

Projet Prime-Vert, sous-volet 8.4

Améliorer la productivité des sols par le sous-solage pour réduire les émissions de GES

Rapport final

04/2012-05/2015

Auteurs :

Marc-Olivier Gasser¹
Luc Belzile¹
Stéphane Martel²
Marie-Hélène Perron¹
Hélène Grondines¹
Michèle Grenier¹



Ce projet a été réalisé en vertu du programme Prime-Vert, sous-volet 8.4, et bénéficie d'une aide financière provenant du Fonds vert du gouvernement du Québec et administrée par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

¹ Institut de recherche et développement en agroenvironnement

² Agrinova

AVERTISSEMENT

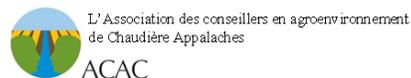
Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier tous les partenaires impliqués dans la réalisation de ce projet soit en premier lieu les conseillers et conseillères en agroenvironnement de la région de Chaudière-Appalaches qui sont à l'origine du projet et les producteurs agricoles qui ont collaboré à l'étude. Finalement, les auteurs tiennent aussi à remercier Louis Robert, conseiller régional du MAPAQ en Chaudière-Appalaches.

Partenaires de réalisation : Les conseillers et conseillères en agroenvironnement de Chaudière-Appalaches³
Louis Robert⁴
Caroline Dufour-L'Arrivée¹

Équipe technique : Michel Lemieux¹
Hélène Moore⁵
Marc Beaulieu⁶
Catherine Bossé⁵
Nadine Labrecque⁵



L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable. Chaque année, l'IRDA travaille sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

L'IRDA a été 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 de la Lutte aux changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de la Science (MESRS).

Pour en savoir plus :
www.irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Gasser, M.-O., L. Belzile, S. Martel, M.-H. Perron, H. Grondines et M. Grenier. 2015. Améliorer la productivité des sols par le sous-solage pour réduire les émissions de GES. Rapport final déposé au MAPAQ en vertu du programme Prime-Vert, sous-volet 8.4. Institut de recherche et développement en agroenvironnement, Québec. 28 p. + annexes.

³ Association des conseillers en agroenvironnement de Chaudière-Appalaches

⁴ Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

⁵ Club de fertilisation de la Beauce

⁶ Groupe-conseil agricole de la Côte-du-Sud

FAITS SAILLANTS

La compaction des sols entraîne une baisse importante de leur productivité ainsi qu'une augmentation importante des émissions de gaz à effet de serre (GES). La circulation au champ et l'épandage d'effluents d'élevage lorsque les sols sont plus sensibles à la compaction sont plus fréquents dans les régions à forte densité animale et à courte saison de croissance, comme en Chaudière-Appalaches. De fait, les profils de sol compacts en profondeur y sont fréquents ainsi que les teneurs élevées en nitrate (NO_3) dans le sol à tout moment de l'année. Ces deux facteurs accroissent de façon majeure les risques d'émissions de N_2O au champ, un des principaux contributeurs aux émissions de GES en agriculture. Le sous-solage et le bris de couches compactes permettraient de réduire les émissions de N_2O au champ en améliorant la productivité des cultures, en augmentant l'efficacité d'utilisation de l'azote et en réduisant les conditions anoxiques qui favorisent la dénitrification. Bien que le sous-solage permette aussi d'augmenter les rendements, cette pratique requiert beaucoup d'énergie, qui doit être comptabilisée comme source d'émission de GES et évaluée au niveau de sa rentabilité.

Un projet a été réalisé en Chaudière-Appalaches sur dix sites d'essai pour démontrer que le sous-solage de sols compacts peut améliorer leur productivité et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les conditions de sous-solage étaient optimales au moment des travaux à la fin du mois d'août et en septembre 2012. Des engrais verts avaient été préalablement semés et ont produit un bon couvert végétal durant l'automne sur certains sites, sans toutefois produire de biomasse importante. Les rendements mesurés sur les deux années suivantes ont démontré des améliorations de productivité relativement modestes et variables à la suite de l'opération de sous-solage. Sur quelques sites, les améliorations ont été importantes aux yeux des producteurs en première année (5/8 sites), mais peu souvent significatives (2/8 sites) en termes statistiques. Dans certains cas, l'ensemble du champ s'est améliorée par rapport aux années antérieures, sans produire de différence significative par rapport aux parcelles témoins non sous-solées. La plus petite dimension des parcelles témoins pourraient expliquer le manque de réponse au sous-solage sur certains de ces sites. L'effet semblait aussi s'estomper en deuxième année, avec un nombre plus restreint de sites ayant des différences positives et significatives (1/10 sites). Une analyse économique a déterminé les coûts de l'opération de sous-solage sur chaque site. Avec des coûts variant de 113 à 153 \$/ha, ce qui est légèrement supérieur aux références économiques du CRAAQ, l'opération de sous-solage pourrait se rentabiliser sur une période de trois ans, à condition d'obtenir une augmentation de rendement de 200 à 400 kg/ha de maïs grain la première année, suivie d'augmentations annuelles de moins de 100 kg/ha dans le soya et le blé les années suivantes.

L'effet du sous-solage sur les prélèvements en azote par les cultures et sur l'azote résiduel en fin de saison (nitrate) a aussi été relativement marginal et inégal. Les exportations de N ont été significativement plus élevées seulement sur 2 sites chaque année, tandis que l'azote résiduel était faiblement influencé par le sous-solage (2 sites en deuxième année) ou par le surplus de N calculé à partir des apports d'engrais azotés et des prélèvements. Les émissions de GES (CO_2) reliées à la consommation de carburant pour le sous-solage ont été calculées, de même que les émissions de GES au champ (N_2O) reliées à l'épandage d'engrais azoté. Même si la pratique ne semble pas toujours efficace du point de vue agronomique ou rentable, les émissions de GES au champ sont plus de dix fois supérieures à celles liées à l'opération de sous-solage. Ces émissions seraient encore deux à quatre fois plus importantes en sols compacts, d'où l'importance de mettre en place des pratiques durables pour réduire la compaction, ou d'améliorer les conditions de réussite du sous-solage. L'analyse de profils de sols a d'ailleurs révélé des conditions extrêmes de compaction sur plusieurs sites, corroborées par les analyses de propriétés physiques et de résistance à la pénétration d'un cône, mesurées sur trois sites. La proportion de pores saturés en eau y était très élevée, tandis que la teneur en air était limitée à l'horizon de surface (0-20 cm). Le sous-solage a eu des effets relativement modestes et variables pour améliorer la condition physique des sols, malgré qu'il ait été réalisé dans des conditions optimales.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	2
Remerciements	2
Faits saillants	3
Table des matières	4
Liste des figures	5
Liste des tableaux	5
Objectifs et aperçu de la méthodologie	7
Objectifs	8
Matériel et méthodes	8
Méthodes de calcul pour les analyses économiques	11
Méthodes pour le calcul des émissions de GES	12
Résultats et discussion	14
Effet du sous-solage sur les rendements	14
Effet du sous-solage sur les exportations d'azote	16
Effet du sous-solage sur le nitrate résiduel en fin de saison dans le sol	17
Effet du sous-solage sur les propriétés physiques de sol	17
Rentabilité de l'opération de sous-solage	20
Effet du sous-solage sur la réduction des émissions de GES	23
Conclusion	25
Point de contact pour informations	25
Références	26
ANNEXE 1	29
ANNEXE 2	30
ANNEXE 3	31
ANNEXE 4	32
ANNEXE 5	33
ANNEXE 6	36
ANNEXE 7	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Positionnement des parcelles témoins par rapport au sens prévu de la sous-soleuse.	9
Figure 2 : Orientation perpendiculaire du sous-solage (ligne hachurée en rouge) par rapport aux drains (ligne bleue) (a) et effet plus marqué sur les rendements mesurés à la batteuse en 2013 du sous-solage (vert) par rapport à des parcelles témoins (rouge) de grandes dimensions (b).	15
Figure 3 : Masse volumique apparente (MVA), proportion des pores saturés en eau (PPSE) et teneur volumique en air de profils de sol compact (NSS) et sous-solé (SS) sur trois sites. Les barres d'erreur sont des écarts types.	18
Figure 4 : Illustration succincte des procédures utilisées pour calculer le volume d'air présent de 0 à 30 cm de profondeur dans des profils de sol réalisés en transect sur des parcelles sous-solées et témoins.	32
Figure 5 : Site 4 : argile lourde. Transects de pénétromètre et de sonde de conductivité électrique apparente (échelles en mètres).	36
Figure 6 : Site 5 : loam limono-argileux. Transects de pénétromètre et de sonde de conductivité électrique apparente (échelles en mètres).	37
Figure 7 : Site 10 : loam argileux. Transects de pénétromètre et de sonde de conductivité électrique apparente (échelles en mètres).	38
Figure 8 : Site 4 : argile lourde. Transects de volumes occupés par l'air, l'eau et le sol (échelles en mètres).	39
Figure 9 : Site 5 : loam limono-argileux. Transects de volumes occupés par l'air, l'eau et le sol (échelles en mètres).	40
Figure 10 : Site 10 : loam argileux. Transects des volumes occupés par l'air, l'eau et le sol (échelles en mètres).	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Types de sol à l'étude.	9
Tableau 2 : Données météorologiques moyennes de cinq stations climatiques opérées par Environnement Canada (Saint-Michel, Scott, Vallée-Jonction, Beauséjour, Lauzon).	10
Tableau 3 : Prix de vente des grains et des fourrages.	12
Tableau 4 : Effet du sous-solage en 2012 sur les rendements des cultures subséquentes en 2013 et 2014.	14
Tableau 5 : Effet du sous-solage sur les exportations de N liées à la récolte des cultures en 2013 et 2014.	16
Tableau 6 : Concentrations moyennes en nitrate résiduel dans le profil (0-60 cm) sous l'effet du sous-solage et des éléments du bilan de N.	17

Tableau 7 : Volumes occupés par l'air, l'eau et le sol de 0 à 30 cm de profondeur dans des transects de 10 à 15 m de long réalisés sur trois sites d'essais de sous-solage.	20
Tableau 8 : Coûts du sous-solage et gains de rendement à obtenir en 2013 et 2014 pour rentabiliser l'opération sur dix sites d'essai.	21
Tableau 9 : Gains de rendement à obtenir selon deux séquences culturales de la même rotation.	22
Tableau 10 : Analyse de sensibilité - Gains de rendement à obtenir selon différents coûts de sous-solage pour deux séquences culturales de la même rotation.	22
Tableau 11 : Bilan des émissions de GES calculées sur les parcelles témoins et sous-solées de dix sites d'essais.	24
Tableau 12 : Résumé des observations et des performances calculées pour dix sites d'essais de sous-solage réalisés en 2012.	30
Tableau 13 : Résumé des séquences culturales, des engrais verts et des apports en N provenant des engrais de ferme et de synthèse.	31

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

Le passage répété de la machinerie et des équipements lourds, notamment les charrues, les tracteurs et les chargements lourds (citernes à lisier, boîtes à grain, etc.), entraînent dans de nombreux sols agricoles, la compaction du profil et des répercussions importantes sur la productivité des cultures. Déjà en 1990, l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec rapportait plus de 100 000 ha de sols souffrant de compaction et 430 000 ha de sols souffrant d'une détérioration de leur structure. La compaction des sols agricoles entraîne également la modification de leurs propriétés hydrauliques, comme l'infiltration, le drainage et la capacité de rétention en eau. En dégradant la structure et la porosité des sols, la compaction affecte aussi les mouvements et les échanges d'air. Les conditions anaérobies augmentent dans le sol et le milieu devient propice à la dénitrification et aux émissions de N_2O . En Chaudière-Appalaches en particulier, la densité animale et la courte saison de croissance accentuent le risque d'épandre des lisiers à des moments où le sol est moins portant, ce qui explique, du moins en partie, les observations de plus en plus fréquentes de profils compactés en profondeur ainsi que la présence de fortes concentrations de nitrate dans le sol à tout moment de l'année. Au-delà d'un seuil limite, la compaction du sol nuit au développement des racines par la résistance à la pénétration et le manque d'air. Les cultures ont ainsi plus de difficulté à prélever les éléments nutritifs présents dans le sol et la productivité baisse. Les engrais azotés non prélevés peuvent demeurer dans le sol, en partie sous forme de nitrate qui peut être lessivé ou se transformer en des formes gazeuses. Le nitrate est notamment dénitrifié en oxyde nitreux (N_2O), un puissant gaz à effet de serre, en présence d'une source de carbone et d'un manque d'oxygène. Ce gaz contribue de façon non négligeable au bilan agricole des émissions de GES. Les émissions de N_2O représentent la presque totalité des émissions de GES attribuées à la gestion des sols, et près de 44 % des émissions totales de GES attribuées aux activités agricoles (MDDEP, 2011). De 1990 à 2009, la quantité de N_2O émise par les sols agricoles a augmenté de 9,0 %, passant de 2,6 à 2,9 Mt éq CO_2 tandis que les émissions d'origine agricole représentaient en 2010 près de 8 % des émissions totales de GES, soit 6,6 Mt éq CO_2 (MDDEP, 2011; MDDEFP, 2013).

Le sous-solage est souvent utilisé pour remédier aux problèmes de mauvais drainage et de compaction des sols en profondeur. Cette opération vise essentiellement à travailler le sol avec un étau jusque sous la zone qui a été compactée par le travail intensif du sol et les passages répétés des équipements lourds. Sous des conditions idéales de teneurs en eau dans le sol (sol asséché vers la fin de l'été), le sous-solage du sol en profondeur permet de fissurer les zones compactes entre les étaux de la sous-soleuse et de favoriser la pénétration en profondeur des racines des cultures et finalement la régénération de la structure. Des travaux récents ont défini les conditions favorisant la réussite du sous-solage, adaptées en fonction des types de sol et des équipements de sous-solage (Weill, 2014). Plusieurs conseils pratiques et stratégies y sont présentés pour assurer un ameublissement uniforme ou plus complet du sous-sol.

Certains auteurs affirment que le maintien de la productivité à long terme, la stabilité des retombées économiques et la prévention de la pollution de l'eau et de l'air passent par l'adoption de pratiques de gestion permettant la réduction des teneurs en nitrate résiduelles dans le sol après la récolte (Fan et al., 2010). Le sous-solage pourrait donc être considéré comme une pratique de gestion efficace, s'il améliore la structure du sol, l'aération, la pénétration des racines en profondeur et le prélèvement des éléments nutritifs comme le nitrate. Selon Gagnon et al. (2011), la présence de nitrate dans le sol est positivement corrélée à la dénitrification et aux émissions de N_2O . La réduction des teneurs en NO_3 résiduelles en fin de saison pourrait donc être associée à une diminution du potentiel de dénitrification. De même, l'amélioration de la structure, l'aération et la diminution des conditions anaérobies devraient également diminuer le potentiel de dénitrification des sols.

Gregorich et al. (2014) ont démontré que la relation qui existe entre la fertilisation à l'engrais minéral et les émissions cumulatives de N_2O était amplifiée par la compaction des sols. Dans les sols compacts, le

processus dominant la production de N_2O est la dénitrification engendrée par le manque d'oxygène, alors qu'en présence d'oxygène, la nitrification peut contribuer au flux de N_2O , même à des teneurs élevées en eau (Gregorich et al., 2014; Ball, 2013). La compaction du sol favorise non seulement les émissions de N_2O , mais affecte également l'efficacité de l'azote minéral apporté en réduisant le rendement et le prélèvement d'azote, amplifiant ainsi les émissions de N_2O en proportion du rendement produit (Gregorich et al., 2014). La compaction cause une augmentation de la densité du sol et réduit la porosité du sol, principalement la macroporosité, affectant ainsi la diffusion des gaz et la teneur en oxygène (Ball, 2013). La proportion de pores saturés en eau (PPSE ou Water Filled Pore Space WFPS) augmente et favorise la dénitrification et la production de N_2O , mais réduit la diffusion des gaz et par conséquent, les émissions de N_2O à la surface du sol (Linn et Doran, 1984; Klefoth et al., 2014). Cette forme de piégeage du N_2O dans le profil augmenterait avec l'augmentation de la dénitrification et la PPSE (Clough et al., 2005). Par ailleurs, le potentiel de réduire le N_2O en N_2 (ou sa consommation) augmenterait avec ce temps de piégeage. Plusieurs travaux qui ont tenté de relier la PPSE aux émissions de N_2O , ont conduit à des résultats contradictoires probablement en raison de ces effets combinés de production, de consommation et d'émission/piégeage de N_2O (Ball, 2013). Les travaux de Klefoth et al. (2014) ont par ailleurs souligné l'importance de considérer à la fois la PPSE et la masse volumique apparente du sol dans la dynamique de production dans le sol et d'émission de N_2O à la surface du sol. En conclusion, il ne semble pas y avoir de consensus entre une propriété physique particulière comme la PPSE et le potentiel d'émission de N_2O et encore moins en termes absolus pour tous les sols.

Le sous-solage et l'élimination de la couche de compaction permettent de limiter les périodes propices à la dénitrification et les risques d'émissions de N_2O par les sols (Machefert et al., 2002). Comparativement au labour, le sous-solage (*ripper subsoiling*) favorise la formation de macropores, la connectivité entre les pores ainsi que la conductivité hydraulique (Pagliai et al., 2004). Bien que le sous-solage permette aussi d'augmenter les rendements, cette pratique requiert beaucoup d'énergie qui doit être comptabilisée comme source d'émission de GES (Raper et Bertgold, 2002).

Objectifs

Le projet visait à démontrer que le sous-solage peut améliorer la productivité des sols compacts, l'efficacité agronomique des engrais azotés et par le fait même réduire les émissions de GES. Les objectifs plus spécifiques étaient de :

- Démontrer les effets positifs du sous-solage pour réduire et améliorer le drainage interne des sols en se basant sur l'amélioration des rendements obtenus chez les producteurs;
- Démontrer le potentiel de réduction des émissions de GES relié à l'amélioration de la productivité des sols par le sous-solage, l'augmentation des prélèvements de N et la réduction des teneurs en nitrate résiduel en fin de saison.

Matériel et méthodes

Sur les dix sites d'essai de sous-solage suivis de 2012 à 2014 dans la région de Chaudière-Appalaches, neuf sites ont été proposés par les conseillers de l'ACAC (Association des conseillers et conseillères en agroenvironnement de Chaudière-Appalaches) et établis chez les producteurs, tandis que le dernier a été établi à la station expérimentale de l'IRDA à Sait-Lambert-de-Lauzon. Les sols choisis devaient présenter une couche compacte en profondeur sous la semelle de labour (entre 30 et 60 cm de profondeur) et de fait, nous verrons plus loin que les sols présentaient des couches compactes (ou sans perméabilité avec un mauvais drainage) à plus de 50 cm de profondeur. Les champs sélectionnés ne devaient pas présenter d'autres limitations, comme un mauvais pH, un mauvais drainage de surface ou un système de drain agricole inadéquat. Dans les sols lourds ou mal drainés, il fallait s'assurer de la

présence de drains agricoles fonctionnels et d'un égouttement de surface adéquat, ou en justifier l'absence.

Avant le sous-solage prévu pour le mois d'août 2012, trois zones ont été délimitées dans les champs afin de délimiter des blocs de parcelles où seraient comparées les parcelles sous-solées aux parcelles témoins non sous-solées. Des profils ont été réalisés pour caractériser la compaction et des échantillons de sol ont été prélevés à chaque bloc à quatre profondeurs (0-15, 15-30, 30-60, 60-90 cm) pour déterminer la texture et la teneur en matière organique des sols et faciliter l'interprétation de la série pédologique (Tableau 1). Voir aussi à l'Annexe 1 pour des détails supplémentaires sur les types de sol à l'étude et les profondeurs de compaction.

Tableau 1 : Types de sol à l'étude.

No site	Teneur en MOS (%) [†]	Classe texturale de l'horizon de surface	Série de sols dérivée de l'étude pédologique	Origine des dépôts de surface	Drainage artificiel
1	3,27	Argile limoneuse	Argile Saint-Pascal	Marine	Oui
2	5,29	Loam	Loam limono-argileux Kamouraska	Marine	Oui
	27,80	phase organique		Tourbière	Oui
3	3,02	Loam-Loam sableux	Loam limoneux Sainte-Marie	Till	Oui
4	3,37	Argile lourde	Argile Kamouraska	Marine	Oui
5	2,59	Loam limono-argileux	Argile Kamouraska	Marine	Oui
6	3,43	Loam	Loam ou loam sableux Woodbridge	Till	Oui
7	8,33	Loam sableux	Argile sableuse Sainte-Rosalie	Fluvio-lacustre	Oui
	42,80	phase organique		Tourbière	Oui
8	2,35	Loam limoneux	Loam limoneux Lebras	Fluvio-lacustre	Partiel
9	3,22	Loam	Loam Sainte-Marie	Till	Partiel
10	1,93	Loam limoneux	Loam limoneux Lebras	Fluvio-lacustre	Oui

[†]MOS : matière organique du sol

Une parcelle sous-solée a été comparée à une parcelle témoin non sous-solée en trois répétitions dans le même champ. Les trois parcelles témoins devaient avoir au moins 9 m de large et 15 m de long. La délimitation de ces parcelles témoins s'est faite en fonction du sens dans lequel la sous-soleuse serait opérée. Lorsque le champ était drainé artificiellement (système fonctionnel), il a été recommandé de sous-soler perpendiculairement ou à la diagonale du sens des drains (Figure 1). Si le champ n'avait pas de système de drainage artificiel, mais l'égouttement de surface et le drainage interne étaient adéquats, le sous-solage devait se faire dans le sens de la pente ou en biais par rapport au sens habituel des travaux sur le champ. Les parcelles témoins ont été délimitées et géolocalisées avec un DGPS précis au 0,60 m.

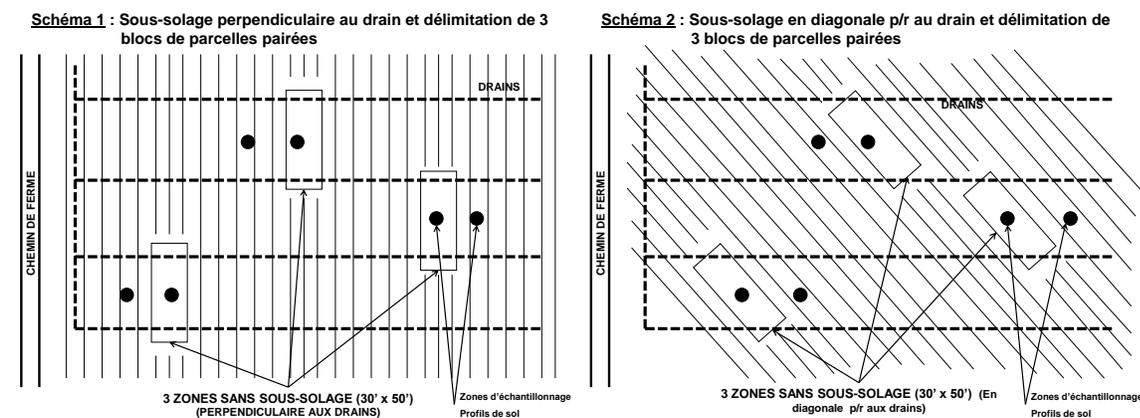


Figure 1 : Positionnement des parcelles témoins par rapport au sens prévu de la sous-soleuse.

Le Tableau 12 présenté à l'Annexe 2 résume les observations et les performances calculées sur les opérations de sous-solage, qui serviront à l'étude technicoéconomique et au calcul du bilan de GES. La profondeur de sous-solage visée était de 50 à 70 cm soit de 10 à 20 cm en dessous de la zone compacte. Un suivi a été réalisé afin de noter la profondeur effective, la largeur ainsi que la surface effective de l'opération et consigner le temps et la consommation de carburant. Le soulèvement et le bouleversement du sol à la surface au moment du sous-solage ont également été notés de façon qualitative par les conseillers impliqués.

Tous les travaux de sous-solage ont été exécutés entre la fin du mois d'août et le début du mois de septembre 2012, excepté sur le site 8 où les travaux ont été exécutés sur sol gelé le 26 novembre 2012. L'été 2012 a été caractérisé par un mois de juillet très sec avec moins de 40 mm de précipitations, suivi d'un mois d'août recevant des précipitations plus intenses au début du mois, mais aussi sous la normale (Tableau 2). Ainsi, les opérations de sous-solage réalisées sur les neuf sites en août et septembre 2012, l'ont été, pour la plupart, en conditions idéales de sols asséchés et non plastiques.

Tableau 2 : Données météorologiques moyennes de cinq stations climatiques opérées par Environnement Canada (Saint-Michel, Scott, Vallée-Jonction, Beauséjour, Lauzon).

Mois	Température (°C)		Précipitations (mm)	
	2012	Normale	2012	Normale
Mai	13,2	11,1	132	96
Juin	17,5	16,5	176	116
Juillet	20,3	19,2	33	126
Août	20,0	18,1	99	115
Septembre	14,2	13,4	95	104

Il a été recommandé de semer un engrais vert (radis fourrager, par exemple) ou d'implanter une culture pérenne juste avant le sous-solage et d'éviter le labour d'automne. Ces engrais verts ont été semés pour la plupart à la fin du mois d'août, produisant durant l'automne un couvert végétal important sur certains sites, mais peu de biomasse en général. Une séquence culturale qui minimise les opérations au champ a aussi été recommandée aux producteurs. Ces derniers pouvaient opter pour des cultures en semis direct ou des travaux légers afin de minimiser les opérations lorsque les sols sont moins ressuyés et moins portants comme au printemps. Le Tableau 13 à l'Annexe 3 présente les différentes cultures pour les années 2012, 2013 et 2014 ainsi que les apports d'azote sous forme d'engrais de synthèse et d'engrais de ferme.

Suite à l'opération de sous-solage de 2012, les rendements des cultures ont été mesurés en 2013 et 2014 sur la plupart des sites pour évaluer la performance agronomique et technicoéconomique de cette opération. Les rendements n'ont pas été mesurés sur certains sites où la performance des cultures ou des engrais verts était trop mauvaise. Dans le cas des cultures de céréales et de fourrage, au moins trois quadrats de 1 m par 1 m ont été récoltés sur chaque parcelle sous-solée et témoin de chaque bloc, pour un total de 18 quadrats sur la majorité des sites. Pour les sites en maïs et en soya, des longueurs de 4 m étaient prises à répétition (2 au minimum) dans chaque parcelle sous-solée et témoin. Les cultures de sorgho et d'orge sur le site de l'IRDA ont été récoltées respectivement avec une fourragère et une batteuse pour parcelles expérimentales. Les récoltes de grains et de fourrage ont été séchées à l'étuve à 35 °C pour établir leur teneur en eau à la récolte et analyser leur contenu en azote au laboratoire. Les quantités d'azote prélevées et exportées avec le grain ou le fourrage ont été calculées avec le rendement et les concentrations en azote mesurées sur les différentes parcelles de chaque site.

Après la récolte, le sol a été échantillonné à la tarière hollandaise à trois profondeurs (0-15, 15-30, 30-60 cm) sur la plupart des sites afin de connaître la teneur en azote résiduel à l'automne. Cette valeur, en association avec les rendements et les prélèvements en azote de la culture devait servir d'indice de la productivité des cultures et des émissions de N₂O liées aux apports d'engrais et à leur valorisation par les cultures. Les effets du sous-solage sur les rendements des cultures, les prélèvements et l'azote

minéral résiduel en fin de saison ont été analysés sur chaque site séparément en analyse de variance (ANOVA) avec la procédure PROC MIXED du progiciel SAS (SAS Institute, 2003). Les effets fixes (traitements) ont été testés avec un test de Fisher afin de vérifier s'ils étaient significatifs (Prob. de $F < 0,10$). Dans la plupart des cas, l'analyse des résidus démontrait une distribution aléatoire, ce qui présuait qu'il n'y avait pas de tendance induite par de mauvaises manipulations ou autre.

Sur quatre sites (2, 4, 5 et 10), la réduction de la compaction sous l'effet du sous-solage a été comparée à la parcelle témoin à l'aide de mesures de pénétromètre et d'autres propriétés physiques prises sur des transects de 10 à 15 m de long. Des mesures de résistance à la pénétration d'un cône ont été réalisées de façon intensive, de 20 à 30 cm de distance entre chaque mesure jusqu'à 1 m de profondeur, avec une double sonde Veris Profiler 3000 (pénétromètre et conductivité électrique) montée à l'arrière d'un tracteur sur un échantillonneur de sol Giddings. D'autres propriétés physiques ont été mesurées sur des carottes de sol prélevées de manière moins intensive, de 1 à 1,5 m de distance entre chaque carotte, avec l'échantillonneur de sol Giddings, sur une profondeur de 60 ou 80 cm et sectionnées en huit strates de 7,5 ou 10 cm de sol, respectivement. La masse volumique apparente et la teneur en eau volumique ont été calculées sur chaque strate de sol pesée humide à l'arrivée au laboratoire et après séchage à l'étuve à 105 °C. La porosité totale et la teneur en air ont été calculées en assumant une masse volumique réelle de 2,65 g/cm³, lorsque la teneur en matière organique du sol était inférieure à 5 % (CRAAQ, 2010). Les fractions du volume occupées par le sol, l'eau et l'air au moment de l'échantillonnage ont ainsi été calculées, où leur somme équivaut à un. Des procédures géostatistiques (package gstat du progiciel R) et d'analyses compositionnelles (package compositions du progiciel R) ont été utilisées pour générer des profils de teneur en air et de proportions de pores saturés en eau en utilisant les mesures plus denses de pénétromètre comme valeur ancillaire pour l'interpolation (voir Figure 4 à l'Annexe 4). Succinctement, deux composantes *ilr* orthonormées ont été créées à partir des trois composantes du volume du sol (sol, eau et air) et interpolées en krigeage universel avec les mesures de pénétromètre comme régresseur et des semi-variogrammes incluant des composantes fortement anisotropiques.

Méthodes de calcul pour les analyses économiques

La pratique du sous-solage a déjà été analysée sous l'angle économique (Brochu et al., 1986 ; Bernier 1986 ; Gasser et al., 1986 ; Belzile et Grondines, 2015). Toutefois, dans le présent projet, l'analyse a été approfondie par des analyses de sensibilité et de type coûts-bénéfices réalisées sur dix sites d'essai et tenant compte de divers scénarios de séquences culturales.

L'analyse consistait d'abord à calculer le coût de sous-solage à partir d'observations obtenues sur les dix essais de sous-solage réalisés chez les producteurs en 2012. Ces coûts ont ensuite été comparés aux coûts à forfait des *Références économiques* du Centre de référence en agriculture et en agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2014). Le gain de rendement nécessaire pour récupérer le coût de sous-solage, qui constituait alors le seuil de rentabilité, a été calculé à partir de ces deux estimations.

Par ailleurs, une analyse de type coûts-bénéfices a été menée afin de considérer le fait que le sous-solage n'est pas une opération récurrente annuellement et qu'elle s'inscrit à un moment précis dans une rotation. Dans ce contexte, les revenus associés aux gains de rendement lors des années suivant le sous-solage ont été actualisés et de nouveaux seuils de rentabilité ont été calculés pour récupérer le coût de sous-solage si celui-ci était réparti sur trois ans, et ce, selon deux séquences de rotation différentes. Enfin, une analyse de sensibilité a été menée pour évaluer comment le seuil de rentabilité variait en fonction de différents coûts de sous-solage.

Afin de mener l'analyse économique, les hypothèses suivantes ont été retenues.

Le calcul de l'opération de sous-solage pour chaque site a été effectué avec un calculateur élaboré à cette fin par Pelletier (2014), et ce, afin de refléter les coûts réels de chaque entreprise et en incluant les

différents paramètres (largeur, profondeur et vitesse de travail, puissance du tracteur, consommation de carburant). Certaines données ont été demandées aux producteurs accueillant le site afin de réaliser les calculs et de valider les résultats obtenus. Il s'agit surtout du temps d'opération, de la consommation de carburant, du modèle de sous-soleuse, de la distance entre les étançons, de la marque et du modèle de tracteur, de sa puissance et de la présence de roues doubles (Tableau 12 présenté à l'Annexe 2).

- Taux d'intérêt : 3,72 % (CRAAQ, 2014b);
- Inflation (salaire, machinerie et bâtiment) : 2,984 % (Statistiques Canada, 2014) ;
- Inflation du carburant : 2,866 % (Statistiques Canada, 2014);
- Coût actuel du carburant diesel : 1,00 \$/litre (CRAAQ, 2014b);
- Coût actuel de la main-d'œuvre : 18,00 \$/h (CRAAQ, 2014b);
- Coûts reliés à la possession d'un bien : 2 % (CRAAQ, 2014b);
- Durée de vie d'un tracteur : 15 ans ;
- Durée de vie d'un équipement : 10 ans ;
- Nombre d'heures travaillées par jour : 8 heures ;
- Utilisation annuelle de la sous-soleuse : 75 heures;
- Utilisation annuelle du tracteur : 500 heures;
- Efficacité effective au champ : 85 %;

Tableau 3 : Prix de vente des grains et des fourrages.

Culture	2013	2014
	\$/ tm	
Avoine	200	n.a. [†]
Blé d'alimentation humaine	250	285
Foin de mil-trèfle	n.a.	120
Maïs fourrager	31 [‡]	n.a.
Maïs-grain	n.a.	205
Orge	165	210
Seigle	n.a.	87
Soya	400	460

[†]n.a. : non applicable

[‡]Teneur en matière sèche à 35 %

Méthodes pour le calcul des émissions de GES

Dans un premier temps, le CO₂ émis par le tracteur lors des opérations de sous-solage a été inclus dans le bilan des émissions calculé pour chaque site. La quantité de carburant consommée pour réaliser le sous-solage a été enregistrée à chaque site, de même que la surface sous-solée, le nombre de passages, etc. (Tableau 12 à l'Annexe 2). Les émissions de CO₂ ont été calculées sur les mêmes prémisses que dans le Rapport d'inventaire national des sources et puits de GES (Environnement Canada, 2013) (voir Annexe 5 pour plus de détails).

Le sous-solage pratiqué dans les bonnes conditions contribue à réduire la compaction, ce qui se traduit par une meilleure aération et une réduction des émissions de N₂O. Toutefois, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 1995) et Environnement Canada (2013) ne prévoit pas de réduction d'émission de GES avec cette pratique. Or, certains travaux rapportent des émissions de N₂O de 2 à 4 fois plus importantes en sols compacts qu'en sols non compacts (Bakken et al., 1987). En assumant que les sols des différents sites étaient tous compacts au départ et qu'ils ont été décompactés par le sous-solage, nous avons calculé dans une première approche (voir Méthode A à

l'Annexe 5) les augmentations d'émissions de N₂O reliées à la compaction des sols avec un facteur d'augmentation variant de 2 à 4 fois les émissions liées aux apports d'engrais azotés prévues par le GIEC (1995) et Environnement Canada (2013). Les émissions directes incluent la dénitrification (N₂O) de l'engrais azoté, tandis que les émissions indirectes incluent les émissions de N₂O liées à la dénitrification à l'extérieur du champ de l'azote volatilisé sous forme ammoniacale ou lessivé sous forme de nitrate. Dans le Rapport d'inventaire des GES, le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) d'un kilogramme de N₂O est fixé à 310 kg éq CO₂ (GIEC, 1995). Les émissions de N₂O (directes et indirectes), principalement liées à l'usage des engrais dans notre étude, sont associées au secteur agricole dans le Rapport d'inventaire national (Environnement Canada, 2013).

Gregorich et al. (2014) ont comparé les émissions de N₂O sur des sols compacts et non compacts en relation avec la fertilisation azotée, les prélèvements en N du maïs et la teneur en argile des sols. Dans une deuxième approche (voir Méthode B à l'Annexe 5), nous avons utilisé les résultats de ces auteurs pour évaluer la réduction des émissions de N₂O anticipée suite au sous-solage, toujours en assumant que les sols sous-solés ont retrouvé leur état non compact.

Dans les sols compacts, les émissions cumulatives de N₂O augmentent plus fortement en fonction de la dose d'azote apportée que dans les sols non compacts (Gregorich et al., 2014). La compaction des sols réduit à la fois la quantité d'azote prélevée par les plantes en raison des conditions défavorables à leur croissance et favorise le processus de dénitrification (Gregorich et al., 2014). Ces derniers rapportent d'ailleurs dans un premier temps des coefficients moyens d'émissions de N₂O en fonction de la quantité d'azote prélevée par la culture selon l'état compact ou non du sol (g N₂O/kg N prélevé) pour deux années successives de culture de maïs-grain (*Tab. 2* dans l'article). Dans un deuxième temps, Gregorich et al. (2014) rapportent des émissions linéaires de N₂O en fonction de la quantité d'azote apportée en surplus des prélèvements (kg N apporté – kg N prélevé = kg N surplus) et de l'état de compaction du sol (*Fig. 7* dans l'article). Ces dernières équations linéaires permettent de considérer l'effet de la quantité d'azote apportée au sol, mais ne sont pas applicables aux cultures de légumineuses comme le soya, qui bénéficient de leurs propres mécanismes de fixation d'azote atmosphérique et reçoivent peu d'engrais azotés par rapport aux quantités d'azote prélevées. Ainsi deux sous-méthodes de calcul ont été utilisées dans la Méthode B pour évaluer l'effet du sous-solage sur les émissions de N₂O, soit en fonction du N prélevé par la plante, ou encore du N apporté en surplus des besoins de la plante. Le détail de ces calculs se retrouve à l'Annexe 5.

La décompactation d'un sol par le sous-solage peut également réduire l'énergie requise pour travailler le sol. Le labour en sol compact peut par exemple exiger jusqu'à 3 fois plus d'énergie qu'en sol non compact (Chamen et al., 1992). Nous n'avons toutefois pas considéré la consommation accrue de carburant pour labourer un sol compact dans le calcul de la réduction des émissions de GES induit par le sous-solage.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Effet du sous-solage sur les rendements

Les rendements des cultures ont été mesurés sur chaque site en 2013 et 2014, sauf sur les sites 8 et 9 en 2013 qui étaient encore en réaménagement (Tableau 4). Le semis de millet perlé sur le site 9 en 2013 n'a d'ailleurs pas levé et il n'y avait que très peu de biomasse à récolter à la fin de la saison. Aucune culture n'a été implantée sur le site 8 en 2013, sauf un engrais vert à la fin du mois d'août. Sur la majorité des sites, les opérations de sous-solage ne semblent pas avoir augmenté de façon significative les rendements des cultures, même si certaines tendances à la hausse se dégagent. Seuls trois sites (3 et 5 en 2013 et 8 en 2014) sur 18 sites-années ont présenté des augmentations significatives de rendements (Prob. F < 0,10), tandis qu'un site (10 en 2013) présentait une diminution significative de rendement. Sur le site 3, une différence significative a été observée en 2013 entre les zones non sous-solées et les zones sous-solées avec la sous-soleuse conventionnelle, alors qu'aucune différence n'a été observée avec la sous-soleuse montée sur bélière (*ripper*). Sur le site 5 en 2013, les rendements de la zone sous-solée ont été significativement supérieurs à ceux de la zone non sous-solée. Il est important de mentionner que sur les parcelles témoins de ce site, les rendements étaient supérieurs au-dessus des drains comparativement à l'entre-drain, tandis que dans les parcelles sous-solées, les rendements étaient beaucoup plus uniformes en 2013, mais de nouveau plus faibles entre les drains en 2014. L'effet du sous-solage a donc été très éphémère sur ce site.

Tableau 4 : Effet du sous-solage en 2012 sur les rendements des cultures subséquentes en 2013 et 2014.

Site	2013			2014			Appréciation du producteur	
	Traite-ment†	Culture	Rendement 15% hum. t/ha	Effet Traitement Prob. F	Culture	Rendement 15% hum. t/ha		Effet Traitement Prob. F
1	NSS	Orge	2,0		Orge grainée	2,1		non
	SS		2,4	0,33		1,9	0,80	
2	NSS	Blé	5,7		Soya	4,1		oui
	SS		5,5	0,70		3,9	0,32	
3	NSS	Avoine	4,2		Soya	3,0		oui
	SS		4,9	0,06		2,8	0,56	
	SSB		4,3	0,70		2,9		
4	NSS	Maïs-ensilage	12,3		Soya	3,0		non
	SS		12,6	0,72		3,1	0,50	
5	NSS	Blé	2,0		Maïs-grain	5,7		oui (2013)
	SS		3,4	0,04		6,6	0,38	
6	NSS	Soya	2,1		Blé	3,0		oui
	SS		2,3	0,38		2,8	0,41	
7	NSS	Orge	2,3		Foin mil-trèfle	6,6		non
	SS		2,6	0,27		6,9	0,57	
8	NSS	Engrais vert	n.d.		Soya	2,9		oui
	SS		n.d.	n.a.		3,4	0,09	
9	NSS	Millet perlé	n.d.		Seigle	1,4		non
	SS		n.d.	n.a.		1,3	0,79	
10	NSS	Sorgho fourr.	4,9		Orge	5,0		non
	SS		4,4	0,10		5,1	0,58	

†NSS : non sous-solé; SS : sous-soleuse conventionnelle; SSB : sous-soleuse montée sur bélière

‡n.a. : non applicable

Si des augmentations significatives de rendement n'ont pas été observées de façon systématique après le sous-solage (seulement 3 sites-années sur 18), des tendances à l'augmentation de rendement (>0,2 t/ha) sont tout de même à souligner en 2013 (6/8 sites) par rapport à 2014 (3/10 sites). À

l'inverse, des tendances à des baisses de rendement ($>0,2$ tm/ha) suite au sous-solage sont notées de façon plus marquée en 2014 (4/10 sites) par rapport aux résultats de l'année précédente 2013 (2/8 sites). Par ailleurs, les producteurs ont été interpellés pour donner leur appréciation de l'effet du sous-solage et dans 5 cas sur 10, une amélioration des rendements a été perçue sur l'ensemble du champ, soit sur les sites, 2, 3, 5, 6 et 8. Dans certains cas, ces augmentations étaient notables par rapport aux rendements obtenus les années précédant le sous-solage (site 2 par exemple), même si les différences ne sont pas apparues significatives entre les parcelles sous-solées et témoins. Sur ces sites, le manque de différence significative pourrait s'expliquer par la dimension restreinte des parcelles témoins (9 m x 15 m), qui auraient été influencées par le reste du champ environnant sous-solé et amélioré. Dans certains cas, le producteur aurait noté une amélioration générale de l'égouttement du champ au printemps, sans différences entre les traitements (sites 3, 6 et 7). Sur le site 3 d'ailleurs, des travaux préalables de drainage souterrain ont peut-être amélioré l'égouttement et la productivité générale de la parcelle, masquant l'effet du sous-solage en 2014, plus modeste. Soulignons aussi que les rendements ont été mesurés avec des quadrats de 1 m², et même s'ils ont été prélevés à répétition pour bien représenter le rendement de la parcelle, la variabilité encourue dans ces conditions de champ peut parfois nuire à la puissance des tests statistiques et masquer les effets des traitements. Également, les rendements mesurés manuellement avec des quadrats ont tendance à légèrement surestimer les rendements par rapport à ceux des batteuses qui intègrent davantage de zones à faible rendement ou qui encourent plus de perte au battage. Pour ces raisons, l'utilisation de plus grandes parcelles adaptées à la dimension des équipements de récolte des producteurs serait préférable pour augmenter la capacité de détecter les effets du sous-solage en conditions hétérogènes de production (liées à la position sur les planches et les drains, par exemple), sans affecter les conditions des parcelles témoins avoisinantes. Des effets beaucoup plus concluants ont d'ailleurs été mesurés avec la batteuse en 2013 sur le site 5 avec des parcelles témoins et sous-solées de plus grandes dimensions (minimum de 30 m x 100 m) (Figure 2).

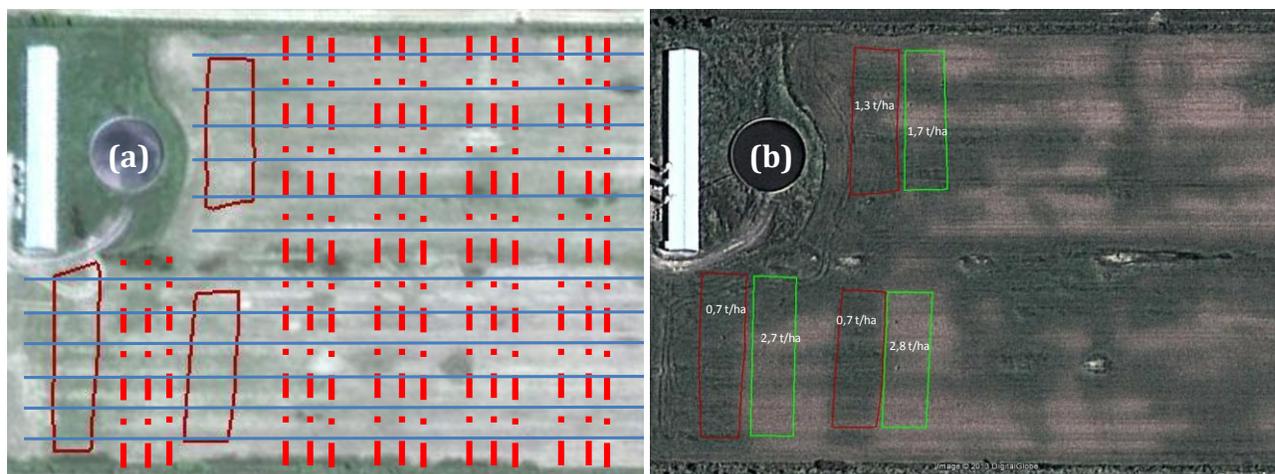


Figure 2 : Orientation perpendiculaire du sous-solage (ligne hachurée en rouge) par rapport aux drains (ligne bleue) (a) et effet plus marqué sur les rendements mesurés à la batteuse en 2013 du sous-solage (vert) par rapport à des parcelles témoins (rouge) de grandes dimensions (b).

Le faible taux de réussite du sous-solage reflète cependant des résultats d'essai de sous-solage réalisés au Québec dans le passé. Sur sept sites à l'essai durant 3 ans en Montérégie, Brochu et al. (1986) avaient obtenu des augmentations de rendements de maïs-grain d'environ 25 % sur un site, de moins de 10 % sur 4 sites, et des résultats négatifs ou nuls sur 2 sites. Dans un essai antérieur en Chaudière-Appalaches nous n'avons pas noté d'augmentation de rendement, mais plutôt une diminution de rendement 2 années sur 3 suite au sous-solage, soit en orge de brasserie et en soya (Gasser et al., 2012). Les effets plus marqués en première année (2013) par rapport à la deuxième (2014), semblent aussi démontrer l'effet temporaire ou peu persistant du sous-solage. De fait, l'amélioration des rendements

de blé sur le site 5, particulièrement importante à certains endroits entre les drains en 2013 (Figure 2b), s'est estompée en 2014 en production de maïs-grain.

Effet du sous-solage sur les exportations d'azote

Comme pour le rendement des cultures, sur la majorité des sites, les opérations de sous-solage ne semblent pas avoir augmenté de façon significative les exportations de N liées à la récolte des cultures, même si certaines tendances à la hausse se dégagent (Tableau 5). Quatre sites (3 et 5 en 2013; 5 et 8 en 2014) sur 18 sites-années ont présenté des augmentations significatives de rendements (Prob. $F < 0,10$). Aucun site ne présentait de diminution significative d'exportation de N résultant du sous-solage.

Comme pour les rendements, sur les 17 sites-années suivis, 4/7 sites présentaient des tendances à l'augmentation des exportations de N (> 5 kg N/ha) en 2013 suite au sous-solage, tandis que 3/10 sites présentaient de telles tendances en 2014. Au contraire, des tendances à la diminution des exportations de N semblaient plus importantes en 2014 (2/10 sites) suite au sous-solage par rapport aux résultats de l'année antérieure (2013) (0/7 sites). D'un point de vue de l'efficacité d'utilisation des engrais azotés et de la capacité du sous-solage à augmenter les prélèvements en N par les cultures et à réduire les pertes en N du système, le suivi de ces prélèvements dans ces essais indique plutôt des résultats mitigés. Dans le cas de résultats significatifs et positifs, on estimerait cette augmentation de 10 à 20 kg N/ha supplémentaires de N exportés de la parcelle sous-solée. Majorée d'environ 50 % pour estimer le prélèvement par la biomasse aérienne, ce prélèvement additionnel d'environ 20 à 30 kg/ha dans la parcelle sous-solée serait relativement modeste, mais pourrait améliorer quelque peu le bilan agroenvironnemental d'une telle pratique en réduisant la présence de nitrate résiduel en fin de saison, la dénitrification et les émissions de N_2O .

Tableau 5 : Effet du sous-solage sur les exportations de N liées à la récolte des cultures en 2013 et 2014.

Site	2013			Effet Traitement Prob. F	2014		
	Traitement†	Culture	N exporté kg/ha		Culture	N exporté kg/ha	Effet Traitement Prob. F
1	NSS	Orge	26	0,45	Orge grainée	37	0,91
	SS		30			35	
2	NSS	Blé	108	0,78	Soya	236	0,76
	SS		111			232	
3	NSS	Avoine	72	0,05	Soya	158	0,31
	SS		86			144	
	SSB		72			148	
4	NSS	Maïs-ensilage	138	0,81	Soya	158	0,52
	SS		140			169	
5	NSS	Blé	36	0,06	Maïs-grain	58	0,03
	SS		57			76	
6	NSS	Soya	117	0,55	Blé	63	0,14
	SS		123			52	
7	NSS	Orge	30	0,28	Foin mil-trèfle	138	0,81
	SS		35			142	
8	NSS	Engrais vert	n.a. ‡	n.a.	Soya	150	0,06
	SS		n.a.			178	
9	NSS	Millet perlé	n.a.	n.a.	Seigle	19	0,63
	SS		n.a.			15	
10	NSS	Sorgho fourrager	n.a.	n.a.	Orge	70	0,63
	SS		n.a.			71	

†NSS : non sous-solé; SS : sous-soleuse conventionnelle; SSB : sous-soleuse montée sur bélier

‡n.a. : non applicable

Effet du sous-solage sur le nitrate résiduel en fin de saison dans le sol

Les concentrations en nitrate résiduel en fin de saison, n'ont pas été affectées de façon significative par le sous-solage en 2013, mais l'ont été de façon positive sur deux sites et de façon négative sur un site en 2014 (Tableau 6). Aucune tendance particulière ne s'est dessinée en 2013 sur les 4 sites suivis, tandis que 4/6 sites présentaient des valeurs à la baisse (dont 2 significatives) sous l'effet du sous-solage en 2014. Toutefois, les concentrations en nitrate résiduel ne semblent pas particulièrement reliées à la quantité d'azote apportée sous forme d'engrais (organique et de synthèse) en surplus des exportations. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce manque de relation. Par exemple, même si aucun engrais n'a été apporté dans le soya sur les sites 2 et 3 en 2014, les concentrations en nitrate résiduel sont apparemment aussi importantes que dans les autres sites en raison de la fixation atmosphérique de l'azote non calculée dans le surplus, pouvant laisser des reliquats de nitrate.

Tableau 6 : Concentrations moyennes en nitrate résiduel dans le profil (0-60 cm) sous l'effet du sous-solage et des éléments du bilan de N.

Site	Traite- ment	2013	2013			NO ₃ résiduel mg/kg	Prob. F	2014	2014			NO ₃ résiduel mg/kg	Prob. F
			N engrais kg N/ha	N exporté kg N/ha	N surplus kg N/ha				N engrais kg N/ha	N exporté kg N/ha	N surplus kg N/ha		
1	NSS	Orge	36	26	10	5,4	0,96	Orge	31	37	-6	5,8	0,24
	SS		36	30	6	5,2		31	35	-4	5,5		
2	NSS	Blé	133	108	25			Soya	0	236	-236	7,8	0,07
	SS		133	111	22			0	232	-232	7,1		
3	NSS	Avoine	51	72	-21			Soya	0	158	-158	6,2	0,84
	SS		51	79	-28			0	146	-146	5,9		
4	NSS	Maïs	75	138	-63			Soya	52	158	-106	8,4	0,61
	SS		75	140	-65			52	169	-117	7,4		
5	NSS	Blé	139	36	103	5,8	0,38	Maïs	116	58	58	4,6	0,04
	SS		139	57	82	6,7		116	76	40	8,9		
6	NSS	Soya	58	117	-59	11,5	0,24	Blé	53	63	-10	5,9	0,93
	SS		58	123	-65	13,3		53	52	1	6,1		
7	NSS	Orge	63	30	33	6,9	0,30	Foin	56	138	-82		
	SS		63	35	28	5,8		56	142	-86			
8	NSS	n.a.	138	0	138			Soya	0	150	-150		
	SS		138	0	138			0	178	-178			
9	NSS	n.a.	108	0	108			Seigle	61	19	42	12,6	0,10
	SS		108	0	108			61	15	46	7,3		
10	NSS	Sorgho	0	94	-94			Orge	73	70	3		
	SS		0	86	-86			73	71	2			

†NSS : non sous-solé; SS : sous-solé

Effet du sous-solage sur les propriétés physiques de sol

L'analyse de l'effet du sous-solage sur les propriétés physiques du sol a été réalisée sur 3 sites (sites 4, 5 et 10). Le quatrième site (site 2) comportait un horizon de surface trop organique (MOS > 25 %) pour faire des inférences sur la masse volumique réelle du sol, la porosité et la teneur en air, et il n'a donc pas été traité. Les propriétés physiques issues de carottes de sol prélevées avec un échantillonneur de sol Giddings sont rapportées à la Figure 3. Le site 4 présentait une masse volumique apparente relativement plus faible que les autres sites en raison de la nature plus argileuse et/ou moins compacte du sol. Celle-ci augmente en profondeur de 1,1 à 1,3 g/cm³ de manière presque linéaire jusqu'à 30 cm de profondeur. Par comparaison, le site 5 et le site 10 présentent des MVA relativement plus élevées de 1,2 à plus de 1,6 g/cm³ à 60 cm de profondeur en lien avec la texture de loam limoneux à loam limono-

argileux du sol. En revanche, la MVA augmente beaucoup plus rapidement à près de $1,6 \text{ g/cm}^3$ sur le site 5, à 25 cm de profondeur, soulignant l'état très compact du sol de ce site. Le sous-solage ne semble pas avoir réduit la MVA de ces sols, mais au contraire l'aurait augmentée sur le site 10 sur presque tout le profil. Cela ne peut s'expliquer que par des conditions initiales différentes des sols et non par l'effet du sous-solage.

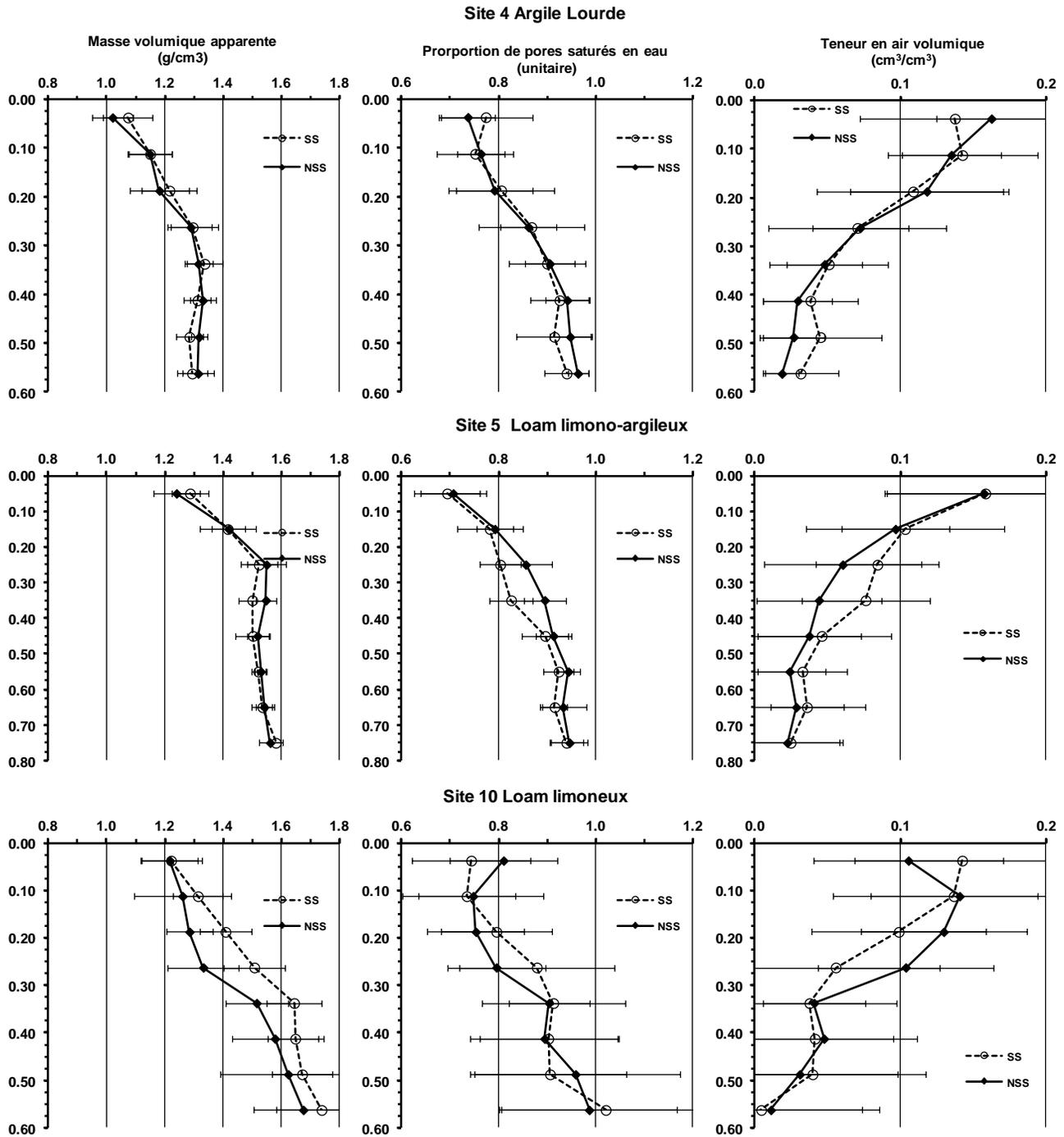


Figure 3 : Masse volumique apparente (MVA), proportion des pores saturés en eau (PPSE) et teneur volumique en air de profils de sol compact (NSS) et sous-solé (SS) sur trois sites. Les barres d'erreur sont des écarts types.

La proportion de pores saturés en eau était relativement élevée sur l'ensemble des sites, de 0,70 à près de 1,0 en profondeur. Cette saturation était toutefois plus variable sur le site 10. Sur le site 5, la saturation était moins élevée sous le profil saturé aux profondeurs de 25 à 35 cm, tandis qu'elle avait tendance à être plus élevée de 20 à 30 cm sous le sous-solage sur le site 10. Une teneur en air inférieure à $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ est généralement considérée critique pour le développement et la croissance racinaire des plantes. De fait, la teneur en air de ces sols est relativement restreinte en profondeur. Elle passe de plus de $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ dans la couche de surface du sol à moins de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ à plus 25 cm de profondeur, sauf sur le site 10 où cette réserve diminue sous le seuil critique à 30 cm de profondeur. Alors que le sous-solage n'a pratiquement pas d'effet sur le site 4, on remarque un effet positif sur la teneur en air au site 5, mais un effet négatif sur le site 10. L'ensemble de ces mesures ne permet pas de conclure à des effets très positifs du sous-solage sur les propriétés physiques des sols relevées sur ces sites.

Les profils de pénétromètre et de sonde de conductivité électrique apparente (CE_a) relevés sur les trois sites 4, 5 et 10 sont présentés à l'Annexe 6. Les mesures de pénétromètre révèlent des résistances qui augmentent avec la profondeur, mais révèlent aussi des couches plus compactes de 20 à 50 cm de profondeur (sites 5 et 10). Sur ces deux sites, on observe également une résistance beaucoup moindre en profondeur ($> 80 \text{ cm}$) dû à la pose ou à la présence de drains, soit à 2,5 m de distance sur l'axe des x sur le site 5 ou à 7,5 m sur le site 10. Sur le site 4, les drains sont plus difficilement localisables, tandis que le sol apparaît relativement compact à partir de 30 cm jusqu'à 1 m de profondeur. Sur ce site, les mesures de CE_a révèlent par contre la forme des planches arrondies avec une couche de matériau qui possède une plus faible CE_a sur le dessus de la planche par rapport au bas, probablement en lien avec un horizon Ap cultivé plus profond sur le dessus de la planche. L'augmentation de la CE_a avec la profondeur est également beaucoup plus contrastée sur ce site par rapport aux autres sites, en lien avec sa teneur plus élevée en argile. L'effet du passage des sous-soleuses n'est pas si évident à constater sur les différents sites, sauf le site 5 sur lequel le passage d'une sous-soleuse profonde semble avoir laissé ses marques en profondeur.

L'interpolation des volumes occupés par le sol, l'eau et l'air des différents transects sur les 3 sites (4, 5 et 10) est rapportée sous forme graphique à l'Annexe 7. Rappelons que ces volumes sont dérivés des propriétés physiques des sols (MVA, porosité totale, teneur en eau volumique, etc.), transformées pour tenir compte de leur nature compositionnelle et interpolées par des techniques de géostatistique (krigeage universel) utilisant la mesure de résistance à la pénétration comme covariable ou régresseur. Soulignons d'abord, la variabilité dans les échelles de valeurs présentées dans ces figures, soit de 0 à 0,30 pour la proportion du volume occupé par l'air, de 0,25 à 0,52 pour l'eau et de 0,30 à 0,75 pour le sol. De manière générale, l'air était principalement présent à la surface du sol au moment des campagnes d'échantillonnage et occupait à certains endroits jusqu'à $0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ du volume total de sol. À l'inverse, l'air est presque absent en profondeur dans le profil ($< 0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), où le volume est principalement occupé par le sol et l'eau. La proportion du volume occupé par le sol est plus importante (et à l'inverse la porosité totale est plus faible) dans les sites 5 et 10, où le sol est moins argileux.

La moyenne des volumes occupés par l'air, l'eau et le sol à la surface du sol (0 à 30 cm de profondeur) sur les transects des parcelles témoins et sous-solées est présentée au Tableau 7. Sur les trois sites, la proportion du volume occupé par l'air (ou la teneur en air volumique) représente environ $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, tandis que la proportion des pores saturés en eau (PPSE) représente environ $0,80 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Le sous-solage aurait augmenté de 1 % le volume occupé par l'air sur le site 5, alors qu'il l'aurait réduit d'autant sur les deux autres sites. La proportion des pores saturés en eau a également diminué sur le site 5 et augmenté sur les deux autres sites suite au sous-solage. Même après interpolation sur de plus grands volumes de sol, les effets du sous-solage sur les propriétés physiques apparaissent mitigés.

Tableau 7 : Volumes occupés par l'air, l'eau et le sol de 0 à 30 cm de profondeur dans des transects de 10 à 15 m de long réalisés sur trois sites d'essais de sous-solage.

Site	Parcelle	Nombre d'observations	Air	Eau	Sol	PPSE
			Proportion du volume occupé (cm ³ /cm ³)			
4	Témoin	416	0,111	0,440	0,449	0,80
	Sous-solée	416	0,080	0,459	0,462	0,85
5	Témoin	816	0,097	0,371	0,532	0,79
	Sous-solée	816	0,107	0,359	0,533	0,77
10	Témoin	816	0,098	0,394	0,508	0,80
	Sous-solée	816	0,091	0,377	0,531	0,81

Rentabilité de l'opération de sous-solage

Les coûts de sous-solage ont été calculés avec les deux approches décrites précédemment, soit avec le calculateur de l'IRDA (Pelletier, 2014) et avec les Références économiques (RE) du CRAAQ. Les résultats sont rapportés dans le Tableau 8. Comme premier constat, les coûts générés par le calculateur de l'IRDA sont généralement plus élevés que ceux des RE. Dans le premier cas, les coûts de sous-solage ont varié entre 113 et 153 \$/ha (moyenne = 133 \$/ha). Les coûts calculés sur le site 10 (435 \$/ha) n'ont pas été retenus, car ils ont été réalisés en parcelles expérimentales sur la station de L'IRDA, ce qui a diminué d'environ 75 à 80 % la capacité effective de travail (ha/h) par rapport aux autres sites. Par ailleurs, en utilisant les RE, les coûts ont varié de 95 à 126 \$/ha (moyenne = 106 \$/ha). Plusieurs facteurs font varier le coût de sous-solage, dont principalement le type de sol, la profondeur de sous-solage, la force du tracteur et la sous-soleuse utilisée (le nombre de dents, la présence d'ailettes, la conformation du bâti et des étançons, etc.). Certains de ces facteurs sont rapportés au Tableau 12 à l'Annexe 2. Le site 5 présente les coûts les plus élevés en raison, entre autres, de la profondeur de travail qui y était la plus grande. Toutefois, même en standardisant cette profondeur, comme c'est le cas dans les RE où une profondeur de 60 cm est utilisée systématiquement, le coût demeure plus élevé relativement aux autres sites parce qu'il faut utiliser un tracteur plus puissant. Évidemment, la capacité effective de travail (ha/h) et la profondeur de travail avec laquelle le sous-solage peut être réalisé dépendent de la puissance du tracteur utilisé. Dans le contexte où le sous-solage doit être réalisé dans une fenêtre de temps relativement étroite, ce facteur peut être très important. Or, cela comporte aussi des conséquences importantes sur les coûts et il y a certainement un équilibre à rechercher, entre d'un côté la profondeur et la vitesse d'exécution recherchée et de l'autre, le coût de l'opération. Aussi, la disponibilité de tels tracteurs à la ferme sera un facteur déterminant, par rapport à la réalisation de tels travaux à forfait. En conclusion, sans rien enlever à l'utilité des RE du CRAAQ, où une certaine standardisation est nécessaire afin de donner un premier aperçu des coûts de sous-solage aux futurs utilisateurs de cette pratique, les résultats indiquent qu'il est probablement préférable de calculer le coût réel d'une telle opération pour chaque situation à la ferme.

L'évaluation du coût de sous-solage est d'autant plus importante quand on cherche à connaître le seuil de rentabilité de cette opération en termes de gain de rendement à obtenir dans les années suivant le sous-solage, afin d'amortir son coût. Selon le Tableau 8, les gains de rendements à obtenir auraient varié entre 400 à 800 kg/ha dans le cas des céréales à paille (excepté le seigle), entre 600 à 700 kg/ha pour le maïs-grain et entre 200 à 300 kg/ha dans le cas du soya. Certains de ces gains de rendement peuvent paraître élevés par rapport aux rendements réellement obtenus, car seulement deux sites ont présenté des gains de rendements suffisants pour récupérer les coûts du sous-solage soit le site 5 dès l'année suivante (en 2013) et les sites 5 et 8 en 2014. Par ailleurs, ces augmentations de rendement n'étaient statistiquement significatives que sur le site 5 en 2013 (Tableau 4). Il est aussi intéressant de noter que le site présentant la meilleure performance économique d'ensemble est aussi celui présentant les coûts de sous-solage les plus élevés.

Tableau 8 : Coûts du sous-solage et gains de rendement à obtenir en 2013 et 2014 pour rentabiliser l'opération sur dix sites d'essai.

	Site									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Coût du sous-solage – Calculateur IRDA (\$/ha)	116,60	144,04	114,65	152,75	151,77	112,67	131,61	136,51	135,43	435,40
Coût du sous-solage – RE CRAAQ (\$/ha)	122,35	97,97	97,97	124,00	125,66	97,97	96,72	95,46	97,97	125,66
2013	Orge	Blé	Avoine	Maïs-ensilage	Blé	Soya	Orge	Aucune culture	Millet perlé	Sorgho fourrag.
Rendement parcelles non sous-solées (kg/ha)	1 960	5 690	4 170	12 280	2 000	2 130	2 290	n.a.	n.a.	4 920
Rendement parcelles sous-solées (kg/ha)	2 430	5 540	4 600	12 570	3 410	2 270	2 640	n.a.	n.a.	4 380
Différence de rendement (kg)	470	-150	430	290	1 410	140	350	n.a.	n.a.	-540
Différence en pourcentage (%)	24,0	-2,6	10,3	2,4	70,5	6,6	15,3	n.a.	n.a.	-11,0
Prix de vente des grains (\$/tm)	165	250	200	31	250	400	165	n.a.	n.a.	43
Gains de rendement à obtenir (kg/ha) – IRDA	707	576	573	4 943	607	282	798	n.a.	n.a.	10 126
Gains de rendement à obtenir (kg/ha) – RE	742	392	490	4 013	503	245	586	n.a.	n.a.	2 600
2014	Orge grainée	Soya	Soya	Soya	Maïs-grain	Blé	Mil-Trèfle	Soya	Seigle	Orge
Rendement parcelles non sous-solées (kg/ha)	2 120	4 080	3 040	2 950	5 720	3 010	6 550	2 850	1 440	5 010
Rendement parcelles sous-solées (kg/ha)	1 920	3 890	2 840	3 130	6 550	2 780	6 910	3 430	1 280	5 070
Différence de rendement (kg)	-200	-190	-200	180	830	-230	360	580	-160	60
Différence en pourcentage (%)	-9,4	-4,7	-6,6	6,1	14,5	-7,6	5,5	20,4	-11,1	1,2
Prix de vente des grains (\$/tm)	210	460	460	460	205	285	120	460	87	210
Gains de rendement à obtenir (kg/ha) – IRDA	555	313	249	332	740	395	1 097	297	1 559	2 073
Gains de rendement à obtenir (kg/ha) – RE	583	213	213	270	613	344	806	208	1 128	532

Tous les rendements sont rapportés à 15 % d'humidité

Cependant, le sous-solage peut être une opération dispendieuse qu'il ne faut pas considérer comme une opération récurrente, d'où l'importance d'analyser les coûts et bénéfices d'une telle opération. Le Tableau 9 présente une analyse de l'effet de la séquence culturale sur la rentabilité de l'opération de sous-solage. Le coût moyen du sous-solage est fixé à 132,89 \$/ha et on prévoit récupérer les coûts à 50 % la première année, 30 % la deuxième année et 20 % la troisième année suivant le sous-solage. Les gains de rendement nécessaires sont ainsi plus facilement atteignables, lorsqu'ils sont répartis sur trois ans après le sous-solage. Les résultats sont aussi présentés pour deux séquences culturales d'une même rotation. Ainsi, la première année, 316 kg/ha de plus de maïs-grain ou 233 kg/ha de plus de blé suffirait pour récupérer 50 % du coût de sous-solage. On constate également que les gains de rendement à obtenir dans les années 3 et 4 sont encore plus faibles par rapport au rendement de base. Cependant, beaucoup dépendra de la réponse des cultures à l'effet du sous-solage pour corriger les problèmes de compaction.

Tableau 9 : Gains de rendement à obtenir selon deux séquences culturales de la même rotation.

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4
Coût/bénéfices (\$/ha)	Sous-solage (132,89)	50 % 66,44	30 % 39,87	20 % 26,57
Séquence 1		Maïs-grain	Soya	Blé
Seuil de rentabilité (kg/ha)		316	85	90
Séquence 2		Blé	Maïs-grain	Soya
Seuil de rentabilité (kg/ha)		233	186	56

Les résultats présentés au Tableau 9 confirment un élément de régie fort intéressant en production de grains, soit celui de prévoir le sous-solage après une culture de céréales, afin de tabler sur des gains de rendement plus facilement atteignables dans le maïs-grain l'année suivante. Car il semble plus facile d'obtenir un gain de rendement de 316 kg/ha dans le maïs-grain que de 233 kg/ha dans le blé d'alimentation humaine. Ce scénario est aussi plus favorable sur le plan opérationnel, car les chances de succès du sous-solage et son efficacité à décompacter le sol dépendent de l'état hydrique du sol. Or, le sol est généralement plus sec après la récolte des céréales au mois d'août qu'après la récolte du soya ou du maïs en automne. Finalement, au Tableau 10, les gains de rendements à obtenir selon les deux scénarios de séquences culturales sont présentés en fonction de coûts croissants de sous-solage. Ces résultats tendent vers la même conclusion, c'est-à-dire que dans la mesure du possible, les producteurs auraient avantage à sous-soler après la récolte des céréales et de semer du maïs-grain l'année suivante.

Tableau 10 : Analyse de sensibilité - Gains de rendement à obtenir selon différents coûts de sous-solage pour deux séquences culturales de la même rotation.

	Coût du sous-solage (\$/ha)					
	100	115	130	145	160	200
Séquence 1						
			Seuil de rentabilité (kg/ha)			
Maïs-grain	243	279	317	352	389	486
Soya	67	77	87	97	106	133
Blé	72	82	93	104	115	143
Séquence 2						
			Seuil de rentabilité (kg/ha)			
Blé	179	206	233	260	286	358
Maïs-grain	146	168	189	211	233	291
Soya	44	51	58	64	71	89

Effet du sous-solage sur la réduction des émissions de GES

Les estimations des émissions de GES produites sur les dix sites à l'essai sont présentées au Tableau 11. La première ligne fait état des émissions de CO₂ liées la consommation de carburant lors de l'opération de sous-solage sur les dix sites. Ces émissions varient de 41 à 116 kg éq CO₂/ha. La suite du tableau fait état des quantités d'azote apportées avec les engrais de synthèse et organiques, ainsi que des prélèvements d'azote par les cultures, utilisées pour estimer les émissions cumulées de N₂O selon deux méthodes de calcul (A et B), présentées antérieurement et en Annexe 5. Brièvement, la méthode A calcule les émissions directes et indirectes de N₂O liées aux apports d'engrais azotés, basées sur les méthodes de calcul présentées dans le Rapport d'inventaire national des sources et puits de GES (Environnement Canada, 2013), ainsi que des augmentations d'émissions prévues de 2 et 4 fois supérieures dans un sol compact par rapport à un sol sous-solé ou non compact (Bakken et al., 1987). La méthode B se base sur des travaux de Gregorich et al. (2014), desquels sont tirés des coefficients d'émissions de N₂O variant en sols compacts et non compacts (sous-solés) en fonction des prélèvements de N et des surplus de N apportés par rapport à ces prélèvements.

Basées sur la méthode A, les émissions de N₂O dans un sol compact auraient varié de 1279 à 6316 kg éq CO₂/ha avec un scénario d'augmentation des émissions de deux fois (2X) celle d'un sol non compact (ou sous-solé) et de 2558 à 12633 kg éq CO₂/ha avec un scénario 4X. Dans un sol sous-solé et rendu non compact, ces émissions varieraient de 681 à 3274 kg éq CO₂/ha, soit pratiquement 2 à 4 fois inférieures à celles dans un sol compact, puisque les émissions additionnelles de CO₂ liées aux opérations de sous-solage sont pratiquement négligeables par rapport à celles causées par les émissions de N₂O.

Basées sur la méthode B, les émissions de N₂O dans un sol compact auraient varié de 312 à 5389 kg éq CO₂/ha, tandis qu'elles auraient varié de 185 à 2093 kg éq CO₂/ha dans le sol non compact ou sous-solé, soit près de la moitié de ce qu'elles sont en sol compact, même si les émissions de CO₂ liées à l'opération de sous-solage sont incluses dans le bilan. Les émissions de N₂O basées sur la méthode B peuvent paraître plus faibles que celles basées sur la méthode A et pourraient s'expliquer par le fait que les coefficients utilisés dans la méthode B reflètent uniquement les émissions directes de N₂O mesurées en parcelles expérimentales et non les émissions indirectes liées à la redéposition des émissions d'azote ammoniacal ou à la lixiviation du nitrate. Peu importe la précision de ces estimations, il faut surtout souligner que les émissions liées à la consommation de carburant pour le sous-solage sont négligeables par rapport aux émissions de N₂O liées à la gestion de l'azote au champ et à l'amplification de ces émissions causées par la compaction des sols. Cependant, il faut aussi souligner que les opérations de sous-solage ne se sont pas nécessairement traduites par des améliorations significatives des conditions d'aération ou de réduction de la proportion des pores saturés en eau, du moins sur les trois sites où de telles mesures ont été réalisées (Tableau 7). Ainsi, dans une perspective de réduction des émissions de GES, il y aurait avantage à améliorer à la fois la gestion de l'azote au champ et les conditions d'aération du sol, même si cela entraînerait des opérations énergivores ou consommatrices en carburant, dans la mesure où elles sont justifiées par des gains de rendement, de productivité et d'amélioration du profil cultural.

Tableau 11 : Bilan des émissions de GES calculées sur les parcelles témoins et sous-solées de dix sites d'essais.

	Site										Min.	Max.	Moy.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
2012														
Sous-solage (kg éq CO ₂ /ha)	63	108	93	116	101	81	101	41	85	81	41	116	87	
2013	Orge	Blé	Avoine	Maïs	Blé	Soya	Orge	n.a.	n.a.	Sorgho				
N engrais (kg N/ha)	36	133	51	75	139	58	63	138	108	0	0	139	80	
N prélevé NSS† (kg N/ha)	26	108	72	138	36	117	30	0	0	94	0	138	62	
N prélevé SS‡ (kg N/ha)	30	111	79	140	57	123	35	0	0	86	0	140	66	
2014	Orge	Soya	Soya	Soya	Maïs	Blé	Foin	Soya	Seigle	Orge				
N engrais (kg N/ha)	31	0	0	52	116	53	56	0	61	73	0	116	44	
N prélevé NSS (kg N/ha)	37	236	158	158	58	63	138	150	19	70	19	236	109	
N prélevé SS (kg N/ha)	35	232	146	169	76	52	142	178	15	71	15	232	112	
Émissions de N₂O (kg éq CO₂/ha)														
<i>Méthode A (compaction)</i>														
2013	SS	446	1658	639	925	1721	717	783	1715	1340	0	0	1721	995
	NSS scénario 1 (x2)	892	3316	1279	1851	3442	1434	1566	3430	2680	0	0	3442	1989
	NSS scénario 2 (x4)	1784	6632	2558	3702	6884	2868	3133	6860	5360	0	0	6884	3978
2014	SS	388	0	0	646	1437	659	694	0	762	901	0	1437	549
	NSS scénario 1 (x2)	775	0	0	1292	2875	1318	1389	0	1525	1802	0	2875	1098
	NSS scénario 2 (x4)	1550	0	0	2584	5749	2635	2778	0	3050	3605	0	5749	2195
Bilan des émissions														
	SS (N₂O + CO₂)	897	1767	732	1688	3259	1457	1579	1756	2187	983	681	3274	1630
	NSS scénario 1 (x2)	1667	3316	1279	3143	6316	2752	2955	3430	4205	1802	1279	6316	3087
	NSS scénario 2 (x4)	3334	6632	2558	6286	12633	5504	5910	6860	8410	3605	2558	12633	6173
<i>Méthode B (N prélevé + surplus de N)</i>														
2013	SS	170	665	383	557	420	699	212	n.a.	n.a.	302	170	699	426
	NSS	377	1653	951	1544	673	1852	465	n.a.	n.a.	921	377	1852	1054
2014	SS	189	1319	829	961	484	285	498	1010	100	393	100	1319	607
	NSS	516	3735	2504	2504	977	865	1426	2376	312	1002	312	3735	1622
Bilan des émissions														
	SS (N₂O + CO₂)	422	2093	1304	1634	1005	1066	811	1051	185	777	185	2093	1035
	NSS	893	5389	3454	4047	1650	2717	1891	2376	312	1923	312	5389	2465

†NSS parcelle témoin non sous-solée

‡SS : parcelle sous-solée

CONCLUSION

Le projet devait démontrer sur dix sites à l'essai que le sous-solage de sols compacts peut améliorer leur productivité et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les conditions de sous-solage étaient optimales au moment des travaux à la fin du mois d'août et en septembre 2012. La plupart des sites avaient été cultivés en céréales, en prairie, ou avaient été abandonnés par manque de productivité. Les sols étaient relativement secs et la plupart des sous-soleuses ont été mises à l'épreuve cette année-là par l'effort nécessaire pour décompacter les sols. Des engrais verts avaient été préalablement semés, mais ont produit peu de biomasse durant l'automne sur la plupart des sites. L'amélioration de la productivité des sols à la suite de cette opération a aussi été relativement modeste et variable sur les deux années suivantes, où les rendements ont été mesurés. Sur quelques sites les améliorations ont été importantes aux yeux des producteurs en première année (5/8 sites), mais peu souvent significatives (2/8 sites) en termes statistiques. Dans certains cas, l'ensemble du champ se serait amélioré par rapport aux années antérieures sans produire de différence significative par rapport aux parcelles témoins. L'amélioration des conditions environnant les parcelles témoins de trop petite dimension pourrait expliquer le manque d'effet dans quelques cas. L'effet semble aussi s'estomper en deuxième année, avec un nombre plus restreint de sites ayant des différences positives et significatives (1/10 sites). L'observation de profils de sols a d'ailleurs révélé des conditions extrêmes de compaction sur la plupart des sites, corroborées par les analyses sur trois sites, de propriétés physiques et de résistance à la pénétration d'un cône. La proportion de pores saturés en eau y était très élevée, tandis que la teneur en air était limitée à l'horizon de surface (0-20 cm). Les opérations de sous-solage auraient eu des effets relativement modestes et variables pour améliorer la condition physique des sols, malgré qu'elles aient été réalisées pour la plupart dans des conditions optimales de sol sec à l'été 2012. À la vue de ces résultats, la pratique du sous-solage doit quand même être améliorée pour augmenter le taux de réussite et la pérennité de l'opération. Les travaux récents de Weill (2014) fournissent d'ailleurs plusieurs pistes de solution à cet effet. L'analyse économique a permis de calculer les coûts de l'opération de sous-solage sur chaque site. Avec des coûts variant de 113 à 153 \$/ha, légèrement supérieurs aux estimés des références économiques du CRAAQ, l'opération de sous-solage pourrait se rentabiliser sur une période de trois ans en s'assurant d'obtenir une augmentation de rendement de 200 à 400 kg/ha de maïs grain en première année, suivie d'augmentations annuelles de moins de 100 kg/ha dans le soya et le blé les années suivantes. L'effet du sous-solage sur les prélèvements en azote par les cultures et l'azote résiduel en fin de saison (nitrate) a aussi été relativement marginal et inégal. Les exportations de N ont été significativement plus élevées seulement sur 2 sites chaque année, tandis que l'azote résiduel était faiblement influencé par le sous-solage (2 sites en deuxième année) ou par le surplus de N calculé à partir des apports d'engrais azotés et des prélèvements. Les émissions de GES (CO₂) reliées à la consommation de carburant pour le sous-solage ont été calculées, de même que les émissions de GES (N₂O) reliées à l'épandage d'engrais azotés. Même si la pratique ne semble pas toujours efficace du point de vue agronomique ou rentable, les émissions de GES liées à l'opération et à la consommation de carburant sont plus de dix fois inférieures à celles liées aux émissions de N₂O au champ. Ces émissions seraient encore deux à quatre fois plus importantes en sols compacts, d'où l'importance de mettre en place des pratiques durables pour réduire la compaction, ou pour améliorer les conditions de réussite du sous-solage.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATIONS



Marc-Olivier Gasser. agr. Ph.D.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein

Québec, Québec G1P 3W8

Tél.: (418) 643.2380 poste 650

Courriel: marc-o.gasser@irda.qc.ca

Site internet: www.irda.qc.ca

RÉFÉRENCES

- Ball, B.C. 2013. Soil structure and greenhouse gas emissions: A synthesis of 20 years of experimentation. *Eur. J. Soil Sci.* 64:357–373.
- Barken, L.R., T. Børresen, and A. Njøss. 1987. Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Soil Sci.* 38: 541-552.
- Belzile, L. et H. Grondines. 2015. Compléments d'analyse économique à la recherche agronomique et agroenvironnementale en grandes cultures. Rapport final présenté au Réseau Innovagrains. IRDA. 68 pages.
- Bernier, R. 1986. Résultats préliminaires de décompaction par sous-solage suite à des travaux de drainage de surface. pp. 109-138. 13e 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. 13e Colloque de génie rural. Université Laval. R. Thériault (éd.). 220 p.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2014. Machinerie – Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés AGDEX 740/825. CRAAQ. 18 pages.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation (2^e édition). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Québec. 473 p.
- Chamen, W.C.T., G.D. Vermeulen, D.J. Campbell et C. Sommer. 1992. Reduction of traffic-induced soil compaction: a synthesis. *Soil and Till. Res.* 24(4): 303-318.
- Clough, T.J., R.R. Sherlock and D.E. Rolston. 2005. A review of the movement and fate of N₂O in the subsoil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* 72: 3-11.
- Environnement Canada. 2013. Rapport d'inventaire national 1990–2011 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. <https://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=Fr&xml=A07ADAA2-E349-481A-860F-9E2064F34822> [consulté en mai 2015].
- Fan, J., M. Hao et S.S. Malhi. 2010. Accumulation of nitrate-N in the soil profile and its implications for the environment under dryland agriculture in northern China : A review. *Can. J. of Soil Sci.* 90: 429-440.
- Fédération des producteurs de cultures commerciales. Le Quotidien (<http://www.fpccq.qc.ca/mise-en-marche/le-quotidien/>), [consulté en mai 2015].
- Financière agricole du Québec (FADQ) :
- 2014a. Historique du maïs – Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles. 6 p.
 - 2014b. Historique du soya – Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles. 4 p.
 - 2014c. Historique du blé d'alimentation humaine – Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles. 4 p.
 - 2014d. Historique de l'orge – Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles. 5 p.
 - 2014e. Historique de l'avoine – Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles. 5 p.
 - 2014f. Tableau résumé d'informations administratives et économiques – Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles – Productions végétales Blé d'alimentation humaine. 1 p.

- Gagnon, B., N. Ziadi, P. Rochette, M.H. Chantigny et D.A. Angers. 2011. Fertilizer source influenced nitrous oxide emissions from a clay soil under corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 595-604.
- 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.
- GIEC. 2000. Recommandations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Programme relatif aux inventaires nationaux de gaz à effet de serre. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/french/gpgaum_fr.html [consulté en mai 2015].
- GIEC/OCDE/AIE. 1997. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Organisation de coopération et de développement économique et Agence internationale de l'énergie. Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre – version révisée 1996. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/french.html> [consulté en mai 2015].
- GIEC. 1995. Contribution du Groupe de travail I au 2^e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. p. 22. Cambridge University Press. Cambridge. Royaume-Uni. http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php [Page consultée en mai 2015].
- Graham et al., 2008. Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles. *Atmospheric Environment*. 42: 4665-4681.
- Gregorich, E.G. . N.B. McLaughlin, D.R. Lapen, B.L. Ma et P. Rochette. 2014. Soil compaction, both an environmental and agronomic culprit: increased nitrous oxide emissions and reduced plant nitrogen uptake. *Soil Sci. Soc. Agron. J.* 78(6): 1913-1923.
- Klefoth, R.R., T.J. Clough, O. Oenema and J.-W. Van Groenigen. 2014. Soil bulk density and moisture content influence relative gas diffusivity and the reduction of nitrogen-15 nitrous oxide. *Vadose zone*. 13(11): 1-8.
- Linn. D.M. et J.W. Doran. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1267-1272.
- McCann. T.J. 2000. Fossil fuel and derivative factors. Rapport préparé pour Environnement Canada par T.J. McCann and Associates Ltd.
- MDDEP. 2011. Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2009 et évolution depuis 1990. Accessible au www.mddep.gouv.qc.ca/changements/ges/2009/inventaire1990-2009.pdf [consulté en mai 2015].
- MDDEFP. 2013. Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2010 et leur évolution depuis 1990. Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. Direction des politiques de la qualité de l'atmosphère. 20 p.
- Machefert, S.E., N.B. Dise, K.W.T. Goulding et P.G. Whitehead. 2002. Nitrous oxide emission from a range of land uses across Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6: 325-337.
- Pagliai, M., N. Vignozzi et S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage. Res.* 79: 131-143.
- Pelletier, F. 2014. Calculateur du coût des opérations culturales. Institut de recherche en agroenvironnement (IRDA). Communication personnelle.
- Raper, R.L. et J.S. Bertgold. 2002. In row subsoiling: A review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *Applied Engineering in Agriculture*. 23(4): 463-471.

- Rochette, P., D.E. Worth, R.L. Lemke, B.G. McConkey, D.J. Pennock, C. Wagner-Riddle et R.L. Desjardins. 2008. Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country-specific methodology. *Canadian Journal of Soil Science*. 88:641-654.
- SAS Institute. 2003. SAS User's Guide. Statistics. Version 9.2. SAS Inst., Carry, NC.
- Statistiques Canada. 2014. Base de données de CANSIM, tableau 328-0015, trimestre 1.
- Weill, A. 2014. Comprendre et réussir le sous-solage. Rapport du CETAB+, Victoriaville, 45 p. www.cetab.org/publications. [consulté en mai 2015].

ANNEXE 1

Sols argileux profonds (séries Kamouraska, Saint-Pascal) : sols développés sur des dépôts profonds de sédiments d'origines marines



Compaction	Site 1	Site 2	Site 4	Site 5
Début	17 - 25 cm	19-30 cm	18 - 24 cm	15 - 23 cm
Fin	40 - ... cm	32 - ... cm	... cm	30 - 49 cm

Sols loameux à limoneux grossier sur limon fin (séries Lebras, Neuboix, Lévrard) : sols développés sur des dépôts de limon et de sables fins d'origines fluvio-lacustres. Sol stratifié ou laminé en profondeur.



Compaction	Site 7	Site 8	Site 10
Début	24 - 28 cm	11 - 30 cm	18 - 24 cm
Fin	40 - 70 cm	35 - ... cm	80 - ... cm

Sols loameux grossier sur till (séries Sainte-Marie, Woodbridge) : sols développés sur des tills d'origines glaciaires, sols peu profonds



Compaction	Site 6	Site 3	Site 9
Début	24 - 28 cm	11 - 30 cm	18 - 24 cm
Fin	40 - 70 cm	35 - ... cm	80 - ... cm

ANNEXE 2

Tableau 12 : Résumé des observations et des performances calculées pour dix sites d'essais de sous-solage réalisés en 2012.

Sites	Caractéristiques des sites										Min.	Max.	Moy.
	1	2	3	4 ^a	5	6	7	8 ^b	9	10			
Type de sol	Argile	Loam	Loam	Argile	Loam-argileux	loam	Loam	Loam	Loam	Loam-argileux			
Sous-soleuse (nbre de dents)	5	3	3	4	3	3	8	5	3	3	3	8	4
Orientation du sous-solage [¶]	60°	0°	60°	0°	90°	0°	45°	0°	60°	90°			
Calculateur IRDA													
Tracteur (kW) †	112	134	186	112	225	153	153	176	153	176	112	225	156
Profondeur (cm)	35	50 à 71	66	60	71 à 74	43 à 56	50,8	71	72,5	40 à 64	35	73	60
Largeur travail (m)	1,5	1,5	2,2	3,0	2,4	1,5	5,3	3,0	1,5	1,5	1,5	5,3	2,5
Nombre de passage (unité)	1	1	1	1	1	1	1	1 à 3	2	1	1	3	1,3
Superficie sous-solée (ha)	6	11,5	2,34	4,9	42,1	13,71	4,55	11,31	4	0,10			
Durée (heures)	7,5	16,8	2	7	42	15	4	15	5,5	0,5			
Consommation carburant (litres)	140	460	80	210	1568	409	170	173,1	125	3			
Vitesse de travail (km/h)	6,3	5,3	6,2	2,7	4,8	7,1	2,5	2,9	5,6	1,5	2,5	7,1	4,8
Capacité effective (ha/h)	0,80	0,68	1,17	0,70	1,00	0,91	1,14	0,75	0,73	0,2	0,68	1,17	0,88
Consommation (L/h)	18,7	27,4	40	30,0	37,3	27,3	42,5	11,5	22,7	6,0	11,5	42,5	28,6
Coûts totaux du sous-solage (\$/ha)	116,60	144,04	114,65	152,75	151,77	112,67	131,61	136,51	135,43	435,40	112,67	152,75	132,89
Coûts totaux du sous-solage (\$/h)	92,17	97,33	135,34	105,17	148,62	101,99	148,23	100,95	96,70	83,27	92,17	148,62	114,06
Données Références économiques du CRAAQ[¶]													
Tracteur (kW) †	216	114	114	N/A	162	114	N/A	153	114	162	114	216	141
Profondeur (cm)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Vitesse de travail (km/h)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Efficacité effective (%)	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Capacité effective (ha/h)	1,7	1,28	1,28	N/A	1,28	1,28	N/A	1,7	1,28	1,28	1,28	1,7	1,4
Consommation (L/h)	71,5	37,7	37,7	N/A	53,6	37,7	N/A	50,5	37,7	53,6	37,7	71,5	46,6
Utilisation annuelle (heure)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Coûts totaux du sous-solage (\$/ha)^c	122,35	97,97	97,97	124,00	125,66	97,97	96,72	95,46	97,97	125,66	95,46	125,66	106,23

¶ Par rapport à l'orientation des planches et/ou des drains.

† À la prise de force.

a. Il n'y a pas de données de référence pour des sous-soleuses 4 et 8 dents, la moyenne des coûts totaux à forfait des sous-soleuses à 3 et 5 dents a été retenue.

b. Les données proviennent des Références économiques du (CRAAQ): Machinerie – Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés AGDEX 740/825. Août 2014 et Machinerie – Données techniques AGDEX 740. Septembre 2008.

c. Les coûts totaux à forfait du sous-solage des Références économiques ont été majorés d'une marge bénéficiaire de 15 % pour couvrir les coûts d'administration, la rémunération de la gestion, les coûts de déplacements et les bris accidentels.

ANNEXE 3

Tableau 13 : Résumé des séquences culturales, des engrais verts et des apports en N provenant des engrais de ferme et de synthèse.

Site	Année	Culture	Engrais vert	Engrais minéral	Engrais de ferme printemps		Engrais de ferme automne		N total épandu	N disponible†
				kg N/ha	Type	kg N/ha	Type	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha
1	2012	Orge	Radis fourrager		n.a.		Fumier bovin	22	22	14
	2013	Orge		22	aucun	0	aucun	0	22	22
	2014	Orge /trèfle rouge		31	aucun	0	aucun	0	31	31
2	2012	Canola	Radis fourrager		n.a.		aucun	0	0	0
	2013	Blé	Avoine	108	aucun	0	Lisier porc	49	49	25
	2014	Soya		0	aucun	0	aucun	0	0	0
3	2012	Maïs	Radis huileux		n.a.		Lisier porc	99	99	51
	2013	Avoine		0	aucun	0	aucun	0	0	0
	2014	Soya		0	aucun	0	aucun	0	0	0
4	2012	Blé	Radis fourrager		n.a.		Lisier bovin	78	78	47
	2013	Maïs ensilage		28	aucun	0	aucun	0	28	28
	2014	Soya		52	aucun	0	aucun	0	52	52
5	2012	Aucune culture	Radis / moutarde		n.a.		Lisier porc	70	70	36
	2013	Blé /trèfle rouge		60	aucun	0	Lisier de porc	80	141	102
	2014	Maïs		74	aucun	0	Lisier de porc	80	154	116
6	2012	Avoine	Radis huileux		n.a.		Lisier porc	79	79	41
	2013	Soya		0	aucun	0	Lisier porc	32	32	17
	2014	Blé		0	Lisier porc	102	aucun	0	102	53
7	2012	Avoine	Radis fourrager		n.a.		aucun	0	0	0
	2013	Orge /trèfle rouge-mil		0	aucun	0	Fumier	97	97	63
	2014	Foin		0	Fumier	86	aucun	0	86	56
8	2012	Avoine	Radis fourrager		n.a.		aucun	0	0	0
	2013	Mil-trèfle rouge-raygrass		0	aucun		Fumier bovin + lisier porc	234	234	138
	2014	Soya		0	Fumier bovin	96	aucun	0	96	0
9	2012	Maïs ensilage	Radis fourrager		n.a.		aucun	0	0	0
	2013	Millet perlé/Avoine		0	Lisier bovin	78	Lisier bovin	102	180	108
	2014	Seigle d'automne		0	aucun	0	Lisier bovin	102	102	61
10	2012	Luzerne/Mélilot/ Fétuque			n.a.		aucun	0	0	0
	2013	Sorgho fourrager		0	aucun	0	aucun	0	0	0
	2014	Orge		25	Lisier porc	92	aucun	0	117	73

† N disponible correspond au total de l'engrais azoté minéral et de la fraction de l'azote non perdu des engrais de ferme calculée avec les coefficients du tableau A3-29 de l'Inventaire canadien des GES et utilisée pour le calcul des émissions de N₂O.

ANNEXE 4

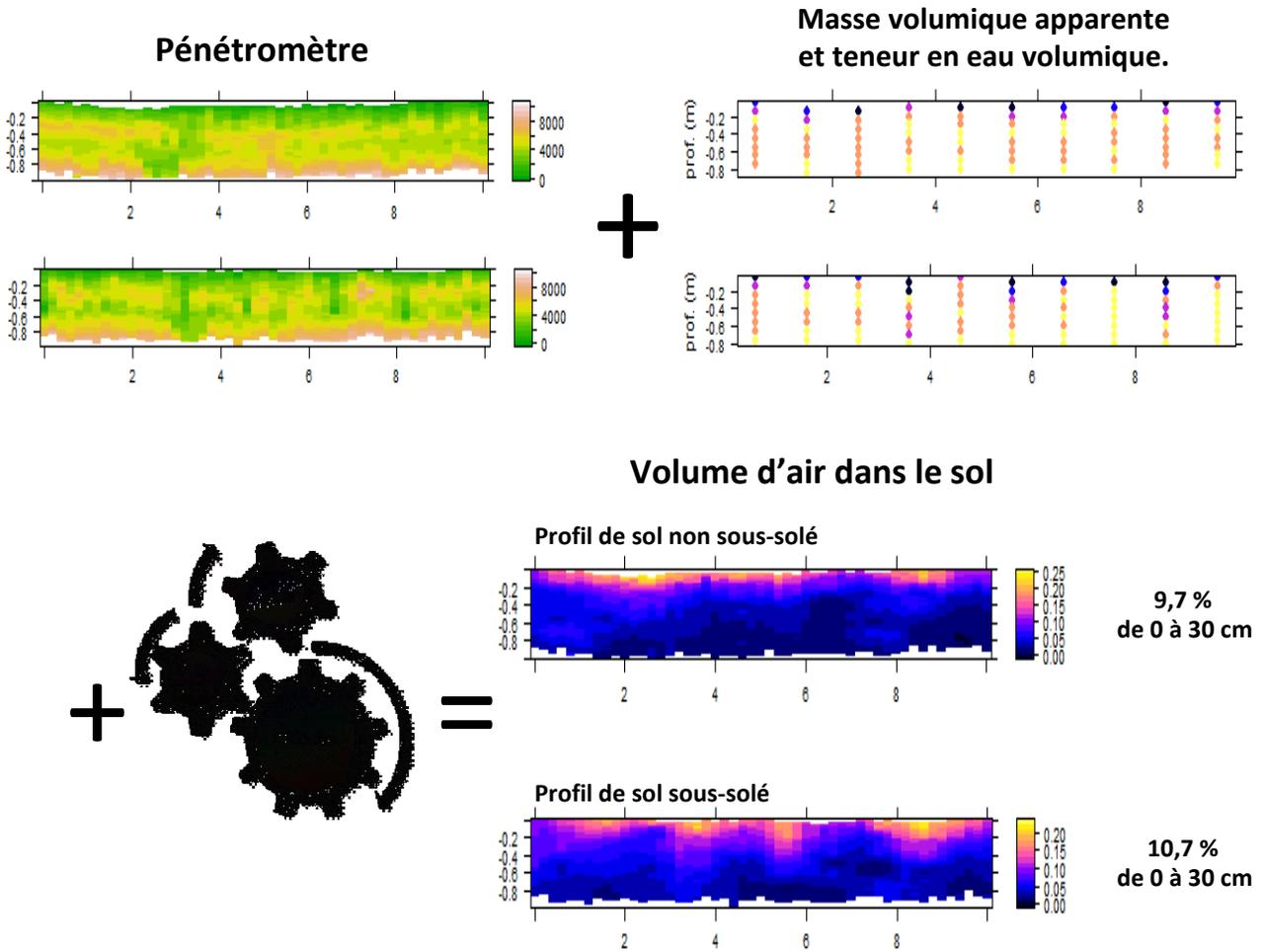


Figure 4 : Illustration succincte des procédures utilisées pour calculer le volume d'air présent de 0 à 30 cm de profondeur dans des profils de sol réalisés en transect sur des parcelles sous-solées et témoins.

ANNEXE 5

Méthodologie pour le calcul des gaz à effet de serre**1. Émissions directes de CO₂ associées à l'opération de sous-solage et à la consommation de carburant**

$$\text{CO}_{2\text{CARB}} = \text{Cons}_{\text{CARB}} \times \text{CE}_{\text{CARB}}$$

où : $\text{CO}_{2\text{CARB}}$ = émissions attribuables à la consommation de carburant (kg éq CO₂/ha)

$\text{Cons}_{\text{CARB}}$ = consommation de carburant diesel (L/ha)

CE_{CARB} = coefficient d'émission attribuable à la combustion du carburant : 3,007 (kg éq CO₂/L)

La consommation de carburant diesel pour le sous-solage a été mesurée à chaque site (Tableau 12 à l'Annexe 2). Les coefficients d'émission attribuables à la combustion du carburant sont calculés à partir des coefficients du tableau A8-11 de l'Inventaire canadien (Environnement Canada, 2013). Ces coefficients sont adaptés des travaux de McCann et al. (2000) et Graham et al. (2008).

	Coefficients d'émission (g/L de combustible)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Véhicules lourds à moteur diesel (dispositif perfectionné)	2663	0,11	0,151
Potentiel de réchauffement planétaire	1	23	310

	Coefficients d'émission (g éq CO ₂ /L de combustible)			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total
Véhicules lourds à moteur diesel (dispositif perfectionné)	2663	2,5	47	2,71

2. Les émissions de N₂O liées à la dénitrification en conditions de sol compact ou sous-solé**Méthode A : Des émissions de N₂O estimées de 2 à 4 fois supérieures en sols compacts**

Les émissions de N₂O dans les sols compacts seraient selon la littérature 2 à 4 fois supérieures à celles en sols non compacts (Bakken et al., 1987; Gregorich et al., 2014). En assumant que les sols sous-solés sont non compacts, les émissions directes et indirectes de N₂O reliés à l'usage d'engrais de synthèse et organiques ont été calculées sauf indication contraire sur les mêmes prémisses que dans le Rapport d'inventaire national des sources et puits de GES (Environnement Canada, 2013). Les engrais azotés incluent les engrais azotés de synthèse et la fraction de l'azote disponible et non perdu des engrais organiques, évaluée à partir du tableau A3-29 dans le Rapport d'inventaire.

Émissions directes de N₂O associées aux applications d'engrais azotés (dénitrification) (Rochette et al., 2008)

$$\text{N}_2\text{O}_{\text{ESA}} = [(\text{N}_{\text{ENG}} + \text{N}_{\text{FUM}}) \times \text{CE}_{\text{BASE}}] \times \frac{44}{28}$$

où : $\text{N}_2\text{O}_{\text{ESA}}$ = émissions provenant des engrais azotés (kg N₂O/an)

N_{ENG} = apport d'azote des engrais de synthèse (kg N/an)

N_{FUM} = apport d'azote disponible des engrais organiques (kg N/an)

CE_{BASE} = coefficient d'émission : 0,017 (kg N-N₂O/ kg de N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

Émissions indirectes de N₂O associées aux applications d'engrais azotés (GIEC/OCDE/AIE, 1997 et GIEC, 2000)

Volatilisation (GIEC/OCDE/AIE, 1997)

$$N_2O_{VD} = [(N_{ENG} \times FRAC_{GASF} + N_{FUM\ vol}) \times CE_{VD}] \times \frac{44}{28}$$

où : N_2O_{VD} = émissions attribuables à la volatilisation et au dépôt de l'azote (kg N₂O/an)

N_{ENG} = apport d'azote des engrais de synthèse (kg N/an)

$FRAC_{GASF}$ = fraction de l'azote d'engrais épandus sur les sols qui se volatilise sous forme de N-NH₃ et de N-NO_x : 0,1 (kg N-NH₃ + N-NO_x/kg N)

$N_{FUM\ vol}$ = azote des engrais organiques perdu sous forme de NH₃ ou N-NO_x (kg N/an)

CE_{VD} = coefficient d'émission attribuable à la volatilisation et au dépôt : 0,01 (kg N-N₂O/kg N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

Lessivage et ruissellement (GIEC/OCDE/AIE, 1997 et GIEC, 2000)

$$N_2O_L = [(N_{ENG} + N_{FUM}) \times FRAC_{LESSIVAGE} \times CE_{LESSIVAGE}] \times \frac{44}{28}$$

où : N_2O_L = émissions attribuables au lessivage et au ruissellement d'azote (kg N₂O/an)

N_{ENG} = apport d'azote des engrais de synthèse (kg N/an)

N_{FUM} = apport d'azote disponible des engrais organiques (kg N/an)

$FRAC_{LESSIVAGE}$ = fraction de l'azote perdue par lessivage et ruissellement : 0,3 (kg N/kg N) pour la zone climatique du Québec

$CE_{LESSIVAGE}$ = coefficient d'émission attribuable au lessivage/ruissellement : 0,025 (kg N-N₂O/kg de N)

$\frac{44}{28}$ = coefficient de conversion du N-N₂O en N₂O

Source	Facteurs d'émission	
	N ₂ O kg N-N ₂ O/kg N	CO ₂ kg éq CO ₂ /kg N
Sol non compact (sous-solé)		
Émissions directes (dénitrification)	0,017	8,28
Émissions indirectes (dénitrification suite à la volatilisation de NH ₃ ou au lessivage de NO ₃)	0,0085	4,14

Méthode B : En fonction de N apporté en surplus du N prélevé (pour toutes les cultures sauf les légumineuses)

Des équations linéaires d'émissions de N₂O par unité d'azote prélevée par les plantes ont été dérivées de l'étude de Gregorich et al. (2014) (*Fig. 7* dans leur article) pour des sols compacts et non compacts (sous-solés) et en fonction de la quantité de N apportée en surplus des prélèvements par la plante. Les équations ont été recalculées pour représenter les deux années d'étude 2003 et 2004 :

Sol compact : $y = 0,0955x + 29,02$; $R^2 = 0,90$

Sol non compact : $y = 0,047x + 11,25$; $R^2 = 0,35$

$N_2O_{\text{sous-solé}} = (((0,047 \times N_{\text{surplus sous-solé}} + 11,25) \times N_{\text{prélevé sous-solé}}) / 1000 \text{ g}) \times (44/28) \times 310$
$N_2O_{\text{compact}} = (((0,0955 \times N_{\text{surplus sous-solé}} + 29,02) \times N_{\text{prélevé compact}}) / 1000 \text{ g}) \times (44/28) \times 310$

où :

- $N_2O_{\text{sous-solé}}$ = émissions de N₂O avec sous-solage (kg N₂O / ha)
- N_2O_{compact} = émissions de N₂O sans sous-solage (kg N₂O / ha)
- $N_{\text{surplus sous-solé}}$ = N apporté en surplus de N prélevé avec sous-solage (kg N / ha)
- $N_{\text{surplus compact}}$ = N apporté en surplus de N prélevé sans sous-solage (kg N / ha)
- $N_{\text{prélevé sous-solé}}$: quantité d'azote prélevée avec sous-solage (kg N / ha)
- $N_{\text{prélevé compact}}$: quantité d'azote prélevée sans sous-solage (kg N / ha)
- 44/28 : coefficient stœchiométrique pour convertir N-N₂O en N₂O
- 310 : facteur pour convertir un kg de N₂O en kg éq, CO₂

Nsurplus est calculé par la différence entre la somme des quantités de N disponibles apportées avec les engrais et les prélèvements en N par la plante.

En fonction de N prélevé (pour les légumineuses comme le soya)

Des coefficients d'émissions de N₂O par unité d'azote prélevée par les plantes ont été dérivés de l'étude de Gregorich et al. (2014) (*Table 2* dans l'article) pour des sols compacts et non compacts (sous-solés). Les coefficients d'émissions utilisés représentent la moyenne des coefficients obtenus pour les deux années d'essais, 2003 et 2004.

Sol compact : 11,65 g N₂O -N / kg N prélevé

Sol non compact : 32,5 g N₂O -N / kg N prélevé

$N_2O_{\text{sous-solé}} = ((CE_{\text{sous-solage}} \times N_{\text{prélevé sous-solé}}) / 1000 \text{ g}) \times (44/28) \times 310$
$N_2O_{\text{compact}} = ((CE_{\text{compact}} \times N_{\text{prélevé compact}}) / 1000 \text{ g}) \times (44/28) \times 310$

où :

- $N_2O_{\text{sous-solé}}$ = émissions de N₂O avec sous-solage (kg N₂O / ha)
- N_2O_{compact} = émissions de N₂O sans sous-solage (kg N₂O / ha)
- $CE_{\text{sous-solage}}$ = coefficient d'émissions avec sous-solage (11,65 g N₂O -N / kg N prélevé)
- CE_{compact} = coefficient d'émissions sans sous-solage (32,5 g N₂O -N / kg N prélevé)
- $N_{\text{prélevé sous-solé}}$: quantité d'azote prélevée avec sous-solage (kg N / ha)
- $N_{\text{prélevé compact}}$: quantité d'azote prélevée sans sous-solage (kg N / ha)
- 44/28 : coefficient stœchiométrique pour convertir N-N₂O en N₂O
- 310 : facteur pour convertir un kg de N₂O en kg éq CO₂

ANNEXE 6

Profils de sols réalisés au pénétromètre et à la sonde de conductivité électrique sur des transects dans des parcelles témoins et sous-solées

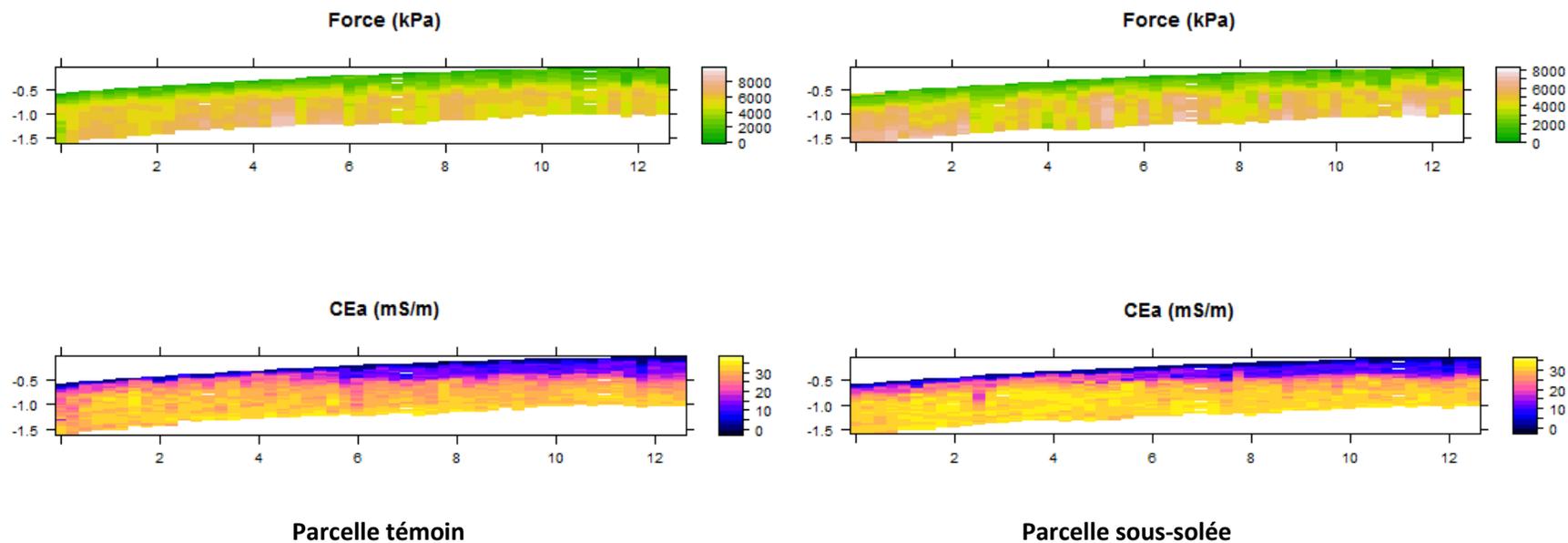


Figure 5 : Site 4 : argile lourde. Transects de pénétromètre et de sonde de conductivité électrique apparente (échelles en mètres).

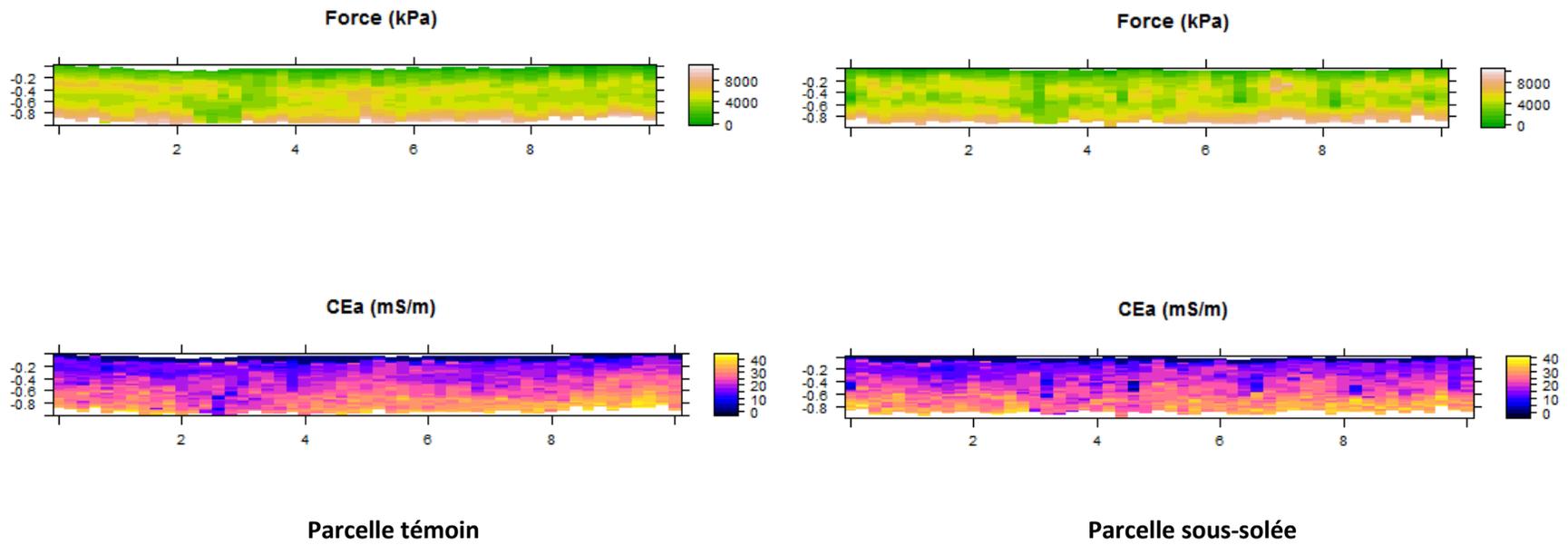


Figure 6 : Site 5 : loam limono-argileux. Transects de pénétromètre et de sonde de conductivité électrique apparente (échelles en mètres).

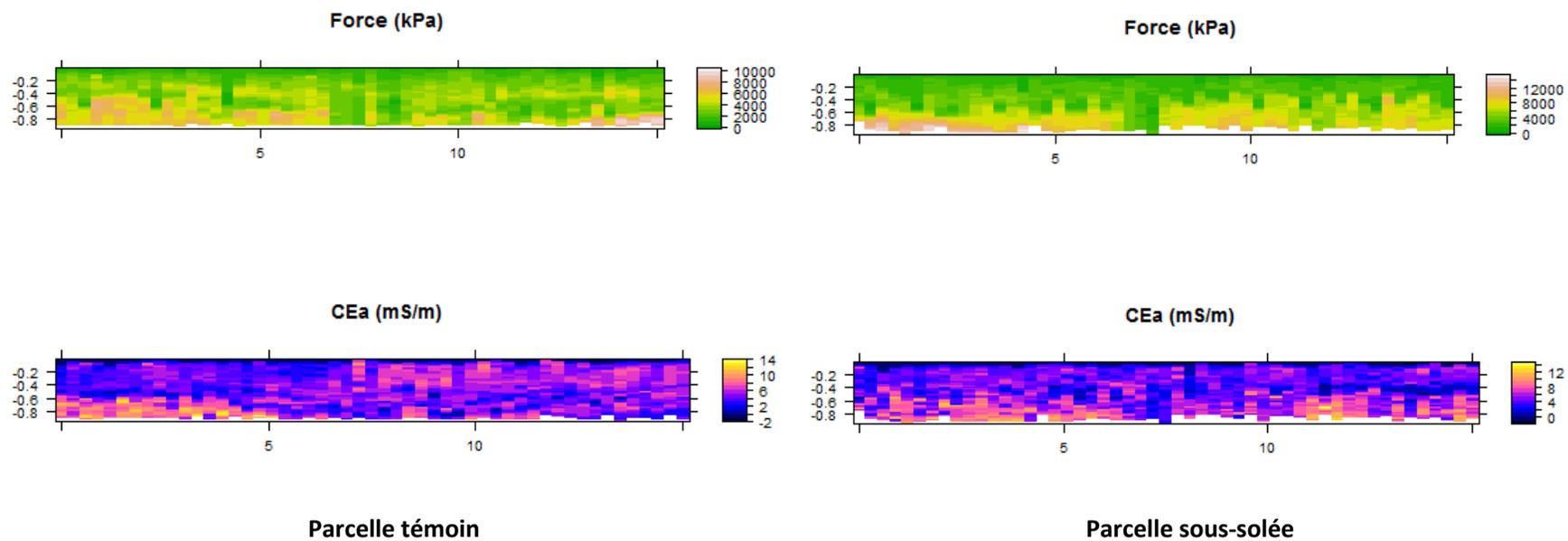


Figure 7 : Site 10 : loam argileux. Transects de pénétromètre et de sonde de conductivité électrique apparente (échelles en mètres).

ANNEXE 7

Volumen occupés par l'air, l'eau et le sol dans des transects de parcelles témoins et sous-solées

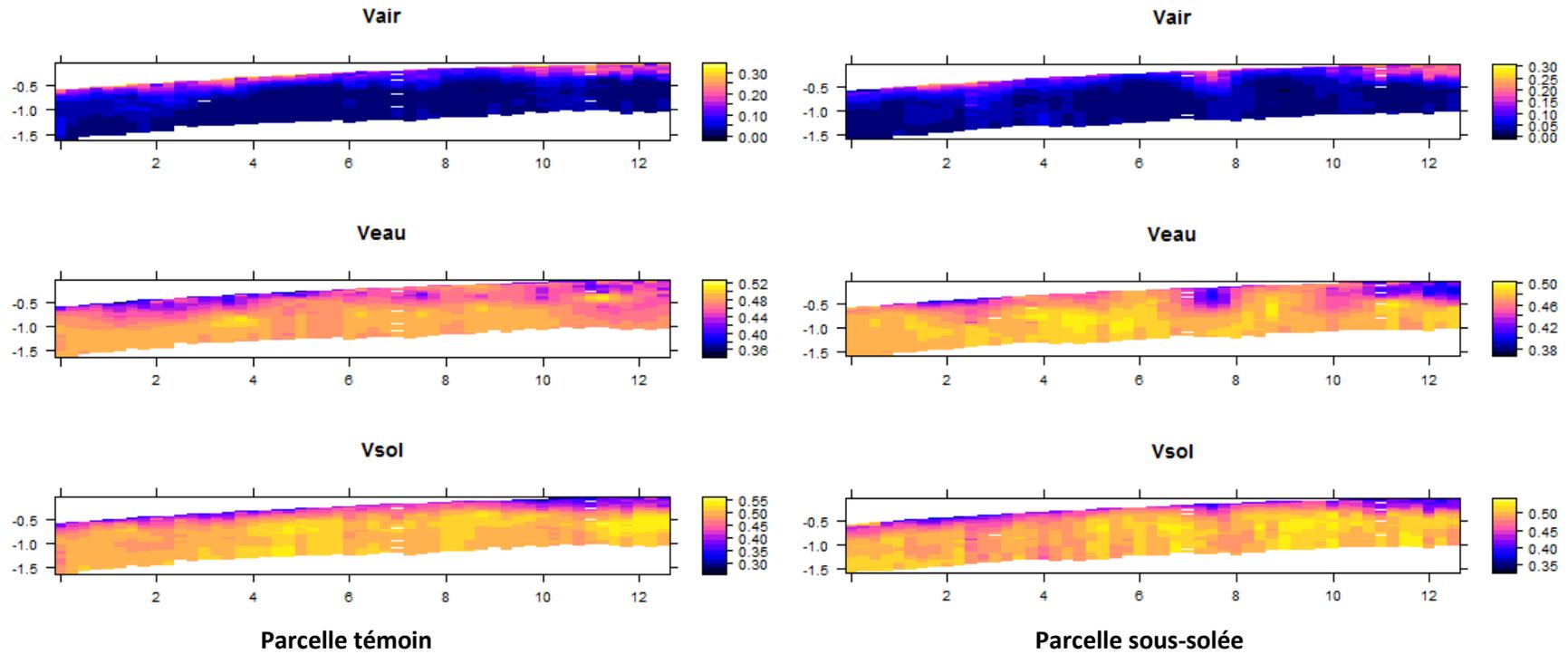


Figure 8 : Site 4 : argile lourde. Transects de volumes occupés par l'air, l'eau et le sol (échelles en mètres).

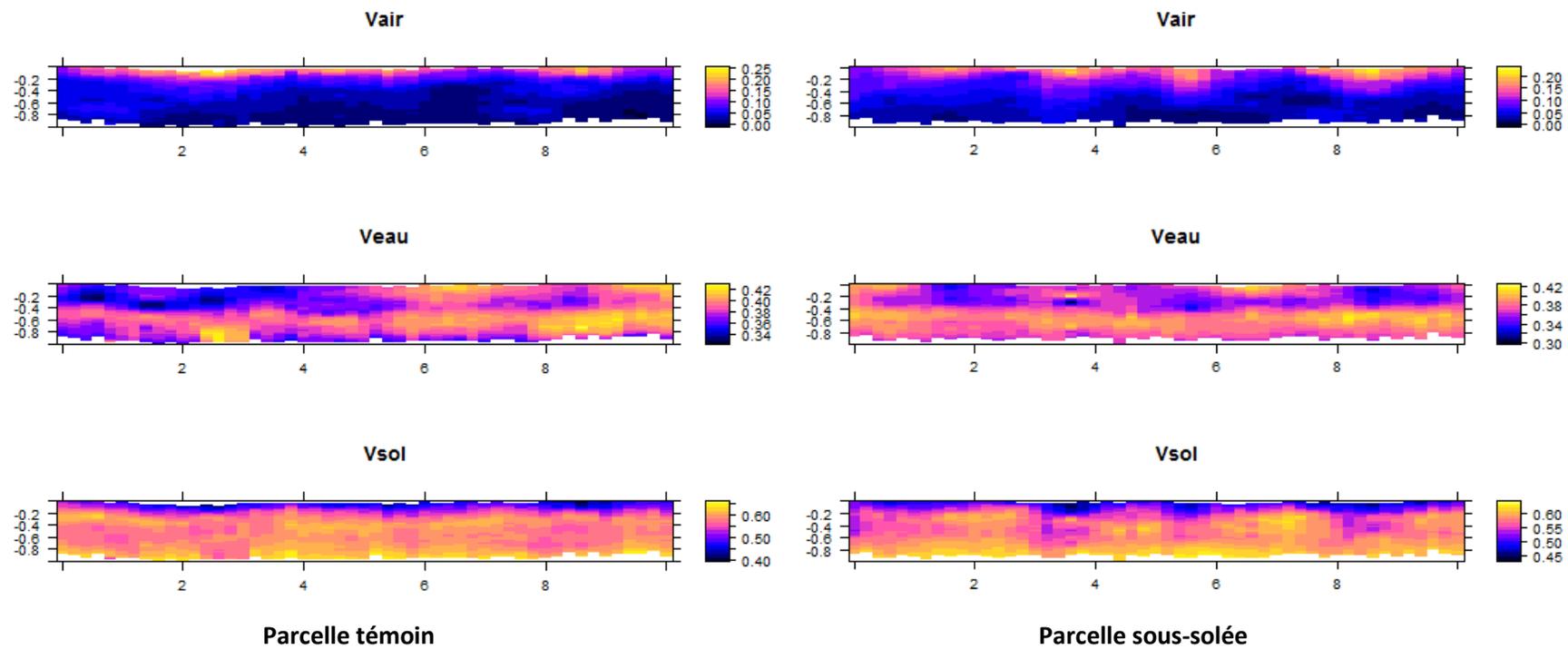


Figure 9 : Site 5 : loam limono-argileux. Transects de volumes occupés par l'air, l'eau et le sol (échelles en mètres).

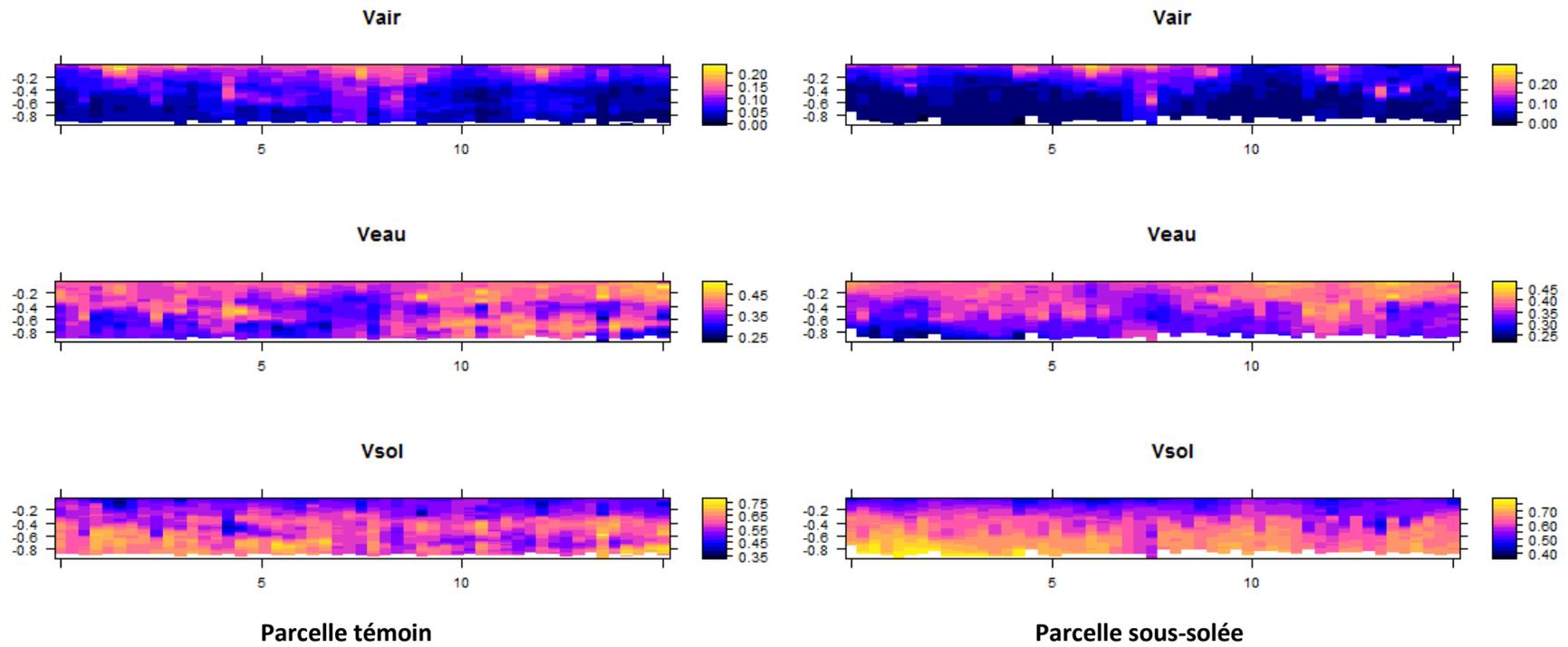


Figure 10 : Site 10 : loam argileux. Transects des volumes occupés par l'air, l'eau et le sol (échelles en mètres).

