 juillet 2010, une application de Round Up a été faite sur les parcelles en soya (T1 et T2) à une dose de 2,5 l ha⁻¹.

Le 29 juillet 2010, la deuxième coupe de luzerne est effectuée.

Le 2 août 2010, l'herbicide Embutox 625 a été appliqué pour traiter les feuilles larges dans la luzerne à une dose de 2,75 l ha⁻¹.

Le 31 août 2010, la biomasse aérienne de soya et la troisième coupe de luzerne ont été récoltées pour procéder au sous-solage au mois de septembre.

Le 4 novembre 2010, un labour au chisel a été réalisé de 15 à 20 cm de profondeur sur toute la surface du champ, pour éliminer les traces d'ornières créées après le nivellement des traces de sous-soleuse.

2011

Les travaux relatifs à la culture de maïs grain ont été réalisés tel que prévu.

Le 3 juin 2011, l'hybride Pride K083 de maïs-grain a été semé à un taux de 88 000 graines ha⁻¹; 50 kg ha⁻¹ de N, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ et 80 kg ha⁻¹ de K₂O ont été apporté au semis dans le planteur.

Le 20 juin 2011, un traitement herbicide de Dual II (1.5 L ha⁻¹) + Banvel (1 L ha⁻¹) dans 200 litres d'eau a été appliqué sur le maïs.

Le 28 août 2011, la tempête Irène s'abat sur le Québec méridional et entraîne des dégâts importants dans les cultures. Une bonne partie du champ de maïs a versé sous l'effet du vent et de la pluie, mais le champ demeure récoltable. Par contre, aucune mesure sur les sols n'a pu être réalisée avant la récolte.

Le 27 et le 28 octobre 2011, le maïs-grain a été récolté avec une moissonneuse-batteuse de parcelles expérimentales sur des longueurs de 10 m.

Aucun travail du sol réalisé à l'automne.

2.7 Paramètres expérimentaux suivis

Les paramètres mesurés en 2009 sont les suivants :

- Rendements en grain et en paille d'orge;
- Évaluation de la masse volumique apparente (MVA) et de la teneur en air du sol;
- Suivi de la teneur en eau du sol;
- Suivi de la résistance du sol au pénétromètre.

Les paramètres mesurés en 2010 sont les suivants :

- Rendements en biomasse de luzerne à 3 dates;
- Rendements en biomasse de soya;
- Mesure de la masse volumique apparente (MVA) et de la teneur en air du sol à huit profondeurs à l'aide d'un échantillonneur de sol Giddings (16 sept. 2010);
- Mesure de la teneur en eau du sol à différentes dates;
- Mesure de la résistance du sol au pénétromètre (21 et 22 juillet 2010);
- Mesure de la conductivité hydraulique saturée sur les parcelles 7 à 12 avec de l'infiltromètre de Guelph (10, 11 et 12 août 2010).
- Examen des racines de luzerne, des drains et des sillons de sous-solage à partir de trois profils de sol creusés à la pelle mécanique dans les parcelles 22, 23, 24 (17 août 2010).
- Analyse des propriétés chimiques à l'aide d'un échantillonneur de sol Giddings et d'un échantillon de sol prélevé de 0 à 15 cm de profondeur (16 sept. 2010).

Les paramètres mesurés en 2011 sont les suivants :

- Rendements en maïs-grain;
- Mesure de la teneur en eau du sol à différentes dates;
- Mesure de la résistance du sol au pénétromètre dynamique sur l'ensemble des parcelles (28 et 29 juillet 2011)

- Mesure de la résistance du sol au pénétromètre sur des transects ciblés sur les drains et les sillons de sous-solage (parcelles 4.1 SS, 5.1 DR, 13.1 SS, 14.1 DR et 22.1 SS) (2 août 2011);
- Mesure de la masse volumique apparente (MVA) à huit profondeurs à l'aide d'un échantillonneur de sol Giddings (2 nov. 2011);
- Analyse des propriétés chimiques sur un échantillon de sol composite prélevé à la sonde de 0 à 15 cm de profondeur (7 nov. 2011).
- Mesure des profils racinaires du maïs sur un transect couvrant l'ensemble des traitements de sous-solage et de drains agricoles entre les parcelles 10.1 à 18.1 et 10.2 à 18.2, creusé à la pelle mécanique jusqu'à 1 m, (9 nov. 2011).

2.7.1 Rendements

En 2009, les rendements en grain et en paille d'orge ont été évalués sur chaque unité expérimentale sur un rang de 1,5 m de large et 26 m de long. Des sous-échantillons de grains et de pailles ont été séchés à l'étuve à 70°C durant 2 jours ou jusqu'à l'obtention de masses stables.

En 2010, les rendements en biomasses aériennes de luzerne ont été évalués à 3 dates avec une récolteuse à plantes fourragères sur un rang de 60 cm de large. Les parcelles expérimentales ont été subdivisées en deux sous-parcelles de 13 m de long. Des sous-échantillons de biomasses ont été séchés à l'étuve à 70°C durant 2 jours ou jusqu'à l'obtention de masses stables.

En vue de réaliser une nouvelle opération de sous-solage en septembre 2010 dans des conditions de sol sec, la récolte du soya a été devancée au 1^{er} septembre et les rendements ont été évalués sous forme de biomasse aérienne produite. Les parcelles expérimentales ont été subdivisées en deux sous-parcelles de 13 m de long. Des sous-échantillons de biomasses ont été séchés à l'étuve à 70°C durant 2 jours ou jusqu'à l'obtention de masses stables.

En 2011, les rendements en maïs-grain ont été évalués les 27 et 28 octobre 2011 avec une moissonneuse-batteuse de parcelles expérimentales sur deux rangs de 10 m de longueur. Des sous-échantillons de biomasses ont été séchés à l'étuve à 70°C durant 2 jours ou jusqu'à l'obtention de masses stables. Malgré la verse engendrée par la tempête Irène le 28 août 2011, l'ensemble du champ a pu être récolté sans perte apparente au sol.

2.7.2 Profils racinaires

Pour réaliser des profils racinaires, un transect a été creusé à la pelle mécanique sur une profondeur de 80 cm dans un des blocs de répétition, perpendiculairement aux rangs de

maïs. Les profils racinaires ont été évalués selon une procédure développée par Tardieu et Manichon (1986) et décrite par Ngunjiri et Siemens (1993). Dans le transect décrit précédemment, les racines ont été exposées à une profondeur de 61 cm sur une largeur de 76 cm centrée sur le rang de maïs. Un grillage de 19 mm x 19 mm a été placé sur la surface exposée des racines et un indice de la densité racinaire a été enregistré dans chaque case. Ces indices variaient de 0 pour les cases sans racines à 8 pour les cases ayant plusieurs racines (Figure 5).

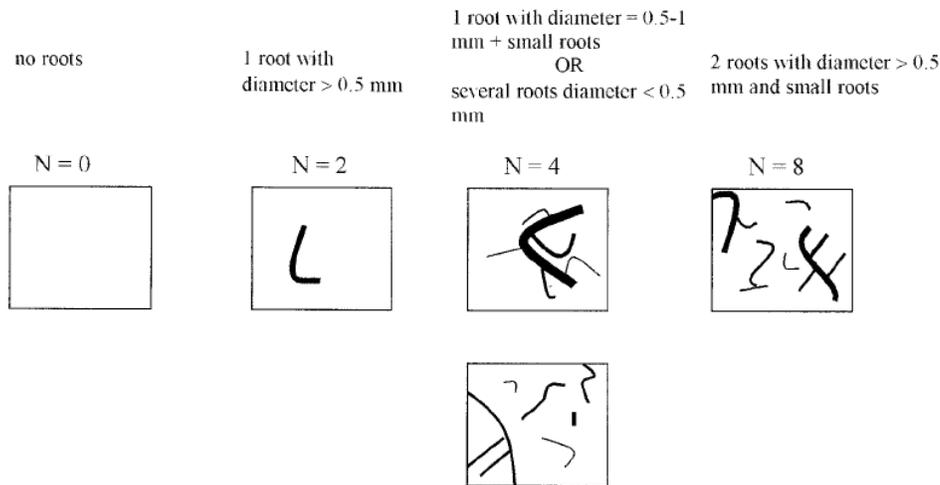


Figure 5 : Indice racinaire (N) basé sur le nombre et la grosseur des racines (adapté de Tardieu et Manichon, 1986).

Les indices racinaires ont été utilisés pour calculer la densité racinaire selon l’approche développée par Tardieu et Manichon (1986). La densité racinaire dans un cube de sol est reliée à l’indice racinaire N lu à la surface du cube selon la relation suivante :

$$\text{Densité racinaire, } D_r = \frac{0,029 + 0,047N + 0,0119N^2}{\text{Volume}_c} \text{ g/cm}^3$$

où le volume de la case, Volume_c est $1,9 \times 1,9 \times 1,9 \text{ cm}^3$.

2.7.3 Masse volumique apparente et porosité

La masse volumique apparente et la porosité du sol ont été évaluées en 2009, en 2010 et en 2011 de la même manière que pour la caractérisation du site en 2008 (Section 2.2.1). Brièvement, les sols ont été échantillonnés avec une sonde de 38 mm de diamètre montée sur un échantillonneur de sol hydraulique (Giddings). En 2009, deux carottes de sol ont été prélevées par parcelle, à intervalle régulier (à 10 et 20 m de distance sur le sens de la longueur de la parcelle). Les deux carottes de sol ont été séparées en huit sections de 0-7,5; 7,5-15; 15-22,5; 22,5-30; 30-37,5; 37,5-45; 45-52,5 et 52,5-60 cm de profondeur avant d’être réunies par profondeur pour former des échantillons composites. En 2010 et en 2011, les deux carottes prélevées à 7,5 et 22,5 m sur la

longueur de la parcelle ont été analysées séparément en vue de diviser la parcelle de 30 m en deux sous-parcelles de 15 m.

2.7.4 Résistance du sol au pénétromètre

Un pénétromètre mécanique dynamique muni d'un marteau de 8 kg et d'un cône standard de 60° a été utilisé pour mesurer la résistance du sol à l'enfoncement (Herrick et Jones, 2002). Cette dernière a été évaluée par le nombre de coups de masse de 8 kg nécessaires, l'indice n , pour franchir des intervalles de distance de 150 mm dans le sol, jusqu'à 600 mm de profondeur. Les valeurs recueillies ont par la suite été traitées selon les lois de la cinématique des corps rigides et de la conservation d'énergie telles que présentés aux équations 2.1, 2.2 et 2.3. L'équation 2.2, où v correspond à la vitesse de chute du bloc en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, a correspond à l'accélération gravitationnelle en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ et s correspond à la hauteur de chute du bloc en m, est le résultat de l'intégration de l'équation 2.1 lorsque les valeurs initiales sont nulles. L'équation 2.3, où A_c est l'aire du cône et P_d sa profondeur d'enfoncement, est l'expression mathématique de la résistance mécanique du sol R , en MPa, à l'enfoncement du cône dynamique.

$$\int v \partial v = \int a \partial s \quad \text{eq (2.1)}$$

$$v = \sqrt{(2a\Delta s)} \quad \text{eq (2.2)}$$

$$R = \frac{1}{2A_c P_d} m v^2 \quad \text{eq (2.3)}$$

En 2009, les mesures de résistance du sol à l'enfoncement du pénétromètre ont été effectuées le 24 août sur les parcelles du bloc 2 (parcelles 10 à 18) et à deux distances (10 et 20 m) sur la parcelle. En cette première année de projet, l'analyse de la compaction du sol en termes de résistance physique a été évaluée sous un angle expérimental. L'objectif visé était de valider la compatibilité de la méthode du pénétromètre avec les autres variables mesurées et de vérifier la pertinence d'une telle mesure en considérant les objectifs spécifiques du projet.

En 2010, les mesures de résistance du sol à l'enfoncement du pénétromètre ont été réalisées le 21 juillet sur les 27 parcelles de 30 m, soit à 7,5 et 22,5 m de distance correspondant au centre de 2 sous-parcelles de 15 m de long.

En 2011, les mesures de résistance du sol à l'enfoncement du pénétromètre ont été réalisées le 28 juillet sur les 27 parcelles subdivisées en 2 sous-parcelles de 15 m de long, soit à 7,5 et 22,5 m de distance. Le 2 août 2011, des mesures de résistance ont également été réalisées sur des transects d'un peu plus de 1 m perpendiculairement aux drains ou aux sillons de sous-solage sur les parcelles, 4.1, 5.1, 13.1, 14.1 et 22.1.

2.7.5 Teneur en eau volumique

Parallèlement à la mesure de la résistance à l'enfoncement en 2009, des mesures de la teneur en eau volumique ont été réalisées avec un appareil TDR Trase muni de tiges de 60 cm aux mêmes endroits (à 10 et 20 m de distance) sur les parcelles du bloc 2 (parcelles 10 à 18).

La teneur en eau volumique a été mesurée en 2010 à neuf reprises du mois de juillet au mois de septembre 2010 avec le TDR Trase muni de tiges de 60 cm afin d'évaluer les effets des traitements (cultures et sous-solage), sur l'ensemble des parcelles des 3 blocs, subdivisées en deux sous-parcelles.

La teneur en eau volumique a été mesurée en 2011 à deux reprises au mois de juillet et au mois de novembre avec le TDR Trase muni de tiges de 60 cm.

2.7.6 Propriétés chimiques des sols

Les propriétés chimiques du sol ont été déterminées sur les échantillons de sol prélevés à 0-7,5 et 7,5-15 cm de profondeur avec l'échantillonneur Giddings pour la détermination des propriétés physiques. Une fraction de ces échantillons de sol a été séchée à l'air avant de déterminer le pH eau, le pH SMP et les teneurs en C organique et N Total, les teneurs en N-NH₄ et N-NO₃ extraits au KCl 2M et les teneurs en P, K, Ca, Mg, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Na et P/Al extraits à la solution Mehlich 3. En 2011, les propriétés chimiques ont été déterminées à partir d'échantillons de sol prélevés à la sonde de 0 à 15 cm de profondeur.

2.8 Traitements statistiques

Les analyses de variance pour comparer les traitements ont été réalisées avec la procédure Proc Mixed dans le progiciel SAS. (SAS Institute, 2003). Des modèles linéaires mixtes normaux ont été utilisés. Les termes d'erreur ont été précisés selon les traitements comparés et de leur mise en place.

Dispositif expérimental en 2009

Trois traitements sur le sol SOL (parcelle témoin non sous-solée TE, présence de drain agricole DR, ou sous-solé SS) ont été répartis dans neuf parcelles de 90 m × 3,05 m selon un plan à trois blocs aléatoires complets. De l'orge a été semé dans toutes les parcelles et les rendements secs du grain, et de la paille, ainsi que le poids à l'hectolitre ont été mesurés à la récolte dans 3 sous-parcelles (REP) de chaque parcelle, pour un total de 27 observations (Figure 1). Les unités expérimentales pour les traitements SOL sont les 9 parcelles de 90 m × 3,05 m. Le modèle linéaire mixte en analyse de variance comprend l'effet fixe du traitement du sol, les effets aléatoires des blocs, des parcelles (BLOC × SOL) et l'effet aléatoire des sous-échantillons dans une même unité expérimentale (la sous-parcelle de 30 m × 3,05 m). On suppose que ces effets aléatoires

sont mutuellement indépendants et proviennent d'une distribution normale de moyenne 0 et de variances σ^2_b , σ^2_{sb} et σ^2_e respectivement.

Dispositif expérimental en 2010

Trois traitements du sol (Témoin TE, présence de drain agricole DR, ou sous-solé SS) ont été répartis dans neuf parcelles de 90 m × 3,05 m selon un plan à trois blocs aléatoires complets. Les blocs ont été divisés en 3 longueurs de 30 m pour obtenir un dispositif en carré latin de 3 blocs × 3 répétitions dans lequel les 3 traitements cultures/précédents culturaux PRÉCÉDENT ont été distribués (Soya SO, soya/radis huileux RH ou luzerne LU) (Figure 1). Les unités expérimentales pour le précédent cultural sont les 9 grandes parcelles de 30 m × 9,15 m du carré latin. Les unités expérimentales pour l'interaction sol × précédent sont les 27 parcelles de 30 m × 3,05 m. Le soya a été semé dans les traitements SO et RH, tandis que la luzerne a été semée dans les parcelles LU. Les rendements mesurés à la récolte dans chaque moitié de parcelle de 30 m × 3,05 m sont des sous-échantillons. Pour la luzerne, l'analyse a porté sur la somme de la biomasse récoltée à trois dates, donc 3 blocs × 3 traitements du sol × 2 sous-échantillons = 18 observations. Pour le soya, il n'y a eu qu'une seule récolte, mais deux précédents, donc 3 blocs × 3 traitements du sol × 2 précédents × 2 sous-échantillons = 36 observations. Le soya et la luzerne ont été analysés séparément étant donné les différences entre ces deux cultures.

Le modèle linéaire mixte utilisé en analyse de variance pour comparer les rendements de soya comprend les effets fixes du traitement sur le sol (SOL) et des précédents culturaux (PRECEDENT) ainsi que l'interaction entre ces deux facteurs. Plusieurs effets aléatoires dus aux différentes unités expérimentales sont également inclus dans ce modèle : les effets des blocs, des répétitions (rep), ainsi que les effets des interactions BLOC×SOL, REP×BLOC×PRÉCÉDENT, REP×BLOC×PRÉCÉDENT×SOL et l'erreur résiduelle (les sous-échantillons dans une même sous-parcelle). Tous ces effets aléatoires sont supposés mutuellement indépendants et proviennent d'une distribution normale de moyenne 0 et de variances σ^2_b , σ^2_{sb} , σ^2_{pb} , σ^2_{psb} et σ^2_e respectivement.

Pour l'analyse du rendement de la luzerne, le modèle linéaire mixte comprend les effets fixes du sol (SOL) et les effets aléatoires dus aux différents types d'unités expérimentales : les effets BLOC et BLOC×SOL proviennent d'une distribution normale de moyenne 0 et de variances σ^2_b , σ^2_{sb} respectivement, alors que l'erreur résiduelle due aux sous-échantillons dans une même sous-parcelle lors d'une récolte provient d'une distribution normale de moyenne 0 et de variance σ^2_e . Tous ces effets aléatoires sont supposés mutuellement indépendants.

Dispositif expérimental en 2011

Du maïs-grain a été semé dans toutes les parcelles en 2011. Les unités expérimentales pour le précédent cultural sont les 9 grandes parcelles de 30 m × 9,15 m du dispositif en blocs aléatoires complets, soit 3 blocs × 3 précédents distribués en carré latin. Les unités expérimentales pour l'effet traitement sur le sol (Témoin TE, présence de drain

agricole DR, ou sous-solé SS) sont les neuf parcelles de $90 \times 3,05$ m dans un dispositif à blocs aléatoires complets, soit 3 blocs \times 3 traitements sol. Les unités expérimentales pour l'interaction sol \times précédent sont les 27 parcelles de $30 \times 3,05$ m. Les rendements mesurés à la récolte dans chaque moitié de parcelle ou sous-parcelle de $15 \times 3,05$ m sont des sous-échantillons.

Le modèle pour les rendements de maïs-grain en 2011 comprend les effets fixes du sol (SOL) et des précédents culturaux (PRÉCÉDENT) ainsi que l'interaction entre ces deux facteurs. Les effets aléatoires sont les blocs, l'interaction BLOC \times SOL, l'interaction BLOC \times PRÉCÉDENT et l'interaction BLOC \times PRÉCÉDENT \times SOL. Les sous-échantillons dans une même unité expérimentale (la parcelle de $30 \times 3,05$ m) sont les erreurs résiduelles du modèle. On suppose que ces effets aléatoires sont mutuellement indépendants et proviennent d'une distribution normale de moyenne 0 et de variances σ^2_b , σ^2_{sb} , σ^2_{pb} , σ^2_{psb} et σ^2_e respectivement.

Ces modèles ont été appliqués à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Institute Inc, 2003, Littell et al., 2006). Pour l'analyse de la récolte de 2009, un ajustement d'une variance différente pour chaque traitement du sol a été nécessaire en utilisant l'option GROUP= de l'énoncé RANDOM. Pour l'analyse des rendements de soya en 2010, la structure de corrélations pour les mesures répétées est AR(1). Cette structure a été sélectionnée après avoir ajusté plusieurs structures et en comparant les statistiques AIC des différents modèles obtenus. Pour tous les modèles, les degrés de liberté ont été calculés avec l'approximation de Kenward-Roger qui tient compte des nombreux effets aléatoires et des corrélations entre les observations.

3 RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1 Résultats obtenus et analyse

Toutes les mesures prévues au niveau des rendements des cultures, des profils racinaires et des propriétés physico-chimiques des sols ont été réalisées telles que prévues de sept. 2008 à nov. 2011 à l'exception des profils racinaires des cultures de soya et de luzerne en 2010. Les faibles précipitations durant les mois de juillet et août 2010 ont entraîné des conditions de sécheresse au niveau du sol, rendant difficile le creusage manuel de profils de sol à la pelle. Par contre, des profils à l'extrémité des parcelles ont été creusés à la pelle mécanique sous le 3^{ième} bloc des parcelles de luzerne le 17 août 2010 afin d'observer le profil racinaire de cette culture sous l'effet du sous-solage et sur le drain agricole en comparaison avec la parcelle témoin. À la fin du projet, des profils de sols ont pu être creusés à la pelle mécanique dans le 2^{ième} bloc de parcelles le 8 novembre 2011 afin d'observer le profil racinaire de la culture de maïs sous l'effet des traitements. Des mesures et des images de ces profils seront présentées dans cette section.

Tel que rapporté dans le premier rapport d'étape, l'effet du sous-solage avait été relativement mitigé soit en raison des conditions de sol trop humides à l'automne 2008 ou des passages subséquents du tracteur à pelle au printemps 2009 pour niveler les sillons et les buttes créées par la sous-soleuse. Tel que proposé dans ce premier rapport, toutes les mesures de 2010 ont été réalisées en subdivisant les 27 parcelles principales de 30 m de long en sous-parcelles de 15 m, afin d'effectuer un nouveau passage de sous-soleuse sur une des sous-parcelles à l'automne 2010, dans des conditions idéalement plus sèches. Suite à un été relativement sec, le sous-solage s'avérait possible et la récolte de soya a été devancée au 1^{er} septembre pour réaliser subséquemment cette opération. Les rendements ont dû cependant être mesurés en biomasses aériennes de matière sèche. Or, durant le mois septembre 2010, les précipitations ont été relativement abondantes (Figure 3), retardant les prises d'échantillons pour les propriétés physiques des sols au 16 septembre et finalement annihilant la possibilité de passer la sous-soleuse dans des conditions de sol sec. Même si cette nouvelle opération de sous-solage n'a pas été réalisée telle que prévue par une modification au projet, les effets des traitements (effets du sous-solage, effets de cultures à racines profondes) ont été mesurés tel que prévus dans la culture de maïs en 2011.

3.1.1 Rendements

Les rendements d'orge brassicole pour 2009 sont présentés au Tableau 5. La saison 2009 a été marquée par des précipitations importantes au mois de juillet (voir Figure 3b) et l'orge a mieux performé sur les parcelles drainées où les rendements en grain ainsi qu'en paille ont été plus élevés. L'analyse de variance et la comparaison des traitements en contrastes permettent de conclure à des effets significatifs du drain agricole sur les rendements en grain, paille et biomasse totale par rapport au traitement de sous-solage

et la parcelle témoin, quoique l'effet du drain par rapport à la parcelle témoin était non significatif pour ce qui est du rendement en grain. La présence d'un drain agricole directement sous la parcelle a augmenté le rendement de 62% par rapport à la parcelle sous-solée, tandis que cette augmentation était de 26% par rapport à la parcelle témoin ($P = 0,07$).

Tableau 5 : Rendements de l'orge en 2009, selon les traitements physiques apportés aux parcelles

| | Grain 13 % HR | Paille MS | Biomasse MS |
|-------------------------|---------------|------------|-------------|
| Moyenne | t/ha | | |
| Témoin (TE) | 3,9 | 3,1 | 6,5 |
| Drainage (DR) | 4,9 | 3,8 | 8,1 |
| Sous-solage (SS) | 3,1 | 2,5 | 5,1 |
| | prob > F | | |
| Effets Sol | 0,0018** | <0,0001*** | 0,0002** |
| Contrastes | prob > t | | |
| TE vs SS | 0,1548 | 0,042* | 0,083 |
| TE vs DR | 0,0667 | 0,0037** | 0,0156* |
| DR vs SS | 0,0009*** | <0,0001*** | 0,0003** |

*, **, *** : Probabilités d'un effet significatif aux seuils de 0,05, 0,01 et 0,001

Le traitement de sous-solage aurait conduit à des baisses de rendements par rapport à la parcelle témoin, mais au seuil de 5%, ces baisses de rendement ne seraient significatives que pour le rendement en paille. L'effet négatif du sous-solage en première année pourrait s'expliquer par les conditions trop humides du sol présentes à la fin septembre en 2008 au moment du sous-solage (voir Figure 3a) ou encore les travaux de nivelage au printemps dans des conditions de sol trop humides. Le sol aurait ainsi subi davantage de compaction par le passage de la machinerie que de décompaction par la sous-soleuse. Nous visions des conditions plus sèches au départ, mais les événements pluvieux du mois de septembre 2008 nous auront forcés à réaliser ces travaux vers la fin de septembre dans des conditions de sol plus humides.

À l'inverse, de faibles précipitations ont eu lieu au cours du mois de septembre 2009, à la suite du semis du radis huileux et de la luzerne, le 28 août 2009. La croissance de ces deux cultures a été fortement ralentie, produisant peu de biomasse avant le mois de novembre, au moment où les conditions de gel ont été plus importantes (Figure 6). Pour le radis huileux plus sensible au gel, ces conditions ne lui auront pas permis de développer un système racinaire profond, car il n'a pas atteint plus de 15 cm de profondeur avant cette période. Peu d'effets «décompactants» du radis huileux sur les

propriétés du sol et sur les rendements subséquents en soya et en maïs ont été anticipés. En revanche, la luzerne a été installée convenablement dans les parcelles malgré quelque manque à la levée dû à la sécheresse de septembre 2009. Davantage d'effets de cette culture sur les propriétés du sol et les rendements subséquents en maïs sont anticipés en 2011.



Figure 6 : Dimension des plantules de luzerne (a) et de radis huileux (b), le 4 novembre 2009.

En 2010, les rendements en biomasse (MS) de soya et de luzerne n'ont pas été affectés de façon significative ni par les traitements imposés sur le sol (prob F = 0,42), ni par les différentes cultures ou précédents culturaux (prob F = 0,56), ou l'interaction entre ces deux effets (prob F = 0,39) (Tableau 6).

De même, les contrastes établis à priori révèlent peu d'effet particulier des cultures ou des traitements sur le sol (Tableau 6). On note toutefois un faible effet de l'interaction entre le drainage et la culture de luzerne (prob t = 0,16); la production de luzerne est davantage favorisée sur le drain alors que celle du soya y serait légèrement défavorisée par rapport au sol témoin. Le sous solage aurait aussi affecté à la baisse le rendement en soya dans les parcelles succédant au radis huileux (RH), mais pas dans les parcelles sans cet engrais vert (ST) (prob t = 0,16). Ni le sous-solage, ni le drainage ne semblerait avoir affecté le rendement de soya dans les parcelles sans engrais vert (ST). L'implantation d'un engrais vert de radis huileux à la suite de l'orge (RH) semblerait réduire le rendement en soya, mais l'effet est très peu significatif (prob t = 0,38).

Tableau 6 : Rendements moyens en biomasse de matière sèche de soya et de luzerne en 2010 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture.

| | Traitements Culture/précédent cultural | | | Moyenne |
|---|--|--------------------------|--------------|--------------------|
| | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux. (RH) | Luzerne (LU) | |
| Traitements Sol | kg/ha | | | |
| Témoin (TE) | 3763 | 3644 | 4071 | 3795 |
| Drainage (DR) | 3586 | 3281 | 4191 | 3686 |
| Sous-solage (SS) | 3624 | 2858 | 3514 | 3309 |
| Moyenne | 3658 | 3261 | 3963 | 3600 |
| Effets | | | | prob > F |
| Sol | | | | 0,56 |
| Culture | | | | 0,42 |
| Sol x Culture | | | | 0,39 |
| Contrastes a priori | | | | prob > t |
| Effets Sol | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | | | | 0,98 |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | | | | 0,27 |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | | | | 0,54 |
| Soya/Radis huileux. (RH) vs Soya témoin (ST) | | | | 0,38 |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | | | | 0,16 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | | | | 0,93 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | | | | 0,72 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | | | | 0,16 |

En 2011, les rendements en maïs-grain (14,5% d'humidité relative) n'ont pas été affectés de façon significative ni par les traitements imposés sur le sol (prob F = 0,88), ni par les différentes cultures ou précédents culturaux (prob F = 0,26), ou l'interaction entre ces deux effets (prob F = 0,76) (Tableau 7). De même, les contrastes établis a priori révèlent peu d'effet particulier des cultures ou des traitements sur le sol. Même si les moyennes semblent légèrement plus élevées sur un retour de luzerne ou dans les parcelles sous-solées ou drainées, ces tendances sont très peu significatives, mais quand même intéressante.

Tableau 7 : Rendements moyens de maïs-grain (14,5% d'humidité relative) en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture.

| | Traitements Culture/précédent cultural | | | Moyenne |
|---|--|--------------------------|--------------|--------------------|
| | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux. (RH) | Luzerne (LU) | |
| Traitements Sol | kg/ha | | | |
| Témoin (TE) | 6544 | 6792 | 6961 | 6766 |
| Drainage (DR) | 6696 | 6827 | 7016 | 6847 |
| Sous-solage (SS) | 7033 | 7146 | 7026 | 7068 |
| Moyenne | 6758 | 6922 | 7001 | 6893 |
| Effets | | | | prob > F |
| Sol | | | | 0,82 |
| Culture | | | | 0,26 |
| Sol x Culture | | | | 0,76 |
| Contrastes a priori | | | | prob > t |
| Effets Sol | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | | | | 0,88 |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | | | | 0,57 |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | | | | 0,22 |
| Soya/Radis huileux. (RH) vs Soya témoin (ST) | | | | 0,27 |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | | | | 0,90 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | | | | 0,26 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | | | | 0,74 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | | | | 0,71 |

3.1.2 Profils racinaires

Des profils de sol ont été creusés à la pelle mécanique à l'extrémité de trois parcelles de luzerne le 17 août 2010, afin d'observer le profil racinaire de cette culture sous l'effet du sous-solage ou sur le drain agricole en comparaison avec la parcelle témoin (Figure 7). La zone de travail de la sous-soleuse était encore visiblement apparente entre 30 et 60 cm de profondeur; le sol était plus ameubli et présentait même une cavité (Figure 7b). De même, la zone de sol remaniée sur une largeur de 20 cm lors de la pose du drain agricole était encore visible sur une profondeur de plus de 1 m (Figure 7c). Le sol sur le drain agricole était également plus friable. Sur la parcelle témoin, les racines étaient la plupart concentrées dans les 20 premiers cm de sol, seules quelques unes atteignaient de 30 à 40 cm de profondeur. Dans la parcelle sous-solée, le profil racinaire de la luzerne était sensiblement le même que dans la parcelle témoin; le passage de la sous-soleuse ne semblait pas avoir augmenté la profondeur d'enracinement de la luzerne. Par contre, sur le drain agricole, certaines racines de luzerne ont atteint jusqu'à 100 cm de profondeur, une année après le semis de la luzerne.



Figure 7 : Profils de sol sous la culture de luzerne en 2010 dans la parcelle témoin (a) et sous l'effet du sous-solage (b) et du drain agricole (c).

Le 11 novembre 2011, un transect a été creusé à la pelle mécanique sur une profondeur de 80 cm dans le deuxième bloc de répétition, perpendiculairement aux rangs de maïs, afin de réaliser neuf profils racinaires dans autant de parcelles. Les profils de sol de trois de ces parcelles (parcelle témoin, sous-solage et drain agricole) sont présentés à la Figure 8. Comme en 2010, la zone de travail de la sous-soleuse était encore visiblement apparente, formant une cavité de sol ameubli entre 45 et 60 cm de profondeur (Figure 8b). De même, la zone de sol remaniée sur une largeur de 20 cm lors de la pose du drain agricole était encore visible sur une profondeur de plus de 1 m (à gauche sur la Figure 8c). Le sol sur le drain agricole était également plus friable jusqu'à la surface du sol.

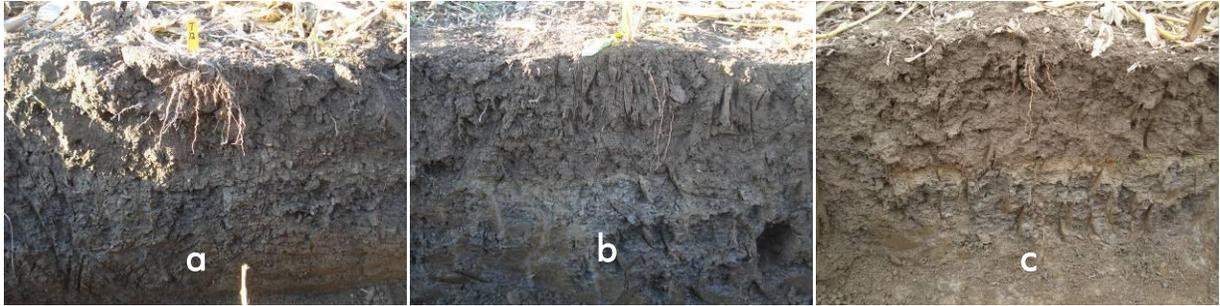


Figure 8 : Profils de sol après la culture de maïs en 2011 dans la parcelle témoin (a) et sous l'effet du sous-solage (b) et du drain agricole (c).

Les profils racinaires ont été évalués selon une procédure développée par Tardieu et Manichon (1986) et décrite précédemment. Le grillage de 19 x 19 mm placé sur la surface exposée des racines est présenté à la Figure 9.



Figure 9 : Le grillage placé perpendiculairement à la surface des racines pour lire les indices de densité racinaire.

Les profils bruts de densité racinaire sont présentés à la Figure 10. Visuellement, il est difficile de conclure à une amélioration ou un approfondissement du système racinaire sous l'effet du sous-solage ou du drain agricole. Quelques profils de racines semblent toutefois plus profonds sur les parcelles 14 et 17 placées sur le drain agricole et la parcelle 18 sous-solée. L'ANOVA réalisée sur la moyenne des observations par profil ou par profondeur de 15 cm n'a pas non plus révélé de différences significatives, même si les parcelles sous-solées tendaient à présenter des densités légèrement plus élevées aux profondeurs entre 15 et 45 cm (Tableau 8).

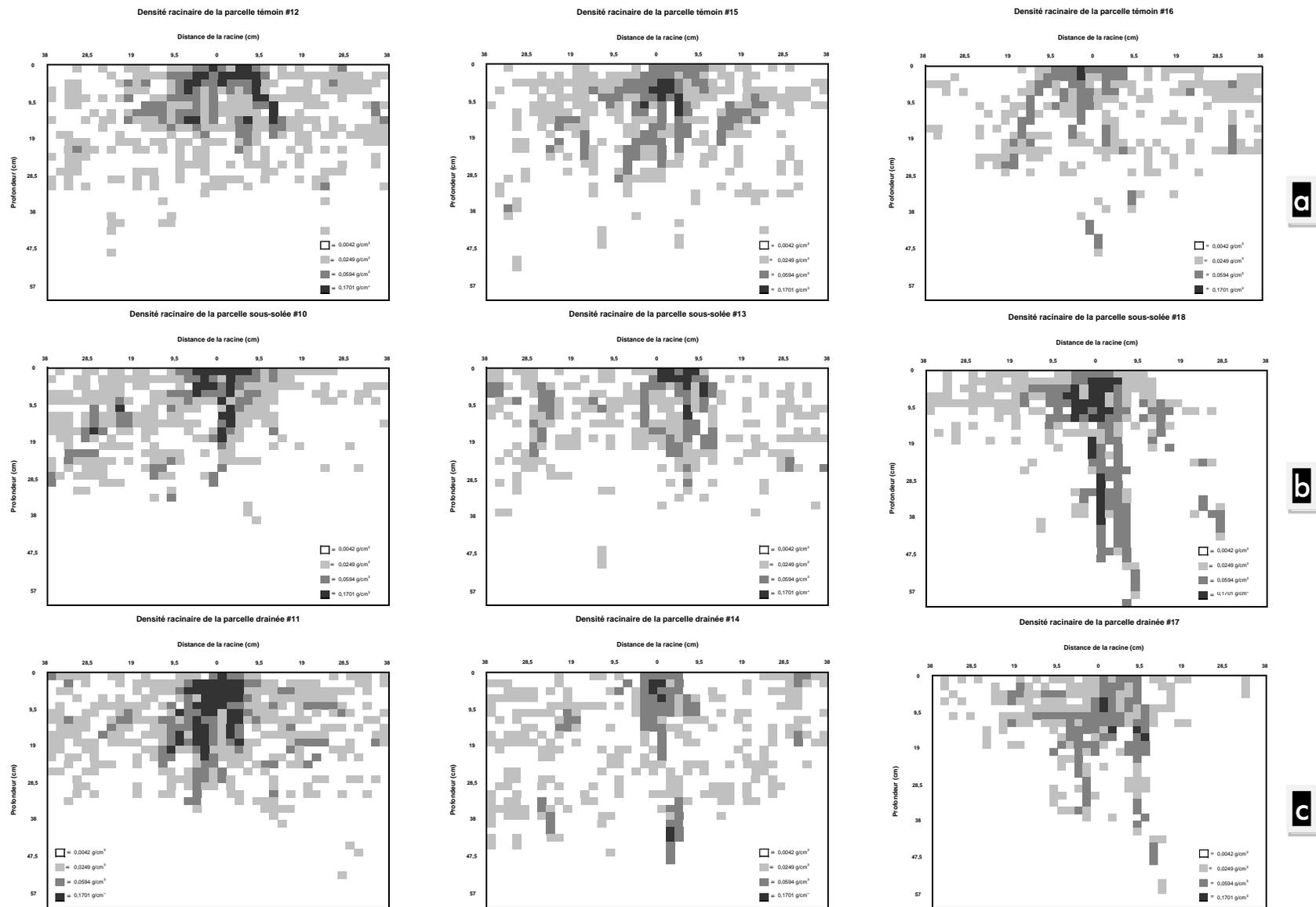


Figure 10 : Profils des densités racinaires de maïs relevés le 11 novembre 2011 sur les parcelles témoin TE (a), sous-solées SS (b) et sur le drain agricole DR (c).

Tableau 8 : Densité racinaire moyenne sous l'effet des différents traitements sol et à quatre profondeurs

| Profondeur (cm) | Témoin (TE) | Drainage (DR) | Sous- solage (SS) | Moy. | Prob. F | SS vs DR | DR vs TE | TE vs SS |
|--------------------|----------------|------------------|----------------------|------|---------|--------------------|----------|----------|
| | | | | | | mg/cm ³ | | |
| 0 - 15 | 18,5 | 18,5 | 17,6 | 18,2 | 0,98 | 0,76 | 0,77 | NE |
| 15 - 30 | 8,0 | 6,8 | 8,5 | 7,8 | | 0,55 | 0,87 | 0,67 |
| 30 - 45 | 1,3 | 2,2 | 2,8 | 2,1 | | 0,83 | 0,59 | 0,75 |
| 45 - 60 | 0,1 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | | 0,95 | 0,96 | 0,92 |
| Moyenne | 7,0 | 7,0 | 7,3 | 7,1 | 0,97 | 0,83 | 0,83 | 0,99 |

3.1.3 Masse volumique apparente, porosité, teneurs en eau et en air du sol

La masse volumique apparente (MVA) de même que la teneur en eau a été relevée à l'automne en 2009 et 2010. En 2011, seule la MVA a été mesurée; la teneur en eau n'a pas été relevée, ce qui a empêché d'évaluer la teneur en air par différence. La porosité totale de même que la teneur en air ont toutefois été calculées en 2009 et 2010. L'évolution de ces propriétés physiques entre 2009 et 2011 est présentée en fonction de la profondeur et des traitements sur le sol à la Figure 11 et en fonction de la profondeur et des traitements engrais verts/précédents culturaux à la Figure 12.

Les analyses de variance sur la masse volumique, sur la teneur en eau et la teneur en air volumique sont présentées en annexe (Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16, respectivement). Grosso modo, ces propriétés ont très peu évolué en fonction des traitements imposés. En fonction de la profondeur, on y observe encore les mêmes tendances générales depuis le démarrage du projet en 2008 (Figure 2). Le sol présente une masse volumique apparente qui augmente de façon importante et presque linéairement avec la profondeur à un point tel que la teneur en air volumique est inférieure à la valeur critique de 10% à partir de 30 cm sous la surface du sol.

Puisque les interactions entre les traitements et la profondeur du sol n'étaient pas significatives, seules les valeurs moyennes par profondeur ainsi que les contrastes à priori sur la moyenne des profondeurs sont présentés dans les Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16 afin d'alléger la présentation des données. Le principal effet demeure celui de la profondeur ($\text{prob} < 0,0001$) mais certaines interactions entre les cultures et les traitements sur le sol étaient légèrement significatives en 2010. Certains de ces effets étaient plus importants à certaines profondeurs spécifiques.

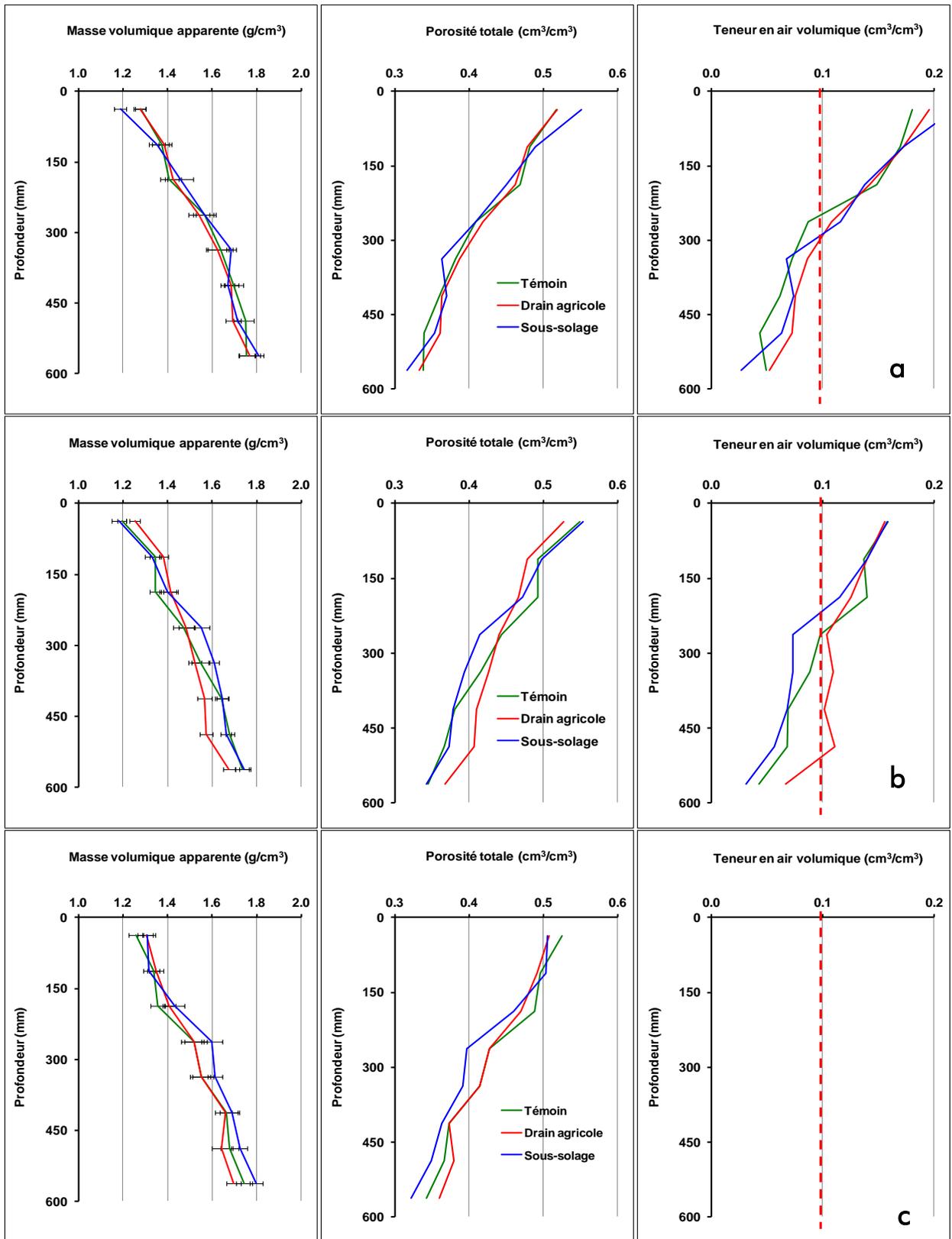


Figure 11 : Masse volumique apparente, porosité totale, et teneur en air en 2009 (a), 2010 (b) et 2011 (c) en fonction de la profondeur et des traitements du sol.

Alors que les effets du drain agricole ou du sous-solage sur la masse volumique ou sur la teneur en air du sol semblaient mitigés en 2009 (Figure 11a), en 2010, les parcelles cultivées sur le drain agricole semblent présenter en profondeur dans le sol (>30 cm) une masse volumique légèrement inférieure, de même qu'une teneur en air volumique supérieure (Figure 11b), mais ces effets ne sont pas statistiquement significatifs (Tableau 14). L'effet des drains en profondeur était également perceptible en 2008, avant de démarrer le projet. Les drains agricoles dans ces parcelles ont été installés dans des tranchées de près de 40 cm de largeur et de 1 m de profond, suite au passage d'une excavatrice. Le remaniement de ce profil de sol sur le drain ainsi que de sa zone d'influence sur le sol avoisinant expliquerait en partie l'amélioration de la MVA en profondeur dans ces parcelles et les meilleurs rendements obtenus en orge en 2009.

En 2010 et 2011, on observe une légère augmentation de la MVA en profondeur dans les parcelles sous-solées (surtout entre 22,5 et 30 cm), de même qu'une réserve en air inférieure en 2010. Ce qui pourrait expliquer les rendements en orge quelque peu inférieurs mesurés sous ce traitement en 2009, avec la même tendance, mais non significative en 2010 dans les cultures d'orge et de luzerne. Toutefois, l'effet se serait inversé en 2011, puisque les rendements en maïs tendent à augmenter (effet non significatif) sous l'effet du sous-solage. Rappelons que des conditions trop humides lors du nivellement des sillons créés par la sous-soleuse pourraient avoir compacté le sol.

L'effet des différentes cultures et des précédents culturaux sur la masse volumique apparente (MVA) et la teneur en air du sol est présenté à la Figure 12 en fonction de la profondeur. À l'inverse de ce qui était recherché, les parcelles sous luzerne et précédent cultural de radis huileux semblent présenter une MVA supérieure ou une porosité totale inférieure de 15 à 37,5 cm de profondeur par rapport à la parcelle témoin qui était cultivée en soya uniquement en 2010. L'implantation du radis huileux après la culture du soya semble avoir augmenté de façon significative la MVA moyenne du sol (prob t = 0,09)(voir Tableau 14 en Annexe). Par ailleurs, on dénote une interaction positive de la luzerne et du sous-solage par rapport à la culture de soya (avec ou sans radis huileux) (Tableau 14). L'implantation de la luzerne sur les parcelles sous-solées aurait permis de maintenir la masse volumique apparente du sol à un niveau similaire à ceux des parcelles en soya non sous-solées (avec ou sans radis huileux), alors qu'elle a augmenté dans les parcelles sous-solées en soya ou dans les parcelles de luzerne non-solées. La combinaison du sous-solage et de la luzerne améliorerait la MVA par rapport à l'emploi de l'un des deux traitements seulement. De même, on dénote une interaction négative entre l'implantation du radis huileux et la présence de drain agricole sur la MVA. Le passage additionnel de machinerie requis pour le semis du radis huileux à la fin août 2009 aurait créé de la compaction sur le drain, même si les conditions étaient relativement sèches.

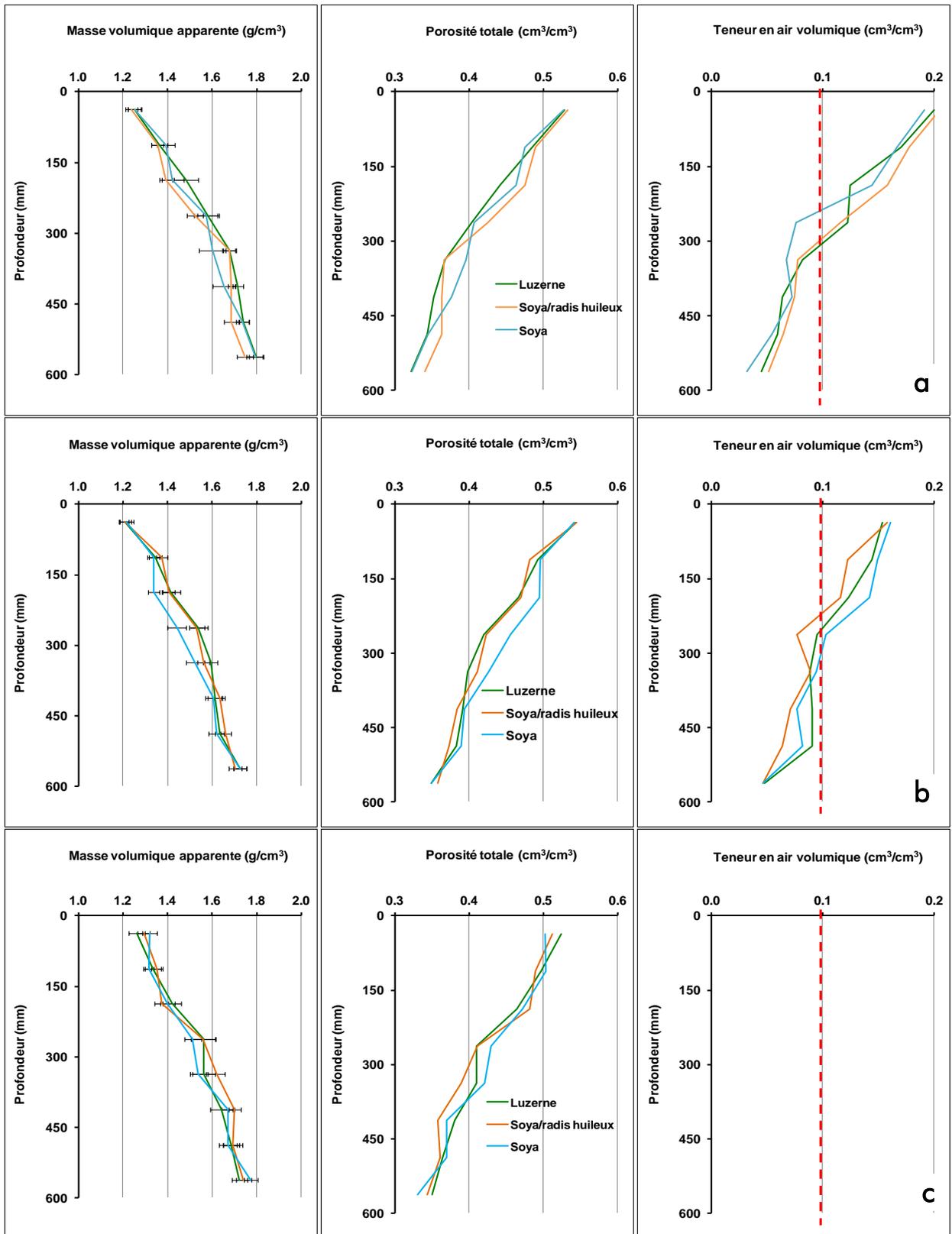


Figure 12 : Masse volumique apparente, porosité totale et teneur en air du sol en 2009 (a), 2010 (b) et 2011 (c) (Teneur en air non disponible en 2011) en fonction de la profondeur du sol et des cultures/précédents culturaux.

La teneur moyenne en air dans le sol sous le soya avec un précédent cultural de radis huileux semblait aussi plus faible, particulièrement de 7,5 à 30 cm et de 45 à 57,5 cm de profondeur dans le sol (Figure 12), mais en moyenne cette teneur en air et la MVA était affectée par une interaction avec la présence du drain et le fait d’implanter du radis huileux (voir Tableau 14 et Tableau 16 en Annexe). Comme pour la MVA, on dénote une teneur en air plus élevée dans le sol à proximité du drain agricole sous le soya lorsqu’il n’y a pas eu d’implantation du radis huileux à l’automne. Il semblerait peu plausible que les passages additionnels de semoirs et de machineries pour installer le radis huileux et la luzerne soit la cause de ces augmentations de masse volumique apparente et de ces réductions de teneur en air (Figure 12), étant donné les conditions relativement sèches du sol lors des semis à la fin août 2009. Toutefois, les conditions étaient plus humides et moins idéales au printemps 2010 lorsque les parcelles de luzerne ont été réensemencées.

La Figure 13 illustre la relation entre la teneur en air et la masse volumique apparente des sols en fonction du sous-solage ou de la présence du drain agricole. La teneur en air est davantage reliée à la masse volumique apparente en profondeur dans le sol (45 à 60 cm). Par ailleurs, à cette profondeur, les sols dans les parcelles sur drain agricole (triangle vert) ont plus souvent une faible masse volumique et une teneur en air élevée. La porosité des sols a donc été améliorée à proximité des drains en profondeur et se serait maintenue au cours du temps. À l’inverse, la porosité des sols dans les parcelles sous-solées ne semble pas améliorée par rapport à la parcelle témoin.

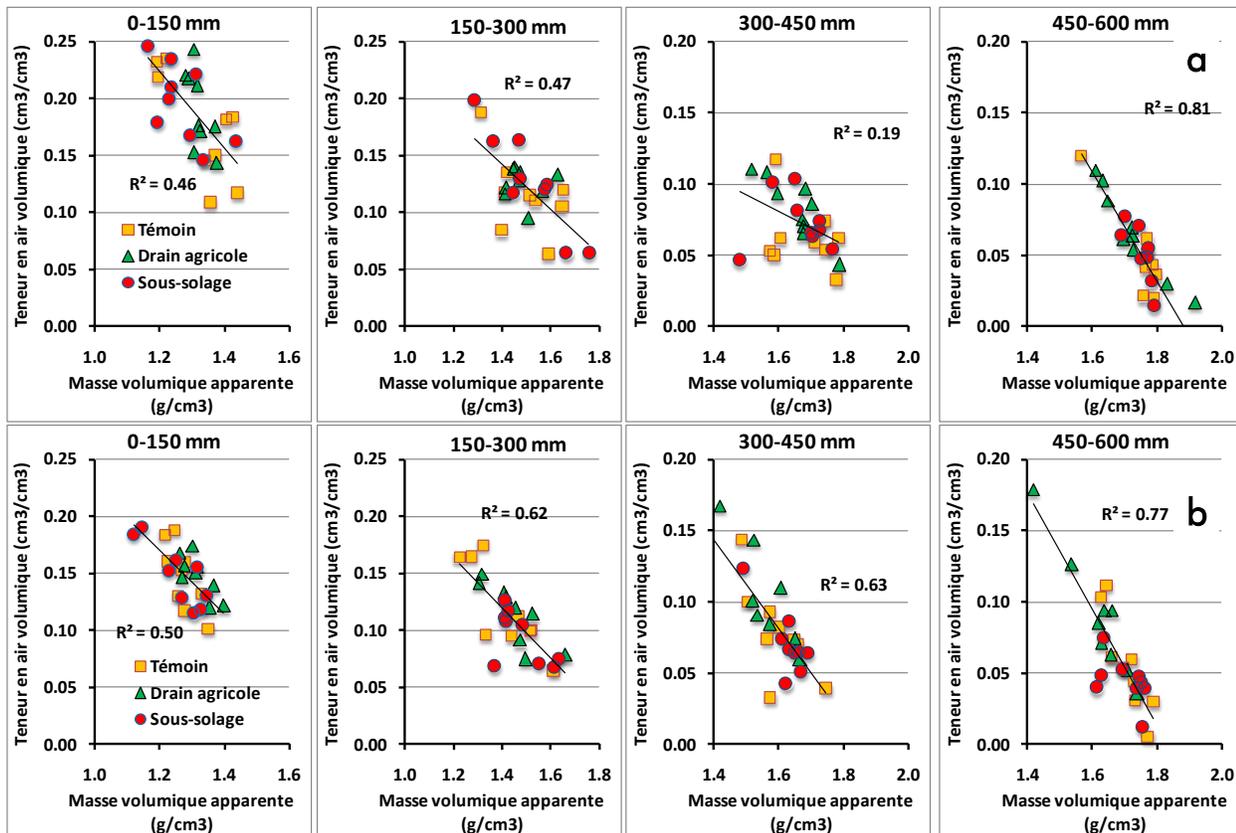


Figure 13 : Relation entre la teneur en air et la masse volumique apparente à différentes profondeurs dans le sol en 2009 (a) et en 2010 (b) selon les effets du sous-solage et de la présence d'un drain agricole.

En 2010, l'effet des différentes cultures et engrais verts semble distribué uniformément le long de la relation entre la teneur en air et la masse volumique apparente des sols (Figure 14), sauf pour le soya sans précédent d'engrais vert qui semble favoriser une meilleure teneur en air et une plus faible masse volumique apparente de 15 à 30 cm de profondeur, tel qu'illustré aussi à la Figure 12b. En 2011, la teneur en air n'a pas été mesurée et sa relation avec la masse volumique apparente n'est pas présentée.

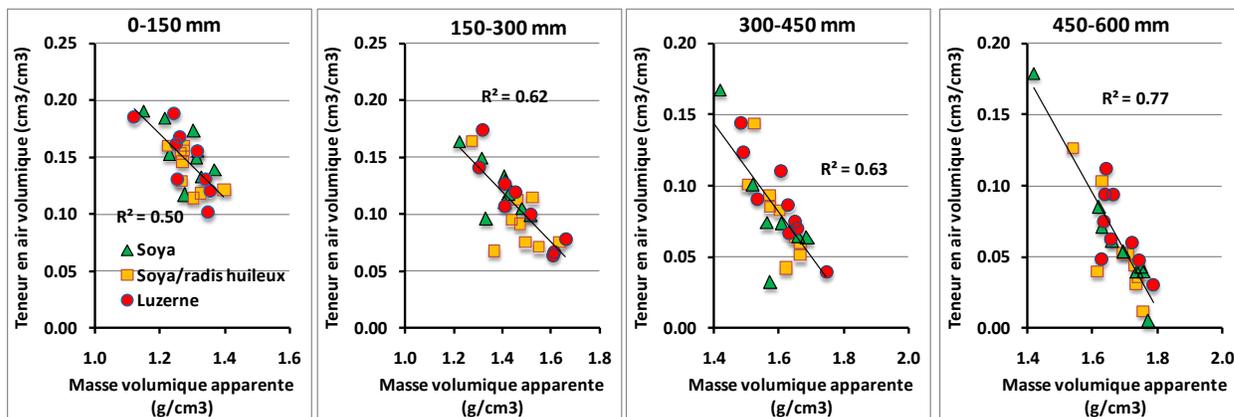


Figure 14 : Relation entre la teneur en air et la masse volumique apparente à différentes profondeurs dans le sol selon les différentes cultures et précédents culturaux en 2010.

3.1.4 Teneur en eau du sol suivie au TDR

En 2010, la teneur en eau du sol suivie avec le TDR Trase a principalement été affectée par le temps (date) et les cultures au cours du temps (date x culture) (voir Tableau 17 en Annexe). La teneur en eau volumique était plus faible sous la culture de luzerne par rapport à la culture de soya durant les mois de juillet, août et septembre 2010, mais elle était supérieure en octobre 2010 (Figure 15a). Une plus forte évapotranspiration de la luzerne durant la saison de croissance pourrait expliquer la plus faible teneur en eau sous la luzerne durant la saison. Toutefois, la luzerne et le soya ont été récoltés le 30 août 2010 et seule la luzerne persistait après cette date et la teneur en eau aurait dû être encore plus faible après cette date sous la luzerne, comparativement à la parcelle sous résidus de soya.

Par ailleurs, en moyenne sur les 9 dates d'échantillonnage en 2010, on dénote une interaction entre la luzerne et le sous-solage (LU VS SO) x (SS VS TE) (Tableau 17), comme pour la MVA moyenne du sol (Tableau 14). La teneur en eau était en moyenne plus faible (prob t = 0,03) dans les parcelles en luzerne (LU) témoin (TE) par rapport aux parcelles en soya (SO) sous-solées (SS) ou témoin (TE), ou en luzerne (LU) sous-solées (SS). Les rendements plus élevés (mais non significativement différents) et une plus grande évapotranspiration dans les parcelles témoin (TE) en luzerne (LU) par rapport aux parcelles sous-solées pourraient expliquer les plus faibles teneurs en eau (Tableau 6). Par contre, dans le cas de la MVA (Tableau 14), les parcelles sous-solées cultivées en luzerne

présentaient une MVA plus faible par rapport aux parcelles sous-solées (SS) ou non (TE) en soya (SO), tandis que les parcelles témoins (TE) en luzerne (LU) présentaient une MVA plus élevées.

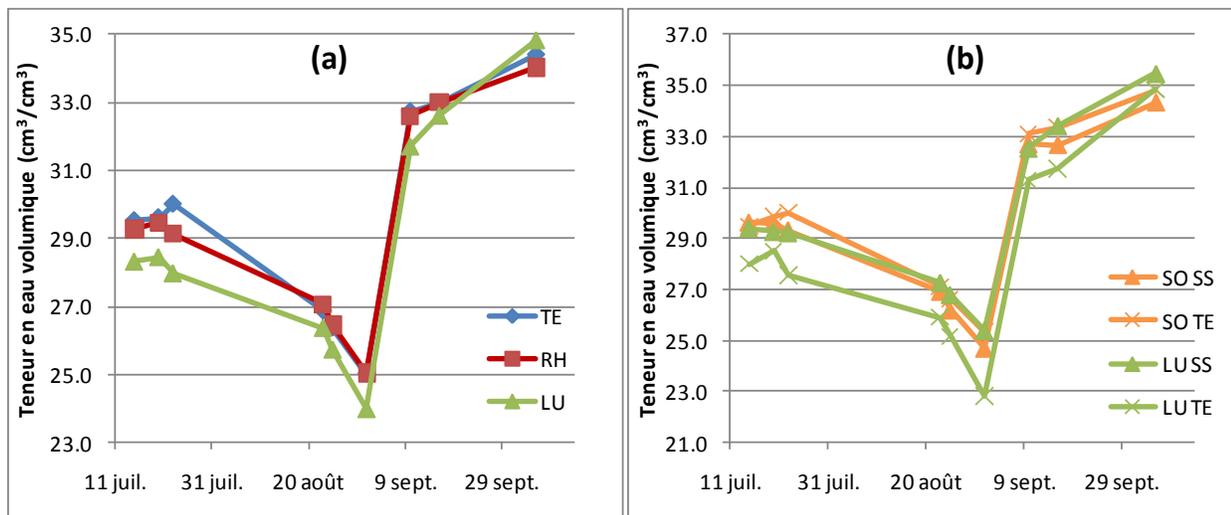


Figure 15 : Évolution de la teneur en eau du sol en 2010 (de 0-60 cm de profondeur) sous l'effet des cultures/précédents culturaux (a) et sous l'effet du sous-solage (SS) combiné à la luzerne (LU) par rapport à la culture de soya (SO) (b).

La teneur en eau du sol a été suivie avec le TDR Trase à deux reprises en 2011, soit en juillet avant le passage de la tornade Irène et en novembre après la récolte de maïs. Comme en 2010, la teneur en eau a principalement été affectée par le temps (date) et l'interaction entre le sous-solage et la culture de luzerne (LU VS SO) x (SS VS TE) (Tableau 18 en Annexe). La teneur en eau était en moyenne plus faible (prob t = 0,05) dans les parcelles en luzerne (LU) témoin (TE) par rapport aux parcelles en soya (SO) sous-solées (SS) ou témoin (TE) ou à la parcelle en luzerne (LU) sous-solées (SS). La teneur en eau semble aussi influencée quelque peu (prob t = 0,08) à la baisse par la présence de drain agricole (DR).

3.1.5 Résistance à l'enfoncement

La Figure 16 présente les mesures de résistance à l'enfoncement dans le sol réalisées en 2009, 2010 et 2011 avec un pénétromètre dynamique. En 2009, les mesures avaient été réalisées en phase exploratoire dans les trois traitements Sol de la deuxième répétition, et à deux endroits sur le long des parcelles de 30 m (soit à 10 et 20 m de distance). En 2010, ces mesures ont été réalisées de façon systématique sur l'ensemble des sous-parcelles de 15 m, soit à 7,5 et 22,5 m sur le long des parcelles de 30 m. L'indice n, soit le nombre de coups nécessaire pour enfoncer un cône à une profondeur donnée dans le sol, est présenté en fonction des différents traitements sur le sol en 2009, 2010 et 2011 à la Figure 16a, ainsi qu'en fonction des cultures/précédents culturaux pour les mêmes années à la Figure 16b.

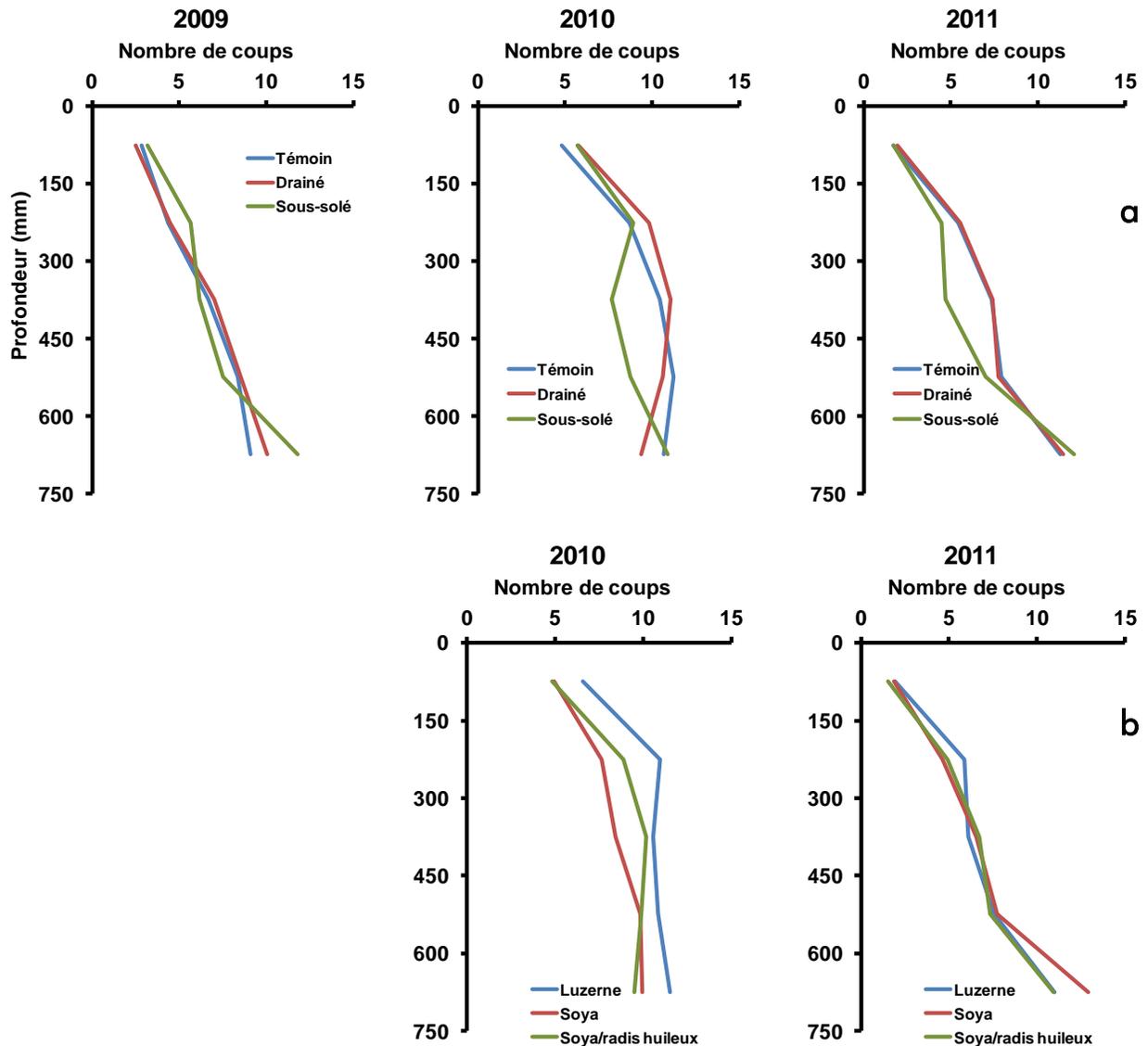


Figure 16 : Profil de résistance à la pénétration ou indice n en fonction de la profondeur d'enfoncement du cône et des traitements sur le sol (témoin, présence de drain agricole ou sous-solage,) (a) ou des précédents culturaux (b) en 2009, 2010 et 2011.

De façon générale, la résistance à l'enfoncement augmente avec la profondeur dans le sol (prob $F < 0,001$) (Tableau 19 en Annexe). Aussi le nombre de coup était plus important en 2010 qu'en 2009 et 2011, pour atteindre une même profondeur, en raison des conditions plus sèches du sol en 2010 par rapport à 2009 et 2011. En 2009, la résistance moyenne à l'enfoncement n'était pas influencée de façon significative par la présence du drain agricole ou par le sous-solage en comparaison du sol témoin (prob $F > 0,10$).

En 2010, les traitements au niveau du sol ont affecté la résistance à l'enfoncement, mais ces effets étaient variables selon la profondeur dans le sol (effets Sol x Prof; prob $F = 0,005$) (Tableau 19). Le sous-solage a réduit la résistance à l'enfoncement aux

profondeurs de 300 à 450 mm (prob t = 0,006) et de 450 à 600 mm par rapport à la parcelle témoin (Tableau 9).

Tableau 9 : Effet du sous-solage et la présence du drain agricole sur la résistance à l'enfoncement en 2010 aux profondeurs de 300 à 450 mm et 450 à 600 mm.

| Profondeur (mm) | Effet Sol | Nombre de coup (n) | Contraste | prob t |
|-----------------|------------------|--------------------|-----------|--------|
| 300-450 | Témoin (TE) | 10,4 | | |
| | Drainage (DR) | 11,1 | DR vs TE | 0,0009 |
| | Sous-solage (SS) | 7,7 | SS vs TE | 0,01 |
| 450-600 | Témoin (TE) | 11,2 | | |
| | Drainage (DR) | 10,6 | DR vs TE | 0,06 |
| | Sous-solage (SS) | 8,7 | SS vs TE | 0,01 |

La présence d'un drain agricole a quant à lui augmenté la résistance à l'enfoncement de 300 à 450 mm de profondeur dans le sol (prob t < 0,001) et l'a réduit de 450 à 600 mm de profondeur, par rapport à la parcelle témoin (prob t = 0,06). Aucun autre effet n'a été mesuré à d'autres profondeurs en 2010.

En 2011, en conditions plus humides, l'effet du drain agricole semble s'être estompé entre 300 et 600 mm de profondeur dans le sol. Seul, l'effet du sous-solage semble encore perceptible entre 300 et 450 mm de profondeur dans le sol (prob t = 0,01). En moyenne, le nombre de coup pour pénétrer ces profondeurs en 2011 étaient de beaucoup inférieures à 2010 en raison des conditions de teneurs en eau plus élevées dans le sol.

Tableau 10 : Effet du sous-solage et la présence du drain agricole sur la résistance à l'enfoncement en 2011 aux profondeurs de 300 à 450 mm et 450 à 600 mm.

| Profondeur (mm) | Effet Sol | Nombre de coup (n) | Contraste | prob t |
|-----------------|------------------|--------------------|-----------|--------|
| 300-450 | Témoin (TE) | 7,3 | | |
| | Drainage (DR) | 7,4 | DR vs TE | 0,96 |
| | Sous-solage (SS) | 4,7 | SS vs TE | 0,01 |
| 450-600 | Témoin (TE) | 7,9 | | |
| | Drainage (DR) | 7,7 | DR vs TE | 0,86 |
| | Sous-solage (SS) | 7,0 | SS vs TE | 0,37 |

En 2011, des profils de résistance à la pénétration ont été réalisés dans quelques parcelles choisies au hasard, à tous les 10 cm sur une ligne intersectée soit par le passage d'une dent de sous-soleuse (Figure 17a) ou par le drain agricole (Figure 17b). Ces mesures ont permis par ailleurs de saisir le degré de variabilité de la mesure de la

résistance à la pénétration selon la distance par rapport au passage des dents de sous-soleuse ou par rapport aux travaux de drainage. L'effet du passage de la sous-soleuse apparaît encore quelque peu présent après 3 ans dans certaines des parcelles présentées à la Figure 17a, soit les parcelles 4.1 et 13.1, tandis qu'il l'est moins dans la parcelle 22.1. On y dénombre un nombre de coups légèrement inférieur à proximité du passage de la sous-soleuse, soit à moins de 200 mm de part et d'autre de son passage et jusqu'à 600 mm de profondeur.

Dans la parcelle 22.1, l'effet de la sous-soleuse semble s'être estompé vu le nombre de coup sensiblement similaire à 0 ou 600 mm de distance du passage de la dent. En revanche, l'ensemble du sol sur cette parcelle semble moins compact. L'effet de la tranchée creusée pour y insérer des drains apparaît encore plus important dans les parcelles drainées 5.1 et 14.1 à la Figure 17b. Le nombre de coup semble réduit sur une largeur de la tranchée de près 500 mm et à une profondeur dépassant 750 mm. Outre ces constatations, ces mesures font ressortir la grande variabilité des propriétés physiques des sols sur de courtes distances et de la difficulté à prélever suffisamment de données pour caractériser l'effet de la sous-soleuse sur le travail et les propriétés des sols.

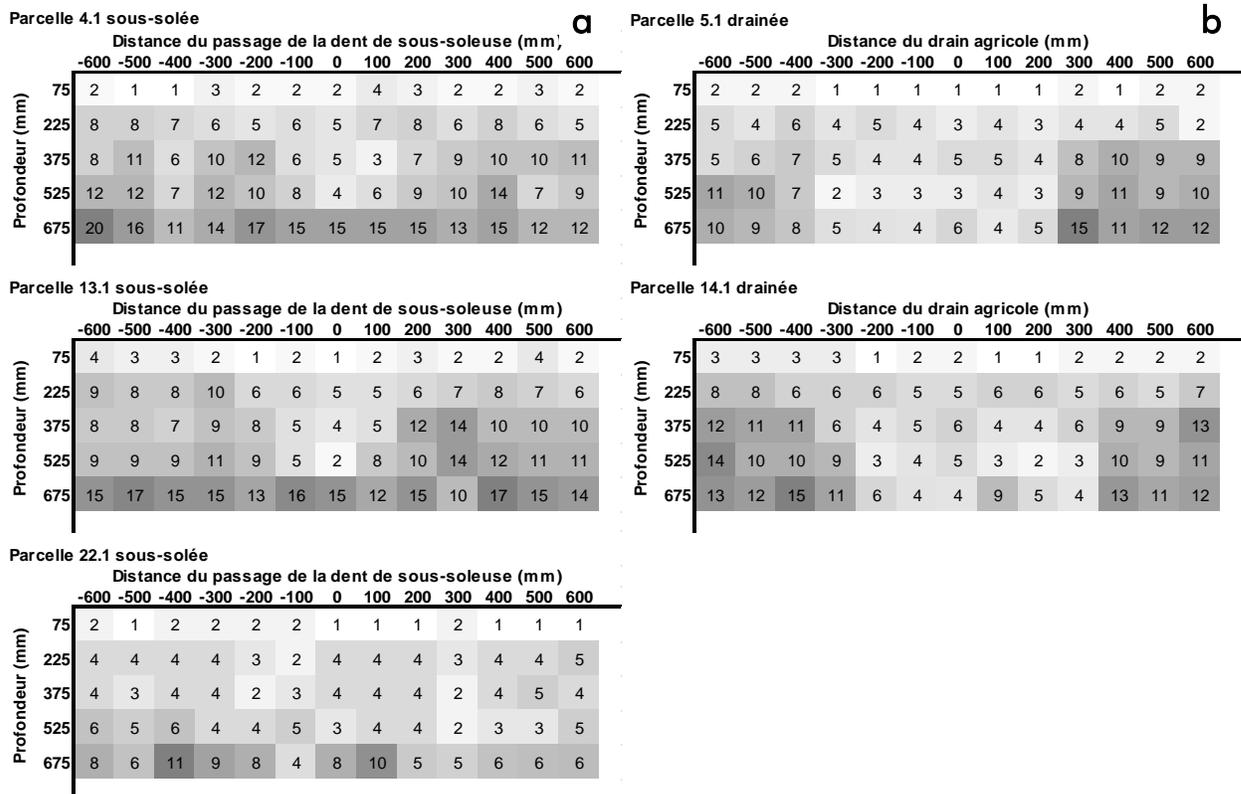


Figure 17 : Profils latéraux de résistance à la pénétration dans le sol réalisés en 2011. Indice n cumulé en fonction de la profondeur et de la dent de sous-soleuse dans des parcelles sous-solées (a) ou de la distance du drain dans les parcelles drainées (b).

Le nombre de coup cumulé (indice n cumulé) pour atteindre une profondeur de 60 cm dans le sol est présenté graphiquement à la Figure 18 en fonction de la teneur en eau

volumique mesurée avec un TDR Trase pour chaque campagne de mesure. Ces données témoignent de la relation inverse qui existe généralement entre la teneur en eau et la résistance à l'enfoncement du cône, et cet effet était surtout présent en 2009 et 2010, lorsque le sol était plus sec. Plus le sol est sec, plus il offre une résistance accrue à l'enfoncement du cône et à la pénétration des racines, comme en 2010 (21 juillet). Par contre, le sol était très humide en 2011 (27 juillet) et la relation avec la résistance à la pénétration dans le sol était beaucoup moins apparente. En vue de comparer les résultats de la résistance à l'enfoncement d'une période à une autre sur un même sol, il semble important de tenir compte de l'effet de la teneur en eau sur ce paramètre, par exemple comme covariable dans l'ANOVA.

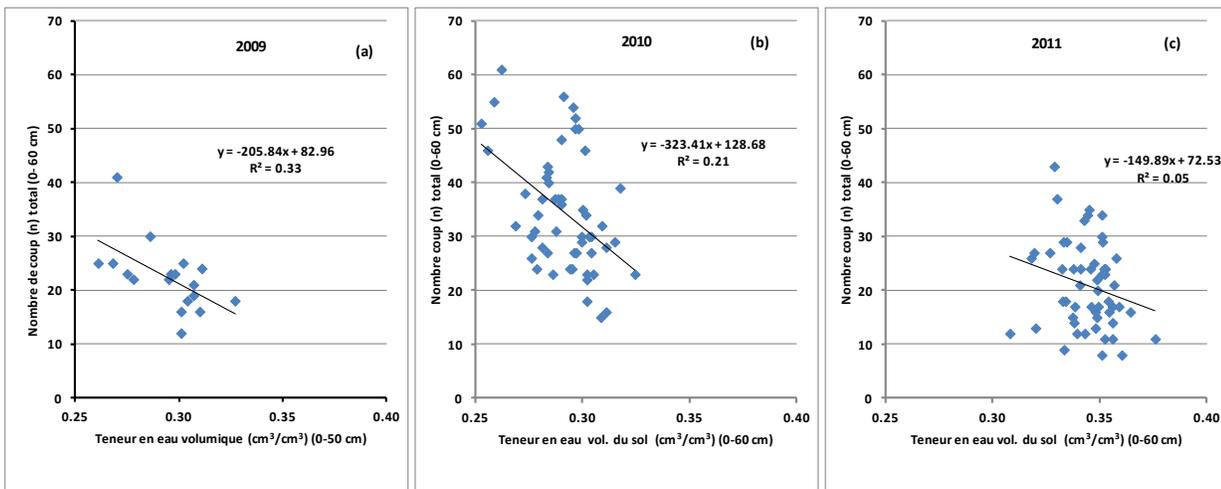


Figure 18: Relation entre la teneur en eau volumique et la résistance à l'enfoncement du cône exprimée en nombre de coups cumulés pour atteindre 60 cm de profondeur en 2009 (a), 2010 (b) et 2011 (c).

3.1.6 Propriétés chimiques du sol

2010

L'effet des différents traitements sur les propriétés chimiques du sol mesurées de 0 à 15 cm de profondeur le 16 septembre 2010 après la récolte du soya et de la luzerne sont présentées au Tableau 20 et au Tableau 21 en Annexe. Les traitements au niveau du sol (présence du drain agricole et sous-solage) semblent avoir affecté la teneur en matière organique et les teneurs en azote organique ou minéral du sol en surface. Le sol sur les drains semble présenter une teneur légèrement inférieure en matière organique et en azote total par rapport au témoin. Cette baisse de matière organique pourrait résulter du remaniement du sol en profondeur sur le drain ou des conditions plus oxydantes en raison d'une meilleure aération du sol à proximité du drain. Le sol dans les parcelles sous-solées semble présenter une teneur en azote minérale ($N-NH_4$ et $N-NO_3$) légèrement supérieure par rapport au témoin qui pourrait résulter des rendements quelque peu inférieurs (Tableau 6) sur ce traitement résultant dans des prélèvements inférieurs en N, laissant davantage de N résiduel au sol.

En 2010, le pH à l'eau du sol et les teneurs en Ca, Fe et K extraits à la solution Mehlich-3 semblent affectés par les traitements, principalement par l'effet du sous-solage et de la culture de luzerne. Le sous-solage a principalement affecté à la baisse la teneur en Ca_{M3} et à la hausse les teneurs en Fe_{M3} et K_{M3} , tandis que la présence de luzerne a permis d'augmenter ou de maintenir le pH à l'eau du sol et la teneur en Ca_{M3} . Une interaction entre l'espèce cultivée (luzerne vs soya) et le sous-solage par rapport au sol témoin a par ailleurs été détectée au niveau du pH et des teneurs en Ca_{M3} et Fe_{M3} . La parcelle sous-solée et cultivée en soya présentait un pH de sol (6,1) inférieur à la parcelle sous-solée en luzerne (6,5) et inférieur aux parcelles témoins de soya (6,4) ou de luzerne (6,5).

2011

L'effet des différents traitements sur les propriétés chimiques du sol mesurées de 0 à 15 cm de profondeur le 7 novembre 2011 après la récolte du maïs-grain sont présentées au Tableau 22 et au Tableau 23 en Annexe. La plupart des effets observés au niveau des propriétés de surface en 2010 le sont encore en 2011. Les traitements au niveau du sol (présence du drain agricole et sous-solage) semblent avoir affecté la teneur en matière organique et les teneurs en azote organique ou minéral du sol en surface. Le sol sur les drains semble présenter une teneur légèrement inférieure en matière organique et en azote total par rapport au témoin. Les effets du sous-solage ou de la présence du drain agricole sur la teneur en azote minérale ($N-NH_4$ et $N-NO_3$) en 2011 sont quelque peu moins perceptibles que ceux de 2010, mais suivent par la même logique. La présence du drain diminue quelque peu les teneurs en $N-NH_4$, mais affecte peu les teneurs en $N-NO_3$. Ces dernières semblent davantage affectées à la hausse par le précédent cultural de luzerne par rapport au soya, même après une culture de maïs-grain. L'interaction entre le précédent cultural de luzerne et la présence de drains ou l'effet du sous-solage est également significative (prob t = 0,01 et 0,06 respectivement). La teneur en $N-NO_3$ dans le sol était de 9 mg/kg dans les parcelles drainées sur retour de luzerne cultivée en 2010 et de 6,9 mg/kg dans les autres parcelles. Les performances du maïs-grain en 2011 expliqueraient peu les différences de teneurs en $N-NO_3$ en fin de saison de 2011, puisque les rendements n'étaient que peu affectés par les différents traitements Sol ou Précédents culturaux. Une meilleure performance de la luzerne sur les drains agricoles en 2010 (prob t = 0,16) aurait toutefois pu favoriser un plus grand reliquat d'azote en provenance des résidus de cette culture qui expliquerait les teneurs en $N-NO_3$ plus élevées en fin de saison de 2011 (Tableau 6).

En 2011, les principaux effets sur les teneurs en éléments extraits à la solution Mehlich 3 étaient reliés au sous-solage ou à la luzerne comme précédent cultural. Dans les parcelles sous-solées, les teneurs en K_{M3} et Fe_{M3} étaient plus élevées que dans les parcelles témoins, tandis que les teneurs en Ca_{M3} et Mg_{M3} étaient plus faibles. Dans les parcelles sous précédents de luzerne, les teneurs en K_{M3} et P_{M3} étaient plus élevées que sous précédents de soya avec ou sans radis huileux l'automne précédent. Les teneurs plus élevées en $N-NO_3$, P_{M3} et K_{M3} sous précédent luzerne pourraient en partie résulter de la fertilisation de démarrage qu'elle a reçue à deux occasions en automne 2009 et au printemps 2010, mais ces effets n'étaient pas perceptibles sur le sol en automne 2010, sauf pour le $N-NO_3$. Contrairement à 2010, le pH du sol ne semble pas affecté par les

différents traitements. Malgré une légère tendance à la baisse du pH dans les parcelles sous-solées en 2010 et en 2011, cette tendance n'est pas très significative (prob t = 0,12 en 2010 et 2011). Le sous-solage peut acidifier le sol en surface en remontant du sol plus acide des horizons plus en profonds. L'augmentation significative du pH sous l'effet de la culture de luzerne observée en 2010, ne l'est plus en 2011.

3.1.7 Bilan économique

Les coûts des interventions de sous-solage et les coûts rattachés aux semis de radis huileux et de luzerne sont compilés au Tableau 11. Le rendement de la sous-soleuse (bulldozer de marque Dresser Inter de 225 HP à 3 dents) sur le site a varié de 0,4 ha/h à 1,2 ha/h et la vitesse d'avancement a varié de 1,1 à 3,7 km/h dépendant du ralentissement causé par le nombre de virage en fin de course et le degré de compaction du sol. Brochu (1986) a rapporté des rendements plus rapides de l'ordre 1,3 à 1,8 ha/h pour des vitesses d'avancement de 3,3 à 4,4 km/h respectivement. L'AGDEX 740/825 (CRAAQ 2010) prévoit quant à lui un rendement variant de 1,3 à 1,7 ha/h pour une sous-soleuse à 3 ou 5 dents respectivement. Le coût forfaitaire de la sous-soleuse dans notre essai (175 \$/h) est également supérieur à celui prévu par l'AGDEX 740/825, soit de 73 à 94 \$/h selon le type de sol (loam ou argile) pratiquement les mêmes que ceux rapportés par Brochu (1986), soit de 71 à 93 \$/h.

Tableau 11 : Coût des interventions de sous-solage (bulldozer à trois dents) et des cultures utilisées pour remédier à la compaction

| | | | | Coût à l'hectare |
|----------------------|---------------------------|------|----------|------------------|
| | | | | \$/ha |
| Sous-solage | Rendement | 1,20 | ha/h | |
| | Coût forfaitaire | 175 | \$/h | |
| | | | | 146 |
| Radis huileux | Prix de la semence | 220 | \$/25 kg | |
| | Taux de semis | 16 | kg/ha | |
| | Semence | | | 141 |
| | Semis direct [†] | | | 68 |
| | Total | | | 209 |
| Luzerne | Prix de la semence | 260 | \$/25 kg | |
| | Taux de semis | 17 | kg/ha | |
| | Semence | | | 177 |
| | Semis direct [†] | | | 68 |
| | Total | | | 245 |

[†] Coût du travail à forfait de semis direct de céréales et de graines fourragères basé sur l'AGDEX 740/825 (CRAAQ 2010)

Même si les coûts de nos travaux de sous-solage ont été relativement élevés par rapport à aux coûts généralement prévus (CRAAQ, 2010), les coûts associés à l'implantation d'un engrais vert de radis huileux ou l'inclusion de la luzerne étaient aussi élevés. Par ailleurs, les coûts de ces cultures n'incluent pas les coûts des engrais minéraux employés dans nos essais, car un producteur aurait aussi pu utiliser à moindre coûts des engrais de

ferme pour démarrer ou fertiliser ces cultures. Par contre, les taux de semis relativement élevés pour le radis huileux et les coûts plus élevés reliés au semis direct de ces cultures pourraient légèrement surestimer les coûts de ces interventions.

À titre de comparaison, nous avons calculé les augmentations de rendement de différentes cultures qu'il aurait fallu obtenir au moins une année pour rentabiliser les interventions en sous-solage ou les cultures de radis huileux ou de luzerne utilisées (Tableau 12). Par ailleurs, il est difficile de calculer les pertes ou les gains de revenus occasionnés par le remplacement de la culture de soya par celle de la luzerne en deuxième année, parce que ces deux cultures ont été récoltées hâtivement à la fin du mois d'août sous forme de fourrage.

Tableau 12 : Augmentation nécessaire de rendement de différentes cultures selon les prix du marché de 2012 pour rentabiliser les interventions de sous-solage ou les cultures de radis huileux ou de luzerne.

| | Coût à l'hectare (\$/ha) | | | |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------|---------|-----|
| | Sous-solage | Radis huileux | Luzerne | |
| | 139 | 209 | 235 | |
| Augmentation nécessaire de rendement | | | | |
| | \$/tm [†] | tm | | |
| maïs | 285 | 0,5 | 0,7 | 0,9 |
| soya | 525 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| blé | 310 | 0,5 | 0,7 | 0,8 |
| avoine | 260 | 0,6 | 0,8 | 0,9 |

† Prix à la ferme pour livraison immédiate (aperçu) d'après Grainwiz.com (déc. 2012).

Sur l'ensemble des parcelles en 2011, le rendement moyen du maïs a varié de 6,5 à 7,5 tm /ha (14,5 %HR), soit une variation d'une tonne métrique à l'hectare, en fonction de la masse volumique apparente mesurée de 150 à 300 mm ou de la teneur en matière organique dans le sol (MOS) de 0 à 150 mm (données non présentées). Pour le soya et la luzerne en 2010, la biomasse aérienne a varié de 2 à 4,5 tm MS/ha, soit de 2,5 tm MS/ha en fonction de la MVA et de façon moindre en fonction de la MOS (données non présentées). Malgré les effets non significatifs des interventions de sous-solage combinées à des cultures à racines profondes sur la productivité des cultures dans ce projet, la variation de rendements observée nous renseigne sur le potentiel de rentabilité de ces interventions si elles parvenaient à corriger certaines propriétés qui semblent liées à la productivité du sol, soit la compaction du sol, indiquée par une MVA plus élevée entre 150 et 300 mm de profondeur, ou la baisse de MOS de 0 à 150 mm. Ainsi le sous-solage trouverait sa rentabilité dès la première année et plus rapidement que les engrais verts, s'il réussissait à augmenter de 0,3 à 0,6 tm/ha les rendements de la plupart des grandes cultures (Tableau 12). Aussi les travaux de sous-solage pourraient être réalisés à moindres coûts selon l'offre de sous-soleuses disponibles sur le marché. L'usage de cultures à racines profondes seules pour palier à des problèmes de compaction semble toutefois plus coûteux et moins probable comme intervention qui puisse réduire la compaction en profondeur dans le sol, mais elle pourrait jouer un rôle pour augmenter la teneur en MOS. Aussi, le choix des semences, les taux de semis ainsi que les travaux

de semis réalisés dans notre projet pourraient être revus afin d'abaisser les coûts de cette intervention et justifier sa rentabilité.

3.2 Discussion

De nombreuses études réalisées en climat plus aride qu'au Québec rapportent des effets positifs de la pratique du sous-solage sur les propriétés des sols et le rendement des cultures (Abu-Hamdeh, 2003; Raper et Bergtold, 2007). À l'inverse, plusieurs études réalisées en climat humide rapportent des effets mitigés du sous-solage (Olesen et Munkholm, 2007; Henriksen et al., 2007; Brochu, 1986; Bernier, 1986; Plante, 1986). En climat sec, le sous-solage permet aux plantes d'approfondir leur profil racinaire là où l'eau est davantage disponible (Raper et Bergtold, 2007). Toutefois, si l'eau est suffisamment disponible aux plantes en surface, l'approfondissement du profil racinaire par le sous-solage et les effets sur les rendements risquent d'être mitigés (Raper et Bergtold, 2007; Batey, 2009). Ces effets ont été constatés en conditions sèches en annihilant l'effet du sous-solage sur les rendements avec l'irrigation. En climat humide, la compaction a pour effet de réduire l'aération et la respiration racinaire lorsque le sol est saturé en eau. Des conditions de sol saturé sont plus fréquentes et dommageables à la culture au printemps au moment des semis et même après en juin et juillet, dépendamment des régions et des patrons de précipitations. Pour diminuer ces conditions de sol saturé, le sous-solage doit pouvoir favoriser un meilleur drainage de l'eau en profondeur. La nature du sol et le type d'horizon compacté peuvent ainsi influencer l'effet qu'aura le sous-solage sur les conditions de sol saturé. Par exemple, le sous-solage d'un horizon induré dans un sol sableux perméable en profondeur devrait permettre à l'eau de s'infiltrer et de se drainer en profondeur, alors qu'un sol ayant une faible perméabilité en profondeur ne favorisera pas un drainage efficace de l'eau dans un sillon sous-solé à moins qu'il y ait écoulement vers le drain ou dans une pente. Plusieurs types de sols peuvent présenter une faible perméabilité en profondeur avec des textures très variables allant du loam sableux issu de till à l'argile lourde issue de dépôts marins ou lacustres. Du moment que la structure est massique en profondeur et qu'elle offre peu de perméabilité, les chances de succès du sous-solage pourraient être mitigés. On remarque ainsi davantage de succès du sous-solage en sol sableux plus perméables que dans les sols plus lourds (Raper et Bergtold, 2007; Abu-Hamdeh, 2003).

Plusieurs auteurs rapportent aussi l'importance de sous-soler en conditions de sol sec pour assurer la friabilité du sol et augmenter la fissuration de la zone compacte. Toutefois peu d'études permettent de comparer l'effet de différents teneurs en eau dans le sol sur l'efficacité du sous-solage. Raper et Sharma (2004) ont conclu dans un loam sableux que seul le sous-solage (à 33 cm de profondeur) en conditions très sèches (6% de teneur en eau volumique) conduisait à une plus grande surface de sol dérangée, par rapport aux autres conditions d'humidité du sol (8 à 16% de TEV). Dans une autre étude portant sur trois sols de textures contrastantes, la surface verticale de sol affectée par le sous-solage (à 45 cm de profondeur) diminuait avec la teneur en eau du sol et augmentait avec la présence d'argile (Sasaki et al., 2007). L'effet de la teneur en eau

était particulièrement important dans le sol argileux : à une teneur en eau de $0,32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (près de la capacité au champ, $-0,01 \text{ Mpa}$), 16% de la surface de sol était affectée, tandis qu'à $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (près du point de flétrissement, $-1,5 \text{ Mpa}$), jusqu'à 22% de la surface de sol était affectée.

Dans l'étude en cours, le sol s'est formé dans un dépôt de sable très fin, de limon et d'argile et présente une structure massique de plus en plus compacte en profondeur. Selon la littérature, le sous-solage dans ce type de sol serait plus efficace, lorsque sa teneur en eau approche celui du point de flétrissement ($-1,5 \text{ MPa}$). Le 24 septembre 2008, soit cinq jours avant le passage de la sous-soleuse, la teneur en eau du sol était de $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (de 0 à 60 cm de profondeur), soit plus près de la capacité au champ ($-0,01 \text{ MPa}$). Le sous-solage n'aura pas été réalisé dans les conditions les plus optimales. Divers travaux de terrain et d'échantillonnage devaient être réalisés avant de procéder et le sol n'était plus assez sec au 29 septembre 2008 pour favoriser une fissuration maximale du sol. Les plus faibles teneurs en eau mesurées à ce jour ont été de l'ordre de $0,24 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ à la fin du mois d'août 2010, après un été relativement sec. En 2009, même si le mois de septembre était relativement sec, la teneur en eau dans le sol était de $0,31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ le 15 septembre. Ainsi les conditions de sol sec idéales pour sous-soler ce type de sol ont été relativement rares à l'automne durant notre étude. Des conditions plus sèches sont plus susceptibles de se produire après une récolte de céréale durant le mois d'août. Le sous-ensemencement d'une prairie de trèfle grainée ou le semis d'un engrais vert permettrait aussi d'augmenter l'évapotranspiration et de réduire la teneur en eau du sol à cette période.

Ainsi, le rendement des cultures, une mesure importante de la productivité du sol, n'a été que très peu influencé par le sous-solage. Au début des essais, le sous-solage a même produit des baisses de rendement en orge en 2009 par rapport au témoin et surtout par rapport à la parcelle drainée, probablement en raison des ornières créées par les passages subséquents de la machinerie. En 2010, ces baisses de rendements semblaient encore perceptibles dans le soya et dans la luzerne. En 2011, les rendements en maïs-grain semblaient finalement s'améliorer sous l'effet du sous-solage, mais sans être significatifs. Selon les mêmes tendances, la densité racinaire du maïs-grain semblait aussi plus importante de 15 à 45 cm de profondeur, sous l'effet du sous-solage, mais encore là ces effets ne sont pas significatifs.

Le sous-solage aura aussi produit des effets contradictoires sur les propriétés physiques des sols. Au niveau de la résistance à l'enfoncement d'un cône, le sous-solage aurait réduit cette résistance entre 15 et 45 cm de profondeur, mais au niveau de la masse volumique apparente, le sous-solage n'aura produit aucun effet significatif sinon une augmentation de la MVA et une diminution de la capacité d'air entre 22,5 et 30 cm de profondeur. L'observation des profils de sol en 2010 et 2011 révèle quant à elle un ameublissement du sol de 45 à 60 cm de profondeur sur 20 cm de large à l'endroit du passage de l'écran de la sous-soleuse réalisé en 2008. Pour capter ces effets par des mesures physiques, il aurait fallu intensifier la prospection de part et d'autres du passage de la sous-soleuse ou du drain agricole. La réalisation de mesures de résistance au pénétromètre sur quelques transects perpendiculaires au passage de la sous-soleuse ou

drain agricole en 2011 a permis de mieux cerner l'effet de ces travaux sur le sol, mais la réalisation de tels travaux sur l'ensemble des parcelles aurait été trop coûteux et irréalisable en termes de temps.

Les facteurs qui peuvent expliquer les effets mitigés du sous-solage dans cet essai sont reliés à la nature du sol, sa condition de plasticité au moment du sous-solage ainsi que le sens dans lequel les travaux ont été réalisés par rapport aux drains et au trafic de la machinerie. Lorsque le sol présente une couche compacte relativement délimitée dans le profil et que la perméabilité du sol sous cette couche est relativement bonne (un bon drainage interne), la fissuration du sol par le sous-solage conduira l'eau vers des horizons inférieurs plus perméables. Toutefois, dans les sols dont la perméabilité ou la conductivité hydraulique est naturellement réduite en profondeur, le sous-solage risque d'être compromis si l'eau s'accumule dans le sillon sous-solé sans trouver d'exutoire. En effet, dans les conditions de climat humide du Québec, il est fort probable que le sillon sous-solé se retrouve constamment saturé en eau au printemps et à l'automne et sensible aux travaux, si l'eau ne trouve pas d'exutoire en profondeur. Ainsi, en présence de drains agricoles, il est généralement recommandé de sous-soler le champ dans un angle 20 à 30 degrés par rapport à ces drains pour acheminer l'eau vers un exutoire (Ménard et al., 2011). Plusieurs types de sol peuvent souffrir d'un mauvais drainage interne dont la texture peut varier des argiles lourdes et mal structurées aux loams sableux issus de tills, en passant par les loams argileux et limoneux. Les travaux de sous-solage réalisés dans des conditions de sol humide peuvent également exacerber les problèmes de drainage interne de certains sols en lissant le sol le long du passage de l'étauçon (Plante, 1986). Dans les sols mal drainés et en absence de drains, il serait pertinent de sous-soler en fonction de la pente du terrain pour drainer l'eau du sillon vers un exutoire. Toutefois, le Guide des pratiques de conservation en grandes cultures recommande de ne pas sous-soler dans le sens de la pente afin 'éviter un écoulement préférentiel de l'eau en bas de pente (Brochu et Massicotte, 2000). En dernier lieu, les travaux devraient s'orienter en biais par rapport au sens habituel du trafic de la machinerie afin de prévenir un passage systématique des roues sur les raies sous-solées rendues plus sensibles à la formation d'ornières. Dans nos essais au printemps suivant l'opération de sous-solage, le passage de la machinerie a créé des ornières sur les raies de sous-solage qui étaient encore perceptibles l'année suivante. Ces ornières ont pu annihiler les effets escomptés par le sous-solage au niveau de l'amélioration du profil et de la productivité du sol. D'ailleurs, les rendements ont été particulièrement affectés à la baisse dans l'orge en première année d'essai après le sous-solage.

Tel que déjà mentionné, l'état hydrique du sol ou de sa plasticité conditionne l'efficacité du sous-solage, particulièrement dans les sols plus argileux. Un sol trop humide aura tendance à maintenir une condition plastique qui aura pour effet de lisser le sol lors du passage des étaçons dans le sol. En condition plus sèche et surtout moins plastique, le sol se fissure davantage entre les étaçons et le masse de sol se fractionne en blocs de différentes grosseurs procurant l'effet escompté pour favoriser l'infiltration de l'eau et le développement racinaire des cultures (Lamarre, 2010).

L'efficacité des plantes à racines profondes ou décompactantes a également été remise en question dans nos essais. Il est reconnu que la capacité d'élongation racinaire des plantules ou la capacité de pénétration des racines de plantes dans des milieux compacts varient entre espèces et en général les dicotylédones offrent de meilleures performances que les monocotylédones (Materchera et al., 1991; Löfkvist, 2005). Les dicotylédones comme le lupin (*Lupinus luteus* L.), la luzerne (*Medicago sativa* L.), la chicorée (*Cichorium intybus* L.), mais aussi la fétuque élevée (*Festuca arundinacea* L.), une monocotylédone, présentaient les meilleures performances pour pénétrer des couches compactes et améliorer la conductivité hydraulique des sols (Löfkvist, 2005). Le radis fourrager et le radis huileux, des variétés de *Raphanus sativus* sont aussi présentés comme des plantes capables de décompacter le sol (Williams et al., 2004; Weil et al., 2010; Chen et al., 2010). En général, les crucifères possèdent plusieurs attributs intéressants comme engrais verts, soit une croissance rapide à l'automne, même en conditions plus froides, une bonne capacité de production de biomasse et une racine pivotante principale bien développée, leur conférant un bon potentiel lorsque combiné à des travaux de sous-solage. La capacité des plantes à pénétrer des zones compactes dans le sol est tout de même limitée. Or, même pour les espèces les plus intéressantes, lorsque les conditions de croissance sont limitées par un excès d'eau ou des conditions asphyxiantes au niveau de la couche compacte ou encore par une barrière résistante à la pénétration des racines, la pénétration des racines en profondeur dans le sol est limitée (Chen et al., 2010). Par contre, en combinaison avec des travaux de sous-solage ou d'ameublissement du sol, certaines espèces comme le radis fourrager dont la croissance est rapide et la racine pivotante bien développée, seraient à privilégier pour rapidement coloniser cette zone ameublie.

Par ailleurs, plusieurs études québécoises ont démontré l'effet de la matière organique, des résidus de cultures et des successions culturales pour accroître la résistance du sol à la compaction et améliorer l'agrégation et la structure des sols (Angers et Simard, 1986; N'dayegamiye, 1995). Certaines études ont toutefois davantage fait ressortir les effets bénéfiques des cultures pérennes comme les prairies et les luzernières pour augmenter la stabilité structurale et la perméabilité des sols (Elustondo et al., 1990; Raimbault et Vyn, 1991; Reynolds et al., 1995), alors que les cultures d'engrais verts sont généralement de courte durée et produisent moins d'effets sur la structure et la matière organique du sol. L'inclusion d'un engrais vert dans la rotation est souvent limitée à l'automne ou après une récolte de céréales au mois d'août, période vers laquelle le sol est plus souvent assez sec pour procéder au sous-solage.

Dans nos essais, le radis huileux a été semé le 1^{er} septembre 2009 après la récolte d'orge, mais les conditions de sécheresse qui ont prévalu par la suite, de même que la courte saison de croissance avant les premiers gels importants, n'ont pas permis au radis une grosse production de biomasse, ni un développement important de son système racinaire. Ce traitement n'aura pas produit d'effets bénéfiques significatifs ni sur les propriétés des sols ni sur les rendements. Seule une augmentation de la masse volumique et une diminution de la teneur en air a été notée en automne 2010, possiblement reliées au passage additionnel de machinerie pour le semis de l'engrais vert en août 2009. La luzerne, même si elle a bénéficié d'une année complète pour sa

croissance n'a pas non plus produit d'importants effets sur les rendements en maïs-grain en 2011 ou les propriétés des sols par rapport à la culture témoin de soya. Cette culture a quelque peu affecté à la baisse la teneur en eau du sol en 2010, ce qui a probablement augmenté la résistance à l'enfoncement du cône durant la même année. L'interaction entre les traitements sur le sol (sous-solage et drains agricoles) et les traitements précédents culturaux n'aura pas non plus produit les effets escomptés en raison des effets relativement mitigés des traitements de base. Le semis du radis huileux à la fin de l'été aurait même eu un effet négatif en 2010 sur la masse volumique et la réserve en air du sol dans les parcelles drainées par rapport aux parcelles témoins sans engrais verts et non drainées. Par contre, La combinaison du sous-solage et de la luzerne aurait amélioré la masse volumique apparente du sol en 2010 par rapport à l'emploi de l'un de ces deux traitements seulement.

4 CONCLUSIONS

Le projet visait à déterminer et à mesurer les effets bénéfiques combinés du sous-solage et des cultures à racines profondes pour décompacter le sol et améliorer la productivité des cultures. Le projet a permis de constater que le sous-solage réalisé dans des conditions non-optimales pouvait à court terme réduire le rendement des cultures, en particulier l'orge en première année en 2009 et même nuire à certaines propriétés physiques du sol en surface. Les résultats peu éloquentes sont en partie une conséquence des conditions météorologiques particulièrement pluvieuses qui ont prévalu en septembre 2008 avant le passage de la sous-soleuse. Les effets du sous-solage sur la culture de la luzerne ou du soya en deuxième année étaient également mitigés.

Toutefois, un ameublissement du sol en profondeur par le sous-solage persistait encore après 3 ans, ce qui aurait permis de maintenir sinon augmenter les rendements en maïs-grain en 2011. Éventuellement, à moyen terme cet ameublissement du sol en profondeur pourrait améliorer la productivité du sol. Le champ choisi et la façon d'établir le dispositif expérimental ont également permis de mettre en relief l'effet du drainage artificiel sur l'amélioration des conditions du sol et du rendement des cultures. Le sol est relativement compact de part et d'autre de la zone travaillée du sol où a été installé le drain agricole et cette compaction en dessous de 30 cm de profondeur qu'elle soit d'origine anthropique ou naturelle ralentit la perméabilité et l'écoulement de l'eau en profondeur, ainsi que la disponibilité de l'air aux racines. Suite aux effets mitigés du sous-solage et des conditions de saturation en eau observées dans le sillon sous-solé, il est apparu important de planifier par quel exutoire l'eau s'écoulera des raies sous-solées. Ainsi certains types de sol pourraient ne pas tant bénéficier d'une opération de sous-solage en raison de leur mauvais drainage interne. Le lissage du sol créé au moment du sous-solage en conditions de sol humides a également pu exacerber l'imperméabilité du profil.

Des modifications au présent projet avaient été envisagées en septembre 2010 afin de repasser la sous-soleuse sur la moitié des parcelles. Or, dès le début du mois de

septembre 2010, les précipitations avaient été relativement abondantes, retardant et finalement annihilant la possibilité de sous-soler dans des conditions de sol plus sèches. À la suite du présent projet CDAQ qui s'est terminé à la fin de 2011, une culture d'orge a été semée en 2012, ce qui a permis de sous-soler en août 2012 la moitié des parcelles perpendiculairement au sens des parcelles et des drains, et dans des conditions plus sèches que celles rencontrées en septembre 2008.

Malgré les effets mitigés observés, nous persistons à croire que le sous-solage peut conduire à des améliorations notables des conditions de productivité du sol, malgré que certains types de sols ou conditions de sol puissent moins s'y prêter. Ainsi, un nouveau projet a été déposé et accepté dans le cadre du programme Prime-Vert 8.4 du MAPAQ afin de démontrer que le sous-solage, lorsqu'il est réalisé sous les bonnes conditions peut améliorer significativement la productivité du sol et des cultures. En août 2012, une dizaine de sites ont été mis en place chez autant de producteurs de la région de Chaudière-Appalaches et seront suivi par les conseillers et conseillères de Club-conseils en agroenvironnement. Avec un plus grand nombre d'essais et de conditions édaphiques et de travail du sol, les résultats devraient permettre de faire ressortir certains des éléments qui conditionnent la réussite d'une telle opération.

Les effets des cultures à racines profondes ont aussi été relativement mitigés. La croissance et le développement d'une culture semée après la mi-août est relativement limité dans les régions de la Capitale et de Chaudière-Appalaches. De plus, contrairement à certaines idées préconçues, la plupart des plantes cultivées ont une capacité limitée à pénétrer des zones compactes ou limitées par un manque d'air ou un manque de porosité pour favoriser les échanges gazeux. Les plantes pourraient toutefois jouer un rôle important pour coloniser avec leurs racines les zones ameublées par le travail de la sous-soleuse. À cet égard, certaines crucifères auraient un potentiel de croissance plus rapide en fin de saison en présence de suffisamment de chaleur, d'eau (mais sans excès) et de nutriments. Dans les régions plus limitées en termes de chaleur à l'automne, des travaux devraient être entrepris pour sélectionner des cultures/engrais verts et des pratiques culturales qui permettent une croissance importante des cultures après les travaux de sous-solage. Lorsque le sol est relativement moins bouleversé par la sous-soleuse, les travaux pourraient se réaliser dans une couverture de plantes pérennes ou de cultures plus résistantes aux travaux de sous-solage, de façon à allonger la période de croissance. La présence d'un couvert végétal actif avant le passage de la sous-soleuse peut également servir à assécher le sol et améliorer l'efficacité du sous-solage par rapport à un sol laissé à nu sur lequel le potentiel d'évapotranspiration demeure plus faible. Ce qui peut toutefois paraître paradoxale si le sol souffre de compaction et limite la croissance des plantes. Néanmoins, si les problèmes de compaction sont si prononcés qu'ils hypothèquent sérieusement le rendement des cultures, il pourrait être pertinent de sacrifier une année de récolte pour réaliser les travaux plus rapidement en cours de saison et favoriser la croissance des engrais verts et des couvertures végétales.

5 RÉFÉRENCES

- Abu-Hamdeh, N.H. 2003. Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1213–1219.
- Angers, D.A. et R.R. Simard, 1986. Relations entre la teneur en matière organique et la masse volumique apparente du sol. *Can. J. Soil Sci.* 66 :743-746.
- Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management.* 25 : 335–345
- Bernier, R. 1986. Résultats préliminaires de décompaction par sous-solage suite à des travaux de drainage de surface. pp. 109-138. 13^e Colloque de génie rural. Université Laval. R. Thériault (éd.). 220 p.
- Brochu, Y. 1986. Résultats préliminaires de décompaction par sous-solage en sols drainés souterrainement. pp. 69-108. 13^e Colloque de génie rural. Université Laval. R. Thériault (éd.). 220 p.
- Brochu Y. et D. Massicotte. 2000. Module 7. Diagnostic et correction des problèmes de compaction et de drainage. Feuillet 7A. *Dans Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Entente auxiliaire Canada-Québec pour un environnement durable en agriculture, CPVQ, FPCCQ, MAPAQ, MENV, AAC.* Québec. 20 p.
- Chen, G. et R. R. Weil. 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil* : 331: 31–43.
- Culley, J.L.B. 1993 Chapter 50 Density and compressibility. Pp 529-539. *In Soil sampling and methods of analysis.* M.R. Carter, Éd. Canadian society of soil science. Lewis Publishers.
- Elustondo, J. D.A. Angers, M.R. Laverdière et A. N’dayegamiye, 1990. Étude comparative de l’agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Can. J. Soil Sci.* 70 : 395-402.
- Henriksen, C.B., J.P. Mølgaard, J. Rasmussen. 2007. The effect of autumn ridging and inter-row subsoiling on potato tuber yield and quality on a sandy soil in Denmark. *Soil and Tillage Research* 93 : 309–315.
- Herrick, J.E. et T.L. Jones. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1320–1324.
- Löfkvist, J. 2005. *Modifying Soil Structure Using Plant Roots.* Thèse de Doctorat. Uppsala, Suède.
- Materechera, S.A., A.R. Dexter et A.M. Alston. 1991 Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant and Soil.* 135: 31-41, 1991.

- Ménard, M., G. Lamarre, V. Savoie et B. Côté. 2011. Automne pluvieux, sur les traces de la compaction. *Grandes cultures*. Mars 2011. 23 :26.
- Michaud, A. 1995. Production de maïs et qualité du sol. Conférence présentée dans le cadre du colloque sur le maïs-grain. Les 29 et 30 novembre 1995. Saint-Hyacinthe, CPVQ. 229 p.
- N'dayegamiye. 1995. Effet de l'apport de fumier et de fumure minérale sur la production de maïs-ensilage et du blé et du bilan humique dans un loam argileux de la série Le Bras. *Agrisol* 8 (1) , p.23-30.
- Negi, S.C., E. McKyes G.S. Raghavan, et F. Taylor, 1981. Relationships of field traffic and tillage to corn yields and soil properties. *J. Terramechanics*, 18: 81-90.
- Ngunjiri, G.M., et J.C. Siemens. 1993. Tractors wheel traffic effects on corn growth. ASAE Paper No. 93-110. Am. Soc. of Agric. Engineers, St. Joseph, MI.
- Olesen, J.E. et L.J. Munkholm. 2007. Subsoil loosening in a crop rotation for organic farming eliminated plough pan with mixed effects on crop yield. *Soil and Tillage Research* 94 : 376-385.
- Plante, J. 1986. Effets du sous-solage en sols non drainés. pp. 139-148. 13^e Colloque de génie rural. Université Laval. R. Thériault (éd.). 220 p.
- Raimbault, B.A. et T.J. Vyn. 1991. Crop rotation on corn growth and soil structural stability. *Agron. J.* 83 : 979-985.
- Raper, R. L. et A. K. Sharma. 2004. Soil moisture effects on energy requirements and soil disruption of subsoiling a coastal plains soil. *Transactions of the ASAE* 47(6): 1899-1905.
- Raper, R. L. et J. S. Bergtold. 2007. In-row subsoiling: a review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *Appl. Eng. in Agric.* Vol. 23(4): 463-471.
- Reynolds, W.D., E.G. Gregorich et D.E. Elrick. 1995. Corn cropping and soil structure. AAFC 11th annual corn research day. 14 sept. 1995. Ottawa.
- Sasaki, C.M., Gonçalves, J.L.M. et A.P. da Silva. 2007. Ideal subsoiling moisture content of Latosols used in forest plantations. *Forest Ecology and Management*. 243: 75-82.
- SAS Institute Inc (2003). SAS/STAT® User's guide, Version 9.1. Cary, NC.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, G.A. Bollero, D.G. Bullock et W.J. Wiebold. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agron. J.* 95:472-482.

- Tardieu, F. et H. Manichon. 1986. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. I. Discussion des critères d'étude. *Agronomie* 6 : 345-354.
- Williams, S. et R. Weil. 2004. Brassica cover crop root channels may alleviate soil compaction effects on subsequent soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1403-1409
- Weil, R. C. White, Y. Lawley. 2010. Forage Radish: New Multi-Purpose Cover Crop for the Mid-Atlantic. Fact Sheet 824. Maryland Cooperative Extension, University of Maryland. 8 p.

6 REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la contribution financière du Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire (PASCAA). Ce programme d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) est livré par l'intermédiaire du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ).

Nous tenons aussi particulièrement à remercier Marie-Hélène Perron, Michel Lemieux, Audrey Ouellet, Caroline Dufour-L'Arrivée, Guillaume Létourneau et Alain Soucy qui ont réalisé les mesures et les observations de terrain, de même que l'ensemble des ouvriers de la station expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon dirigée par Michel Noël. Nous voulons aussi remercier Athyna Cambouris et Jean-Marc Deschênes d'Agriculture et Agroalimentaire Canada pour le relevé de terrain de la conductivité électromagnétique avec la sonde Veris 3100 en début de projet. Nous voulons également remercier Louis Robert (MAPAQ) de même que Luc Belzile (FPCCQ) pour leurs commentaires apportés lors de la production des rapports.

6.1 Diffusion des résultats

| Activités prévues de L'ANNEXE A | Activités réalisées | Description (Thème, titre, endroit, etc.) | Date de réalisation | Nombre de personnes rejointes | Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention) |
|--|---|--|------------------------------|-------------------------------|---|
| Journées portes ouvertes organisées par le MAPAQ | Journée Portes ouvertes pour agriculteurs et conseillers | Station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon | 19 août 2009 | 130 | Logos sur poster et dans rapport |
| | Journée Portes ouvertes pour agriculteurs et conseillers | Station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon | 18 août 2010 | 150 | Logos sur poster et dans rapport |
| Journées portes ouvertes organisées par l'IRDA | Journée de formation pour les étudiants en agronomie de l'Université Laval | Station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon | 11 sept. 2009 | 90 | Logos sur poster et dans rapport |
| Article de vulgarisation | Remplacé par des présentations orales | | | | |
| Article scientifique | Pas nécessairement pertinent en raison du manque de résultats concluants | | | | |
| | Présentations orales devant une assemblée de conseiller et de producteurs agricoles | INPACQ (innovation et progrès en agroalimentaire au Centre-du-Québec), Nicolet | 1 ^{er} février 2012 | 250 | Logos et mention lors de la présentation powerpoint |
| | Présentations orales devant une assemblée de conseiller et de producteurs agricoles | Assemblée annuelle du Club Optisol de Montmagny, Montmagny | 21 mars 2012 | 50 | Logos et mention lors de la présentation powerpoint |

7 HISTOIRE D'UNE RÉUSSITE

La compaction des sols affecte les rendements de la plupart des grandes cultures au Québec. Plusieurs solutions sont mises de l'avant pour pallier à ce problème, mais peu d'essais combinant le sous-solage et l'utilisation d'engrais verts permettent de valider ces techniques ou de quantifier leur contribution à l'amélioration des rendements. Le projet a été mis en place pour vérifier l'effet du sous-solage combiné à un engrais vert de radis huileux ou une culture de luzerne pour améliorer à moyen terme les propriétés des sols et les rendements des cultures d'orge, de soya et de maïs-grain. Les conditions de réalisation du sous-solage à l'automne 2008 de même que celles pour l'implantation des engrais verts à l'automne 2009 n'ont pas été optimales et ont produit des résultats relativement mitigés sur l'ensemble des indicateurs mesurés au niveau des propriétés des sols et des rendements. L'analyse des résultats a cependant mis en lumière certains facteurs pouvant limiter les bénéfices et la rentabilité d'une telle intervention, tels que l'état hydrique du sol au moment du sous-solage, le drainage interne du sol et l'orientation des sillons par rapport aux drains et la pente du terrain. Elle a également permis de constater l'état compact et massique du sol en profondeur ainsi que son influence sur les rendements. Ces résultats ont été rapportés à plusieurs occasions lors de journées portes-ouvertes et de conférences, et ont suscité beaucoup d'intérêt de la part des producteurs et des conseillers. Ces travaux devraient avoir sensibilisé les acteurs aux effets de la compaction sur les rendements, de même que les effets bénéfiques limités du sous-solage, lorsque les conditions de sol et les pratiques ne sont pas optimales. D'ailleurs une dizaine de producteurs de la région de Chaudière-Appalaches ont décidé de participer à un nouveau projet visant à démontrer le potentiel d'accroître la productivité de sols compacts par le sous-solage. Les conseillers et les producteurs étaient tous sensibilisés à l'importance de sous-soler dans les conditions optimales pour fracturer les sols et d'inclure des engrais verts. Certains facteurs limitant dont le drainage interne du sol et l'orientation des travaux de sous-solage seront aussi pris en considération dans l'analyse des résultats de ce nouveau projet.

8 ANNEXES

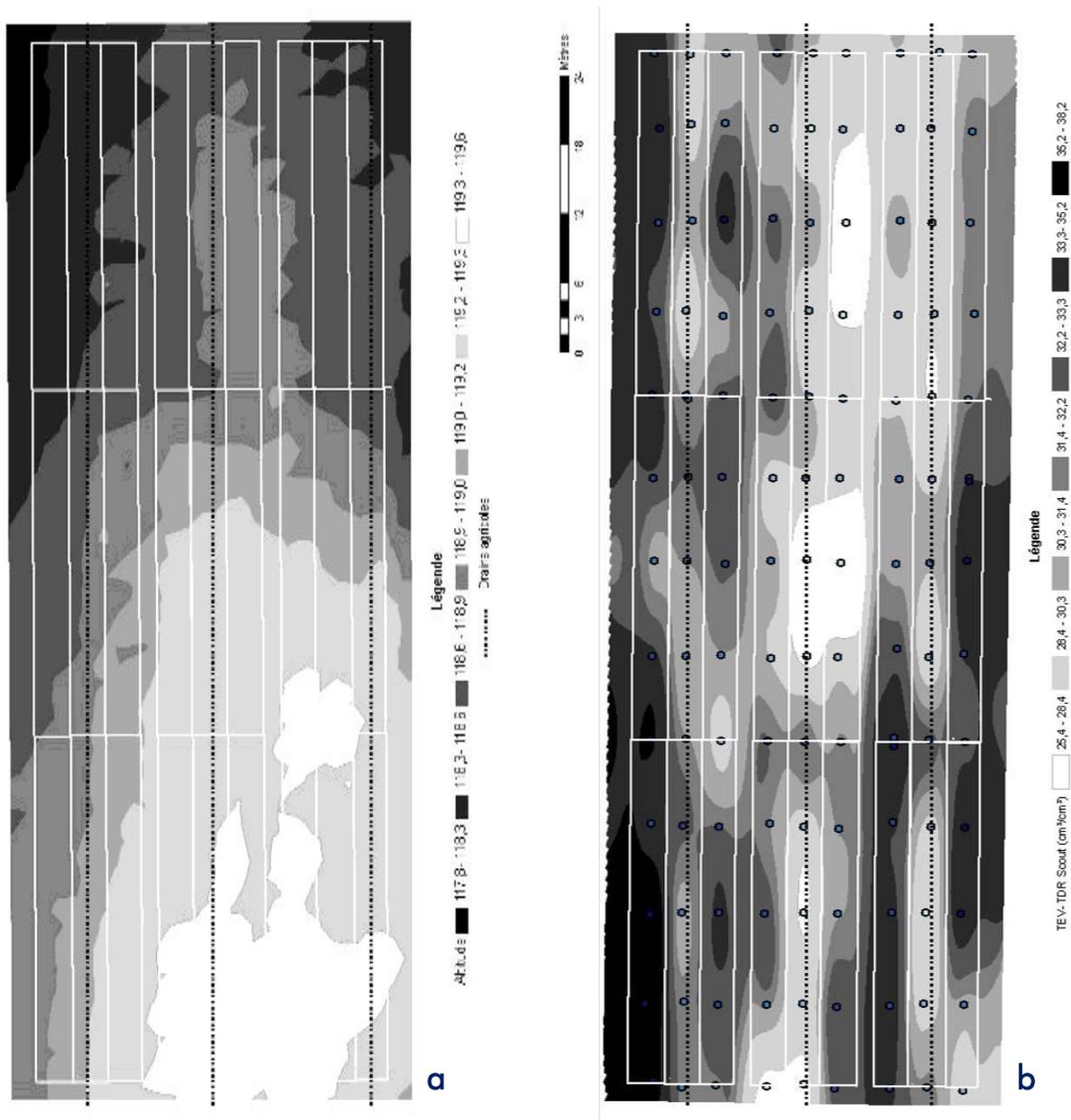


Figure 19 : Plan d'élévation du dispositif expérimental (a) et teneur en eau du sol de 0 à 20 cm de profondeur le 22 septembre 2008 (b).

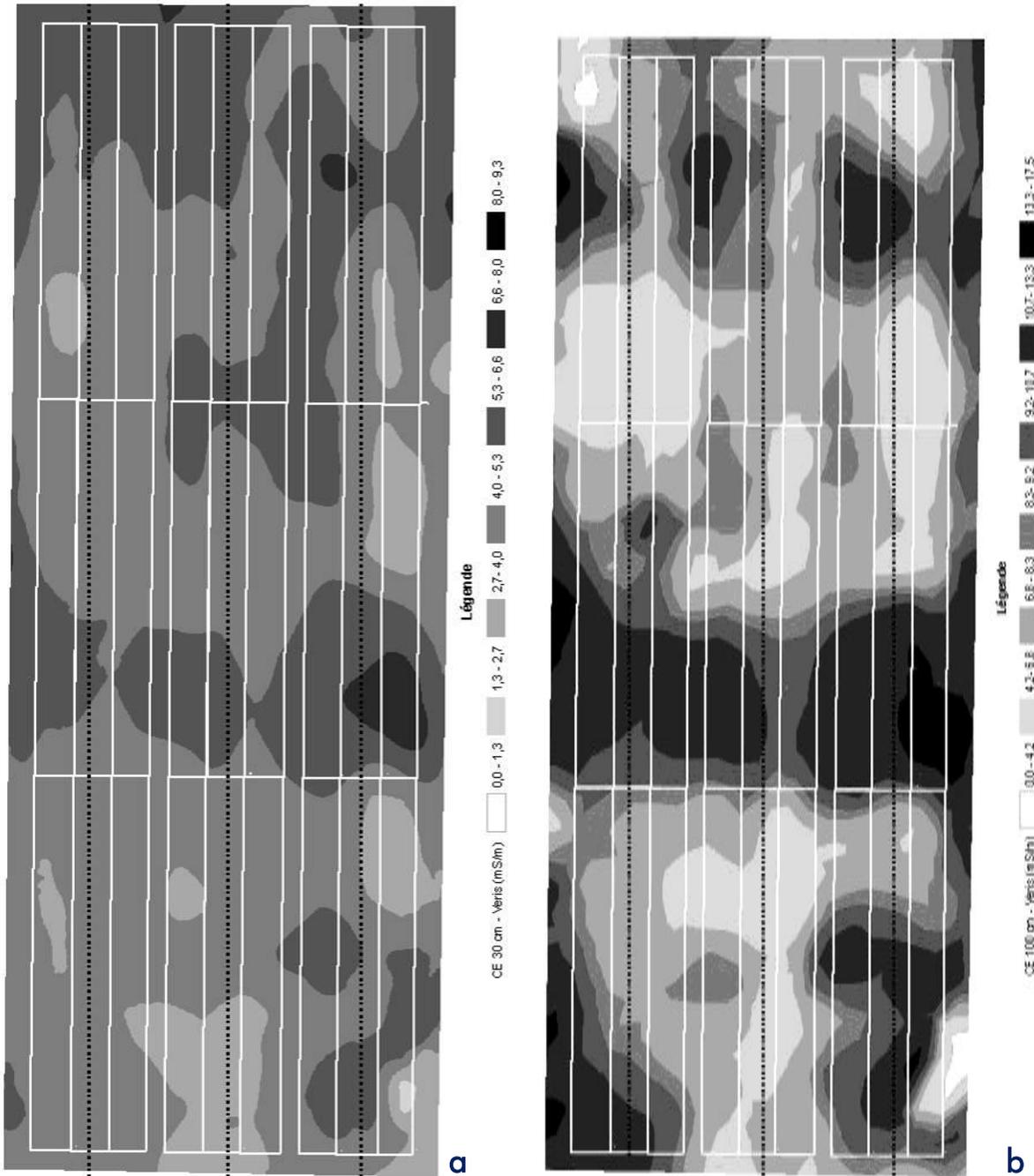


Figure 20 : Conductivité électromagnétique mesurée avec le Versi 3100 de 0 à 30 (a) et de 0 à 100 cm de profondeur (b).

Tableau 13 : Teneur en eau sur base humide (14,5% d'humidité relative) du maïs-grain en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture.

| Traitements Culture/précédent cultural | | | | |
|---|------------------|--------------------------|--------------|--------------------|
| | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux. (RH) | Luzerne (LU) | Moyenne |
| Traitements Sol | g/g MH | | | |
| Témoin (TE) | 0,340 | 0,335 | 0,330 | 0,335 |
| Drainage (DR) | 0,329 | 0,334 | 0,324 | 0,329 |
| Sous-solage (SS) | 0,318 | 0,307 | 0,315 | 0,313 |
| Moyenne | 0,329 | 0,325 | 0,323 | 0,326 |
| Effets | | | | prob > F |
| Sol | | | | 0,27 |
| Culture | | | | 0,42 |
| Sol x Culture | | | | 0,51 |
| Contrastes a priori | | | | prob > t |
| Effets Sol | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | | | | 0,63 |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | | | | 0,14 |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | | | | 0,32 |
| Soya/Radis huileux, (RH) vs Soya témoin (ST) | | | | 0,39 |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | | | | 0,95 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | | | | 0,32 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | | | | 0,40 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | | | | 0,60 |

Tableau 14 : Masse volumique apparente* des sols (moyenne du profil) en fonction des traitements (sol, culture) et des interactions entre les effets sol, culture et profondeur en 2009, 2010 et 2011.

| | 2009 | 2010 | | | 2011 | | | | |
|---|--------------------|--|--------------------------|--------------|--|------------------|--------------------------|--------------|--------------------|
| | | Traitements Culture/précédent cultural | | | Traitements Culture/précédent cultural | | | | |
| | Moyenne | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux, (RH) | Luzerne (LU) | Moyenne | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux, (RH) | Luzerne (LU) | Moyenne |
| Traitements Sol | g/cm ³ | | | | | | | | |
| Témoin (TE) | 1,56 | 1,48 | 1,48 | 1,53 | 1,50 | 1,52 | 1,51 | 1,51 | 1,51 |
| Drainage (DR) | 1,54 | 1,43 | 1,52 | 1,51 | 1,48 | 1,52 | 1,52 | 1,50 | 1,52 |
| Sous-solage (SS) | 1,56 | 1,52 | 1,54 | 1,49 | 1,52 | 1,53 | 1,59 | 1,56 | 1,56 |
| Moyenne | 1,55 | 1,48 | 1,51 | 1,51 | 1,50 | 1,52 | 1,54 | 1,52 | 1,53 |
| Effets | prob > F | | | | prob > F | | | | prob > F |
| Sol | 0,67 | | | | 0,27 | | | | 0,34 |
| Culture | n,a, | | | | 0,15 | | | | 0,77 |
| Sol x Culture | n,a, | | | | 0,08 | | | | 0,82 |
| Prof, | <,0001 | | | | <,0001 | | | | <,0001 |
| Prof, x Sol | 0,36 | | | | 0,14 | | | | 0,63 |
| Prof, x Culture | n,a, | | | | 0,79 | | | | 0,39 |
| Prof, x Sol x Culture | n,a, | | | | 0,98 | | | | 0,82 |
| Contrastes a priori | | | | | prob > t | | | | prob > t |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | | | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | | | | | 0,32 | | | | 0,70 |
| Soya/Radis huileux (RH) vs Soya témoin (ST) | | | | | 0,09 | | | | 0,54 |
| Effets Sol | | | | | | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | | | | | 0,56 | | | | 0,92 |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | | | | | 0,30 | | | | 0,20 |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | | | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | | | | | 0,79 | | | | 0,95 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | | | | | 0,05 | | | | 0,30 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | | | | | 0,05 | | | | 0,79 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | | | | | 0,79 | | | | 0,77 |

*Mesurée avec l'échantillonneur de sol Giddings

Tableau 15 : Teneur en eau volumique* des sols (moyenne du profil) en fonction des traitements (sol, culture) et des interactions entre les effets sol, culture et profondeur en 2009 et 2010.

| | 2009 | 2010 | | | |
|---|--|------------------|--------------------------|--------------|--------------------|
| | Traitements Culture/précédent cultural | | | | |
| | Moyenne | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux, (RH) | Luzerne (LU) | Moyenne |
| Traitements Sol | cm ³ /cm ³ | | | | |
| Témoin (TE) | 0,31 | 0,35 | 0,33 | 0,32 | 0,34 |
| Drainage (DR) | 0,30 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,33 |
| Sous-solage (SS) | 0,30 | 0,33 | 0,35 | 0,33 | 0,34 |
| Moyenne | 0,31 | 0,34 | 0,34 | 0,33 | 0,33 |
| Effets | prob > F | | | | prob > F |
| Sol | 0,52 | | | | 0,26 |
| Culture | n,a, | | | | 0,15 |
| Sol x Culture | n,a, | | | | 0,19 |
| Prof, | <,0001 | | | | <,0001 |
| Prof, x Sol | 0,89 | | | | 0,82 |
| Prof, x Culture | n,a, | | | | 0,57 |
| Prof, x Sol x Culture | n,a, | | | | 0,89 |
| Contrastes a priori | | | | | prob > t |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | | | | | 0,06 |
| Soya/Radis huileux (RH) vs Soya témoin (ST) | | | | | 0,86 |
| Effets Sol | | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | | | | | 0,24 |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | | | | | 0,65 |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | | | | | 0,32 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | | | | | 0,29 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | | | | | 0,38 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | | | | | 0,32 |

*Mesuré avec l'échantillonneur de sol Giddings

Tableau 16 : Teneur en air volumique* des sols (moyenne du profil) en fonction des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture en 2009 et 2010.

| | 2009 | 2010 | | | |
|---|--|------------------|--------------------------|--------------|--------------------|
| | Traitements Culture/précédent cultural | | | | |
| | Moyenne | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux, (RH) | Luzerne (LU) | Moyenne |
| Traitements Sol | ————— cm ³ /cm ³ ————— | | | | |
| Témoin (TE) | 0,10 | 0,09 | 0,11 | 0,10 | 0,10 |
| Drainage (DR) | 0,12 | 0,13 | 0,10 | 0,11 | 0,11 |
| Sous-solage (SS) | 0,11 | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,09 |
| Moyenne | 0,11 | 0,11 | 0,09 | 0,10 | 0,10 |
| Effets | prob > F | | | | prob > F |
| Sol | 0,14 | | | | 0,26 |
| Culture | n,a, | | | | 0,32 |
| Sol x Culture | n,a, | | | | 0,04 |
| Prof, | <,0001 | | | | <,0001 |
| Prof, x Sol | 0,39 | | | | 0,17 |
| Prof, x Culture | n,a, | | | | 0,78 |
| Prof, x Sol x Culture | n,a, | | | | 0,99 |
| Contrastes a priori | | | | | prob > t |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | | | | | 0,57 |
| Soya/Radis huileux (RH) vs Soya témoin (ST) | | | | | 0,19 |
| Effets Sol | | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | | | | | 0,33 |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | | | | | 0,43 |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | | | | | 0,51 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | | | | | 0,23 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | | | | | 0,01 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | | | | | 0,51 |

*Mesuré avec l'échantillonneur de sol Giddings

Tableau 17 : Teneur en eau volumique* de 0 à 60 cm de profondeur dans le sol (moyenne de 9 dates) en 2010 et effets des traitements (sol, culture) et des interactions sol x culture x date.

| 2010 | | | | |
|---|-------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------------|
| Traitements Culture/précédent cultural | | | | |
| | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux, (RH) | Luzerne (LU) | Moyenne |
| Traitements Sol | ————— g/cm ³ ————— | | | |
| Témoin (TE) | 30,3 | 29,7 | 28,4 | 29,5 |
| Drainage (DR) | 29,5 | 29,4 | 28,4 | 29,1 |
| Sous-solage (SS) | 29,6 | 29,5 | 29,9 | 29,7 |
| Moyenne | 29,8 | 29,5 | 28,9 | 29,4 |
| Effets | | | | prob > F |
| Sol | | | | 0,36 |
| Culture | | | | 0,26 |
| Sol x Culture | | | | 0,18 |
| Date | | | | <,0001 |
| Date x Sol | | | | 0,82 |
| Date x Culture | | | | 0,004 |
| Date x Sol x Culture | | | | 0,99 |
| Contrastes a priori | | | | prob > t |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | | | | 0,13 |
| Soya/Radis huileux (RH) vs Soya témoin (ST) | | | | 0,64 |
| Effets Sol | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | | | | 0,36 |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | | | | 0,60 |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | | | | 0,48 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | | | | 0,03 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | | | | 0,54 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | | | | 0,48 |

*Mesuré avec un appareil TDR Trase

Tableau 18 : Teneur en eau volumique* de 0 à 60 cm de profondeur dans le sol (moyenne de 2 dates) en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et des interactions sol x culture x date.

| 2011 | | | | |
|---|-------------------------------|--------------------------|--------------|---------|
| Traitements Culture/précédent cultural | | | | |
| | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux, (RH) | Luzerne (LU) | Moyenne |
| Traitements Sol | ————— g/cm ³ ————— | | | |
| Témoin (TE) | 35,1 | 35,5 | 34,8 | 35,1 |
| Drainage (DR) | 34,0 | 34,4 | 34,0 | 34,1 |
| Sous-solage (SS) | 35,4 | 34,7 | 35,6 | 35,2 |
| Moyenne | 34,8 | 34,9 | 34,8 | 34,8 |
| Effets | prob > F | | | |
| Sol | 0,11 | | | |
| Culture | 0,95 | | | |
| Sol x Culture | 0,09 | | | |
| Date | <,0011 | | | |
| Date x Sol | 0,66 | | | |
| Date x Culture | 0,22 | | | |
| Date x Sol x Culture | 0,76 | | | |
| Contrastes a priori | prob > t | | | |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | 0,80 | | | |
| Soya/Radis huileux (RH) vs Soya témoin (ST) | 0,90 | | | |
| Effets Sol | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | 0,08 | | | |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | 0,80 | | | |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | 0,63 | | | |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | 0,05 | | | |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | 0,98 | | | |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | 0,63 | | | |

*Mesuré avec un appareil TDR Trase

Tableau 19 : Résistance à l'enfoncement* mesurée de 0 à 75 cm de profondeur dans le sol et effets des traitements (sol, culture) et des interactions sol x culture x profondeur en 2009, 2010 et 2011.

| | 2009 | | 2010 | | | 2011 | | | |
|---|--|------------------|--------------------|--------------|--|------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| | Traitements Culture/précédent cultural | | | | Traitements Culture/précédent cultural | | | | |
| | Moyenne | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux | Luzerne (LU) | Moyenne | Soya témoin (ST) | Soya/Radis huileux | Luzerne (LU) | Moyenne |
| Traitements Sol | g/cm ³ | | | | | | | | |
| Témoin (TE) | 6,2 | 8,4 | 8,5 | 10,6 | 9,2 | 7,2 | 6,7 | 6,3 | 6,7 |
| Drainage (DR) | 6,5 | 7,7 | 9,4 | 10,9 | 9,3 | 7,1 | 6,7 | 6,7 | 6,8 |
| Sous-solage (SS) | 6,9 | 8,3 | 8,1 | 8,8 | 8,4 | 6,0 | 5,5 | 6,4 | 6,0 |
| Moyenne | 6,5 | 8,2 | 8,7 | 10,1 | 9,0 | 6,7 | 6,3 | 6,5 | 6,5 |
| Effets | prob > | | | | prob > | | | | prob > |
| Sol | 0,63 | | | | 0,26 | | | | 0,26 |
| Culture | - | | | | 0,16 | | | | 0,83 |
| Sol x Culture | - | | | | 0,38 | | | | 0,88 |
| Prof | <,000 | | | | <,000 | | | | <,0001 |
| Prof x Sol | 0,31 | | | | 0,005 | | | | 0,34 |
| Prof x Culture | - | | | | 0,39 | | | | 0,46 |
| Prof x Sol x Culture | - | | | | 0,85 | | | | 0,89 |
| Contrastes a priori | | | | | prob > | | | | prob > † |
| Effets Culture/précédent cultural | | | | | | | | | |
| Luzerne (LU) vs Soya (SO : RH et ST) | | | | | 0,08 | | | | 0,95 |
| Soya/Radis huileux (RH) vs Soya témoin (ST) | | | | | 0,60 | | | | 0,59 |
| Effets Sol | | | | | | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | | | | | 0,81 | | | | 0,87 |
| Sous-solage (SS) vs Témoin (TE) | | | | | 0,22 | | | | 0,18 |
| Interaction Culture/précédent cultural x Sol | | | | | | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | | | | | 0,98 | | | | 0,74 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | | | | | 0,19 | | | | 0,31 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | | | | | 0,29 | | | | 0,98 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | | | | | 0,84 | | | | 0,94 |

*Mesurée avec l'échantillonneur de sol Giddings

Tableau 20 : Teneurs en matière organique et en azote dans le sol de 0 à 15 cm de profondeurs en 2010 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture.

| | MO | Ntot | C/N | N-NH ₄ | N-NO ₃ | Nmin/ Ntot |
|--------------------------------------|--------------------|-------------|------|-------------------|-------------------|---------------|
| | % | g/kg | | — mg/kg — | | |
| Traitements Sol | | | | | | |
| Témoin (TE) | 4,2 | 0,19 | 13,0 | 1,7 | 5,6 | 4,0 |
| Drainage (DR) | 3,5 | 0,16 | 12,9 | 1,7 | 3,8 | 3,6 |
| Sous-solage (SS) | 4,3 | 0,18 | 13,2 | 2,5 | 6,1 | 4,6 |
| Traitements Culture | | | | | | |
| Soya témoin (ST) | 4,0 | 0,17 | 13,2 | 1,8 | 5,8 | 4,4 |
| Soya/Radis huile, (RH) | 3,9 | 0,18 | 12,5 | 2,2 | 3,7 | 3,2 |
| Luzerne (LU) | 4,1 | 0,18 | 13,4 | 1,9 | 6,0 | 4,6 |
| Effets | prob > F | | | | | |
| Sol | 0,06 | 0,08 | 0,89 | 0,07 | 0,03 | 0,25 |
| Culture | 0,85 | 0,95 | 0,29 | 0,62 | 0,15 | 0,26 |
| Sol x Culture | 0,94 | 0,66 | 0,84 | 0,47 | 0,82 | 0,50 |
| Contrastes a priori | | | | | | |
| Effets Sol | prob > t | | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | 0,05 | 0,05 | 0,82 | 0,98 | 0,04 | 0,50 |
| Sous-sol, (SS) vs Témoin (TE) | 0,87 | 0,89 | 0,81 | 0,04 | 0,62 | 0,32 |
| Effets Culture/Préc, cultural | | | | | | |
| LU vs Soya (SO : RH et ST) | 0,59 | 0,79 | 0,13 | 0,37 | 0,07 | 0,13 |
| RH vs ST | 0,86 | 0,87 | 0,68 | 0,82 | 0,80 | 0,78 |
| Interaction Culture x Sol | | | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | 0,86 | 0,53 | 0,64 | 0,74 | 0,38 | 0,79 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | 0,89 | 0,84 | 0,90 | 0,24 | 1,00 | 0,46 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | 0,75 | 0,81 | 0,28 | 0,69 | 0,50 | 0,42 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | 0,86 | 0,53 | 0,64 | 0,74 | 0,38 | 0,79 |

Tableau 21 : pH à l'eau et teneurs en éléments extraits à la solution Mehlich-3 dans le sol de 0 à 15 cm de profondeur en 2010 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture.

| | pH | Al | Ca | Cu | Fe | K | Mg | Mn | P | P/Al |
|--------------------------------------|-------------|-------|-------------|------|--------------------|-------------|------|------|------|------|
| Traitements Sol | | mg/kg | | | | | | | | % |
| Témoin (TE) | 6,4 | 1199 | 1266 | 2,77 | 204 | 57 | 162 | 16,1 | 26 | 2,2 |
| Drainage (DR) | 6,3 | 1175 | 1126 | 2,19 | 191 | 66 | 166 | 15,8 | 22 | 1,9 |
| Sous-solage (SS) | 6,2 | 1198 | 1077 | 1,67 | 223 | 67 | 140 | 15,5 | 24 | 2,0 |
| Traitements Culture | | | | | | | | | | |
| Soya témoin (ST) | 6,2 | 1206 | 1105 | 2,09 | 205 | 62 | 149 | 14,4 | 22 | 1,9 |
| Soya/Radis huile, (RH) | 6,3 | 1195 | 1133 | 1,98 | 211 | 63 | 157 | 15,3 | 25 | 2,1 |
| Luzerne (LU) | 6,5 | 1170 | 1230 | 2,56 | 201 | 63 | 163 | 17,7 | 25 | 2,2 |
| Effets | | | | | prob > F | | | | | |
| Sol | 0,25 | 0,70 | 0,05 | 0,28 | 0,04 | 0,18 | 0,16 | 0,97 | 0,55 | 0,59 |
| Culture | 0,01 | 0,68 | 0,04 | 0,66 | 0,55 | 0,98 | 0,74 | 0,54 | 0,52 | 0,46 |
| Sol x Culture | 0,30 | 0,93 | 0,11 | 0,81 | 0,32 | 0,78 | 0,80 | 0,82 | 0,54 | 0,42 |
| Contrastes a priori | | | | | | | | | | |
| Effets Sol | | | | | prob > t | | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | 0,48 | 0,48 | 0,06 | 0,40 | 0,19 | 0,13 | 0,82 | 0,90 | 0,28 | 0,31 |
| Sous-sol, (SS) vs Témoin (TE) | 0,12 | 0,98 | 0,02 | 0,12 | 0,07 | 0,10 | 0,13 | 0,79 | 0,58 | 0,57 |
| Effets Culture/Préc, cultural | | | | | | | | | | |
| LU vs Soya (SO : RH et ST) | 0,00 | 0,45 | 0,01 | 0,38 | 0,41 | 0,95 | 0,56 | 0,34 | 0,45 | 0,37 |
| RH vs ST | 0,42 | 0,79 | 0,56 | 0,86 | 0,53 | 0,86 | 0,66 | 0,76 | 0,39 | 0,39 |
| Interaction Culture x Sol | | | | | | | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | 0,98 | 0,63 | 0,65 | 0,73 | 0,76 | 0,31 | 0,81 | 0,67 | 0,91 | 0,99 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | 0,06 | 0,55 | 0,01 | 0,53 | 0,08 | 0,98 | 0,25 | 0,27 | 0,23 | 0,16 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | 0,77 | 0,61 | 0,93 | 0,48 | 0,68 | 0,80 | 0,84 | 0,69 | 0,50 | 0,44 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | 0,98 | 0,63 | 0,65 | 0,73 | 0,76 | 0,31 | 0,81 | 0,67 | 0,91 | 0,99 |

Tableau 22 : Teneurs en matière organique et en azote dans le sol de 0 à 15 cm de profondeurs en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture.

| | MO | Ntot | C/N | N-NH ₄ | N-NO ₃ | Nmin/ Ntot |
|--------------------------------------|--------------------|-------------|------|-------------------|-------------------|---------------|
| | % | g/kg | | — mg/kg — | | |
| Traitements Sol | | | | | | |
| Témoin (TE) | 4,0 | 0,17 | 13,5 | 1,5 | 7,0 | 5,0 |
| Drainage (DR) | 3,6 | 0,16 | 13,1 | 1,2 | 7,5 | 5,4 |
| Sous-solage (SS) | 4,1 | 0,18 | 13,0 | 1,6 | 6,9 | 4,7 |
| Traitements Culture | | | | | | |
| Soya témoin (ST) | 3,8 | 0,17 | 13,0 | 1,4 | 6,6 | 4,9 |
| Soya/Radis huile, (RH) | 3,9 | 0,17 | 13,2 | 1,5 | 7,1 | 5,1 |
| Luzerne (LU) | 4,0 | 0,18 | 13,3 | 1,4 | 7,7 | 5,2 |
| Effets | prob > F | | | | | |
| Sol | 0,09 | 0,04 | 0,49 | 0,06 | 0,88 | 0,64 |
| Culture | 0,54 | 0,59 | 0,88 | 0,98 | 0,09 | 0,75 |
| Sol x Culture | 0,93 | 0,64 | 0,98 | 0,20 | 0,08 | 0,19 |
| Contrastes a priori | | | | | | |
| Effets Sol | prob > t | | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | 0,08 | 0,08 | 0,36 | 0,10 | 0,71 | 0,59 |
| Sous-sol, (SS) vs Témoin (TE) | 0,75 | 0,16 | 0,27 | 0,47 | 0,94 | 0,71 |
| Effets Culture/Préc, cultural | | | | | | |
| LU vs Soya (SO : RH et ST) | 0,32 | 0,40 | 0,69 | 0,98 | 0,04 | 0,55 |
| RH vs ST | 0,64 | 0,65 | 0,75 | 0,87 | 0,39 | 0,69 |
| Interaction Culture x Sol | | | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | 0,47 | 0,16 | 0,99 | 0,78 | 0,01 | 0,02 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | 0,47 | 0,31 | 0,82 | 0,94 | 0,06 | 0,12 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | 0,91 | 0,80 | 0,61 | 0,35 | 0,65 | 0,68 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | 0,72 | 0,75 | 0,66 | 0,02 | 0,61 | 0,85 |

Tableau 23 : pH à l'eau et teneurs en éléments extraits à la solution Mehlich-3 dans le sol de 0 à 15 cm de profondeur en 2011 et effets des traitements (sol, culture) et de l'interaction sol x culture.

| | pH | Al | Ca | Cu | Fe | K | Mg | Mn | P | P/Al |
|--------------------------------------|------|----------|-------------|------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|
| Traitements Sol | | | | | | | | | | |
| | | mg/kg | | | | | | | | % |
| Témoin (TE) | 6,4 | 1221 | 1187 | 1,62 | 194 | 59 | 167 | 15,2 | 30 | 2,5 |
| Drainage (DR) | 6,2 | 1196 | 1119 | 1,54 | 191 | 65 | 167 | 16,0 | 30 | 2,5 |
| Sous-solage (SS) | 6,1 | 1229 | 1032 | 1,53 | 212 | 66 | 141 | 13,8 | 29 | 2,3 |
| Traitements Culture | | | | | | | | | | |
| Soya témoin (ST) | 6,2 | 1215 | 1095 | 1,54 | 197 | 59 | 155 | 14,3 | 27 | 2,3 |
| Soya/Radis huile, (RH) | 6,3 | 1225 | 1095 | 1,54 | 200 | 63 | 161 | 14,8 | 28 | 2,3 |
| Luzerne (LU) | 6,2 | 1207 | 1148 | 1,60 | 200 | 68 | 160 | 15,9 | 32 | 2,7 |
| Effets | | | | | | | | | | |
| | | prob > F | | | | | | | | |
| Sol | 0,23 | 0,21 | 0,15 | 0,20 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,38 | 0,86 | 0,79 |
| Culture | 0,84 | 0,89 | 0,54 | 0,83 | 0,64 | 0,00 | 0,89 | 0,74 | 0,12 | 0,10 |
| Sol x Culture | 0,64 | 0,61 | 0,12 | 0,99 | 0,75 | 0,50 | 0,65 | 1,00 | 0,99 | 0,94 |
| Contrastes a priori | | | | | | | | | | |
| Effets Sol | | | | | | | | | | |
| Drainage (DR) vs Témoin (TE) | 0,48 | 0,20 | 0,33 | 0,13 | 0,45 | 0,06 | 0,96 | 0,58 | 0,91 | 0,94 |
| Sous-sol, (SS) vs Témoin (TE) | 0,12 | 0,68 | 0,07 | 0,11 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,40 | 0,60 | 0,59 |
| Effets Culture/Préc, cultural | | | | | | | | | | |
| LU vs Soya (SO : RH et ST) | 0,71 | 0,73 | 0,32 | 0,59 | 0,60 | 0,00 | 0,90 | 0,51 | 0,04 | 0,03 |
| RH vs ST | 0,68 | 0,81 | 1,00 | 0,99 | 0,44 | 0,06 | 0,67 | 0,80 | 0,72 | 0,90 |
| Interaction Culture x Sol | | | | | | | | | | |
| (LU VS SO) x (DR VS TE) | 0,39 | 0,45 | 0,87 | 0,73 | 0,83 | 0,13 | 0,55 | 0,97 | 0,69 | 0,56 |
| (LU VS SO) x (SS VS TE) | 0,69 | 0,20 | 0,03 | 0,69 | 0,22 | 0,32 | 0,29 | 0,93 | 0,65 | 0,45 |
| (RH VS ST) x (DR VS TE) | 0,42 | 0,39 | 0,26 | 0,79 | 0,77 | 0,89 | 0,31 | 0,77 | 0,91 | 0,74 |
| (RH VS ST) x (SS VS TE) | 0,78 | 0,99 | 0,79 | 0,76 | 0,73 | 0,39 | 0,95 | 0,82 | 0,95 | 1,00 |