



# CETAB+

Centre d'expertise et de transfert en  
agriculture biologique et de proximité



## ÉVALUATION DU SYSTÈME RACINAIRE DE QUATRE MÉLANGES D'ENGRAIS VERTS POUR RÉDUIRE LA COMPACTION

### RAPPORT FINAL

Le CETAB+ est une composante du



Cégep  
de Victoriaville



**TITRE DU PROJET :**

ÉVALUATION DU SYSTÈME RACINAIRE DE QUATRE MÉLANGES D'ENGRAIS VERTS POUR  
RÉDUIRE LA COMPACTION

*Rapport final*

**NUMÉRO DE PROJET : 11-INNO1-07**

**DEMANDEUR : CETAB+**

**Rédigé par :**

Anne Weill, agr., Ph.D., CETAB+

Valérie Roy-Fortin, agr., CETAB+

**DATE DE FIN DE PROJET : 15 janvier 2014**



## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>Description du projet</b> .....	<b>7</b>
<b>Déroulement des travaux</b> .....	<b>7</b>
Description des sites.....	7
Opérations culturales.....	8
Traitements et dispositif expérimental.....	8
Variables mesurées.....	11
<b>Résultats</b> .....	<b>14</b>
Biomasse aérienne, teneur en azote, carbone et ratio C/N.....	14
État du sol et profil racinaire.....	18
Coûts des engrais verts.....	28
<b>Conclusion</b> .....	<b>29</b>
<b>Biens livrés</b> .....	<b>30</b>
<b>Difficultés rencontrées</b> .....	<b>30</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>31</b>
<b>Références</b> .....	<b>32</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>33</b>
Annexe I : Analyses foliaires.....	33
Annexe II : Taux de colonisation des racines.....	34
Annexe III : Résistance à la pénétration.....	35
Annexe III : Résistance à la pénétration (suite).....	36

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Sous-soleuse utilisée au site Monlou.....	9
Figure 2 : Passage de la sous-soleuse dans la culture établie au site Monlou. ....	10
Figure 3 : Sous-soleuse utilisée au site de l'IRDA. ....	10
Figure 4 : Zone sous-solée à l'IRDA en 2014. ....	10
Figure 5 : Cartographie du système racinaire en 2012. ....	12
Figure 6 : Parcelle de millet perlé et vesce commune. Site Monlou – sol léger – 2012. ....	15
Figure 7 : Pourcentage d'azote de la biomasse foliaire selon les espèces. ....	16
Figure 8 : Quantité d'azote (kg/ha) apportée selon la biomasse et l'analyse foliaire.....	17
Figure 9 : Teneur en carbone et ratio C/N de chaque mélange.....	17
Figure 10 : Zone partiellement ameubli au site argileux Monlou. ....	19
Figure 11 : Zone partiellement ameubli au site sableux Monlou.....	19
Figure 12 : Sous-solage en sols sableux à gauche et argileux à droite. Site IRDA - 2014. ....	20
Figure 13 : Taux de colonisation des mélanges sur chaque site à une profondeur de 0-20 cm. ....	21
Figure 14 : Taux de colonisation des mélanges sur chaque site à une profondeur de 20-30 cm. ....	22
Figure 15 : Taux de colonisation des mélanges sur chaque site à une profondeur de 30-40 cm. ....	22
Figure 16 : Taux de colonisation en fonction de la profondeur de chaque site.....	23
Figure 17 : Racine principale du radis qui frappe la couche compactée et sort de terre. Site Monlou - sol argileux – 2012. ....	24
Figure 18 : Racines de sorgho développées uniquement dans la zone sous-solée.....	25
Figure 19 : Résistance à la pénétration pour l'ensemble des sites. ....	26
Figure 20 : Effet du sous-solage sur la résistance à la pénétration en sol argileux. IRDA - 2014.....	27
Figure 21 : Effet du sous-solage sur la résistance à la pénétration pour le sol sableux de l'IRDA.....	27
Figure 22 : Résistance à la pénétration. Site Monlou – sol léger – 2012.....	35
Figure 23 : Résistance à la pénétration. Site Tournevent 2012.....	35
Figure 24 : Résistance à la pénétration. Site Tournevent 2014.....	36

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Localisation des sites.....	7
Tableau 2 : Traitements par site.....	9
Tableau 3 : Dates des prises de données.....	13
Tableau 4 : Biomasse foliaire (t m.s./ha) des quatre mélanges sur tous les sites.....	14
Tableau 5 : Description de la compaction du sol des sites avant l'essai.....	18
Tableau 6 : Stabilité des agrégats avant l'implantation des engrais verts et en fin de saison sur le site argileux de l'IRDA en 2014.....	28
Tableau 7 : Coût des semences (\$/ha) des différents engrais verts en fonction du taux de semis utilisé et du prix des semences.....	28
Tableau 8 : Pourcentages d'azote et de carbone foliaires analysés dans chaque mélange, le ratio C/N et l'apport d'azote (kg/ha) selon la biomasse mesurée pour tous les sites.....	33
Tableau 9 : Taux de colonisation des racines calculés pour tous les sites.....	34

## DESCRIPTION DU PROJET

### Mise en contexte

La compaction est un problème important en agriculture qui cause des baisses de rendement et contribue à la pollution des cours d'eau en augmentant le ruissellement. Deux solutions s'offrent pour ameublir un sol compact. La première est le sous-solage. Il s'agit d'une option coûteuse souvent difficile à bien réaliser. La deuxième est d'utiliser des engrais verts à racines puissantes et profondes qui pourraient restructurer les sols en profondeur. Cette dernière option cadre bien dans une optique de développement durable car elle permet aussi d'améliorer les sols de façon globale. Une meilleure connaissance du comportement des systèmes racinaires des engrais verts à racines puissantes pourrait outiller les producteurs qui souhaitent améliorer leurs sols et diminuer la compaction.

### Objectifs

Les principaux objectifs de ce projet étaient d'évaluer la capacité de certains engrais verts à s'enraciner en profondeur et à diminuer la compaction du sol, tout en apportant de l'azote. Plus spécifiquement, le projet visait dans un premier temps à mesurer la biomasse aérienne et la teneur en azote des engrais verts, et en second lieu, à chiffrer le taux de colonisation des racines. L'effet des engrais verts sur le sol devait aussi être comparé à celui du sous-solage.

## DÉROULEMENT DES TRAVAUX

Ce projet s'est déroulé sur trois entreprises, deux en Montérégie (IRDA et Ferme Monlou) et une au Lac St-Jean (Ferme Tournevent) en 2012 et 2014. En 2012, le site initialement prévu à l'IRDA a dû être abandonné et remplacé par un 2<sup>ième</sup> site à la Ferme Monlou à cause d'une pression trop importante de chardon. En 2013, le printemps pluvieux a retardé considérablement les travaux, ce qui entraîné l'annulation du projet. La deuxième année du projet a donc été reportée en 2014 sur deux sites à l'IRDA et un site au Lac St-Jean (Ferme Tournevent).

## DESCRIPTION DES SITES

L'expérience a été menée sur des sites de grandes cultures biologiques présentant des caractéristiques pédoclimatiques différentes afin de recueillir un maximum d'informations sur le comportement des engrais verts dans diverses conditions. Le tableau suivant indique la localisation des sites par année.

**Tableau 1 : Localisation des sites**

Année	Site	Municipalité, Région	Type de sol
<b>2012</b>	IRDA <sup>1</sup>	St-Bruno-de-Montarville, Montérégie	Argile
	Ferme Monlou	La Présentation, Montérégie	Argile
	Ferme Monlou	La Présentation, Montérégie	Loam sableux
	Ferme Tournevent	Hébertville, Saguenay - Lac St-Jean	Loam
<b>2014</b>	IRDA <sup>1</sup>	St-Bruno-de-Montarville, Montérégie	Argile
	IRDA <sup>1</sup>	St-Bruno-de-Montarville, Montérégie	Loam sableux
	Ferme Tournevent	Hébertville, Saguenay - Lac St-Jean	Loam

<sup>1</sup> Plateforme d'innovation en agriculture biologique de l'IRDA à St-Bruno-de-Montarville

## OPÉRATIONS CULTURALES

### Site de la Ferme Monlou (2012)

Le site a été travaillé à trois reprises au printemps au moyen d'un cultivateur. Une dose de 100 kg N/ha a été appliquée sous forme de fumier de poulet pour fertiliser le sol. Le semis a eu lieu le 12 juillet 2012.

### Site de la Ferme Tournevent (2012 et 2014)

En 2012, le site a été travaillé à quatre reprises au printemps au moyen d'un outil à dent de type chisel « Eco-Dyn », avant d'implanter les parcelles le 27 juillet. En 2014, le site a été travaillé au moyen d'un déchaumeur « Lemken Smarag » et d'un cultivateur lourd avant d'implanter les parcelles le 18 juillet.

### Site de l'IRDA (2014)

Le sol a été préparé avec une herse à disque et un vibroculteur. Deux passages de chacun de ces outils ont été exécutés respectivement pour bien détruire la culture de couverture existante et pour réaliser un faux-semis et préparer un lit de semences adéquat. Avant de procéder au semis, une fertilisation de 100 kg N/ha a été appliquée sous forme de granules de fumier de volaille certifié biologique (Acti-Sol; 4-4-2) à la volée à l'aide d'un épandeur d'engrais de marque « Kuhn ». Les engrais verts ont été semés avec un semoir à céréales.

## TRAITEMENTS ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

### Traitements

#### Engrais verts

Les traitements consistaient en quatre mélanges d'engrais vert, un témoin sans engrais vert non sous-solé. A L'IRDA en 2014 il y a aussi eu en plus un témoin sans engrais vert sous-solé.

Les quatre mélanges d'engrais vert comprenaient une graminée à système racinaire puissant ou un radis avec une légumineuse pour apporter de l'azote (Tableau 2). La vesce velue était utilisée en Montérégie tandis que le pois fourrager était employé comme légumineuse au Lac St-Jean. Sur cette même ferme, le ray-grass remplaçait le seigle à la demande du producteur lors de la saison 2012, mais ce dernier n'a pas tenu à le semer en 2014. Le Tableau 2 à la page suivante résume les traitements à l'étude et les taux de semis utilisés.

Tableau 2 : Traitements par site

Site	Traitement	Taux de semis (kg/ha)
<b>Ferme Monlou</b>	Témoin	-
	Sorgho-soudan + Vesce velue	20 + 20
	Millet perlé + Vesce velue	10 + 20
	Tillage radish + Vesce velue	10 + 20
	Seigle d'automne + Vesce velue	125 + 20
<b>IRDA</b>	Idem + Sous-solage (2014 seulement)	-
<b>Ferme Tournevent</b>	Témoin	-
	Sorgho-soudan + Pois	20 + 60
	Millet perlé + Pois	10 + 60
	Tillage radish + Pois	10 + 60
	Ray-grass (2012 seulement) + Pois	25 + 60

### Sous-solage

Le sous-solage a été réalisé à la ferme Monlou pour l'argile et le loam sableux avec une sous-soleuse à dents droites et pointes étroites (Figure 1) à une profondeur de 35 cm (14 po).

D'une largeur de 1,50 m, un aller simple a été fait au travers des parcelles dans les cultures déjà bien établies, telle que l'illustre la Figure 2.



Figure 1 : Sous-soleuse utilisée au site Monlou.



**Figure 2 : Passage de la sous-soleuse dans la culture établie au site Monlou.**

À l'IRDA, le sous-solage a été effectué sur les deux sites (argileux et sableux) en 2014. La sous-soleuse utilisée était équipée de trois dents courbées avec ailettes d'une largeur de 12 cm supportées par un châssis en forme de « V » (Figure 3).



**Figure 3 : Sous-soleuse utilisée au site de l'IRDA.**

Avec cet appareil d'une largeur de 1,68 mètre, un aller-retour a été fait au travers des parcelles dans les cultures déjà bien établies, telle que l'illustre la prochaine figure.

<b>101</b>	<b>102</b>	<b>103</b>	<b>104</b>	<b>105</b>
<b>Témoin</b>	<b>Millet</b>	<b>Radis</b>	<b>Sorgho</b>	<b>Seigle</b>
		sous-solage	←	
→				

**Figure 4 : Zone sous-solée à l'IRDA en 2014.**

L'opération a été effectuée dans des conditions suffisamment sèches. La sous-soleuse est arrivée à pénétrer le sol à une profondeur de 40 à 46 cm (16 à 18 po) dans le sable et 36 cm (14 po) dans l'argile. Les engrais verts avaient respectivement atteint une hauteur moyenne de 0,87 et 0,65 m.

### Dispositif expérimental

Chaque site a été implanté selon un plan expérimental en blocs aléatoires complets comprenant trois ou quatre répétitions. La dimension des parcelles différait selon l'espace disponible sur chaque site. La largeur correspondait à celle du semoir alors que la longueur variait entre 10 et 30 mètres.

## VARIABLES MESURÉES

Les variables mesurées, concernent dans un premier temps la portion aérienne, et en second lieu, l'état du sol et la partie racinaire des engrais verts. Des observations qualitatives ont aussi été faites.

### Biomasse aérienne, teneur en azote, carbone et ratio C/N

La biomasse foliaire des engrais verts a été échantillonnée dans des quadrats de 0,25 m<sup>2</sup>. En 2012, un seul échantillon par parcelle a été récolté tandis qu'en 2014, ce nombre a été augmenté à trois pour limiter la variabilité souvent présente en champ. Un échantillon composite pour chaque parcelle a été utilisé pour mesure la matière sèche et analyser la teneur en azote et en carbone des tissus végétaux.

### État du sol et profil racinaire

Sur tous les sites et pour toutes les parcelles, des tranchées ont été creusées à l'aide d'une pelle mécanique pour pouvoir évaluer l'état du sol selon la méthode du profil cultural (Weill, 2009) et le profil racinaire. Des mesures de résistance à la pénétration ont aussi été réalisées sur toute les parcelles de chaque site. Des mesures de stabilité des agrégats et de densité de sol ont été faites sur le site de l'IRDA.

Le profil racinaire a été évalué à l'aide d'une grille quadrillée ayant des mailles de 2 par 2 cm. Pour chaque maille, la présence ou l'absence de racine a été notée, ce qui permet de cartographier le système racinaire dans le profil et de chiffrer le pourcentage de colonisation des racines.

En 2012, une surface de 40 cm de large par 54 cm de hauteur contenant des mailles de 2 cm par 2 cm avait été utilisée (Figure 5). Le travail ardu qu'a engendré l'observation de 540 mailles par cadre a cependant nécessité des modifications au protocole pour la saison 2014.

En 2014, la surface a été réduite à une dimension de 10 cm de large par 40 cm de hauteur avec des mailles de même grandeur, mais deux lectures ont été faites pour chaque profil. Ces changements étaient jugés acceptables puisqu'aucune racine n'avait été aperçue en dessous de 40 cm de profondeur lors de la saison 2012.



Figure 5 : Cartographie du système racinaire en 2012.

### Résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration a aussi été mesurée avec un pénétromètre (marque Rimick CP 40 II) en début de saison pour l'ensemble du site et en fin de saison pour chaque parcelle. Les données étaient enregistrées à tous les 2,5 cm jusqu'à une profondeur de 60 cm, à raison de trois insertions par parcelle.

Au-delà d'une lecture de 2000 kPa sur le pénétromètre, un sol est considéré comme compact et les racines des cultures éprouveront des difficultés à se développer (Magdoff et Van Es, 2009). Cette mesure a toutefois ses limites car elle varie avec la texture et le degré d'humidité. Lorsque le sol est trop sec, cela peut être impossible de rentrer la sonde dans le sol. Cette variation est particulièrement problématique en sol lourd. Dans la mesure où ces données serviront à comparer les espèces entre elles sur un même site et une même date, elles pourront tout de même être l'indice d'une amélioration de la structure du sol selon le traitement.

### Stabilité des agrégats et densité

À l'IRDA dans le site argileux, des mesures plus spécifiques, à savoir le diamètre moyen pondéré des agrégats stables à l'eau et la densité apparente avaient été prévues, avant l'implantation au début et à la fin du projet. Comme le site a dû être abandonné en 2012, cette mesure n'a pas pu être réalisée. Des analyses ont quand même été faites sur un nombre réduit d'échantillons (4) en 2014, au début et à la fin de la saison.

Les différentes dates de prises de données sont données dans le tableau suivant.

**Tableau 3 : Dates des prises de données**

Site	Mesures	Dates 2012	Dates 2014
<b>IRDA</b>	Profils de sol, pénétromètre, densité, agrégats stables	9 mai	21 juillet
	Biomasse foliaire	∅	21 octobre
	Profils racinaires, profils de sol, pénétromètre, densité, agrégats stables	∅	21 octobre
<b>Monlou</b>	Profils de sol, pénétromètre	9 mai	∅
	Biomasse foliaire, pénétromètre	17 octobre	∅
	Profils racinaires, profils de sol, pénétromètre	29 septembre	∅
<b>Tournevent</b>	Biomasse foliaire	9 octobre	1 <sup>er</sup> octobre
	Profils racinaires, profils de sol, pénétromètre	10 octobre	2 octobre

Au cours des deux années, des suivis assurant une évaluation visuelle du développement des cultures ont été réalisés à au moins trois reprises durant la saison.

En ce qui concerne l'aspect économique, seul le coût relié aux semences est donné puisqu'il n'y avait pas de différence au niveau de la préparation du sol et du semis. Les prix des semences ont été obtenus auprès de trois différents fournisseurs.

### Analyses statistiques

Les données quantitatives recueillies ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à l'aide du logiciel R. Les moyennes ont été comparées avec le test de Tukey au seuil de signification de 5%. Dans le cas où les données ne suivaient pas une distribution normale, elles ont été analysées en utilisant le test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Les variables analysées ont été : la biomasse sèche des engrais verts (t/ha), la teneur en azote et en carbone des tissus végétaux (%), le taux de colonisation racinaire (%) et la résistance à la pénétration (kPa/mm).

## RÉSULTATS

### BIOMASSE AÉRIENNE, TENEUR EN AZOTE, CARBONE ET RATIO C/N

#### Biomasse aérienne

Le tableau suivant présente les biomasses foliaires obtenues sur chaque site.

**Tableau 4 : Biomasse foliaire (t m.s./ha) des quatre mélanges sur tous les sites**

Année	Site	Millet + vesce velue	Sorgho + vesce velue	Seigle + vesce velue	T-radish + vesce velue
2012	Monlou – sable	13,5 a	18,1 a	4,4 b	4,3 b
2012	Monlou – argile	10,0 a	13,5 a	3,6 b	4,0 b
2014	IRDA – sable	6,5 a	7,0 a	3,9 b	4,1 b
2014	IRDA – argile	4,6 a	3,4 a	3,2 a	4,7 a
		Millet + pois	Sorgho + pois	Ray-grass + pois	T-radish + pois
2012	Tournevent	1,8 a	2,1 a	2,5 a	1,6 a
2014	Tournevent	∅	∅	∅	3,0

*Les résultats à l'intérieur d'une ligne portant la même lettre ne diffèrent pas significativement ( $p > 0.05$ ).*

Dans l'ensemble les biomasses ont été beaucoup plus élevées en Montérégie qu'au Lac St-Jean. Le climat plus frais au Lac St-jean peut expliquer en partie ces résultats. Les biomasses étaient aussi plus élevées en sol sableux qu'en sol argileux. En général, les sols argileux étaient beaucoup plus compacts que les sols sableux, ce qui peut avoir causé cette différence (Tableau 4).

En Montérégie, pour trois des quatre sites, les mélanges avec sorgho ou millet ont significativement donné plus de biomasse que ceux avec seigle ou radis. Une telle différence est normale, car le millet et le sorgho sont des plantes qui produisent beaucoup plus de biomasse que le radis ou le seigle d'automne lorsque semés en été. Le sorgho avait tendance à donner plus de biomasse que le millet, mais la différence n'était pas significative. Sur le quatrième site (IRDA, argile), le rendement des mélanges avec millet ou sorgho était plus faible (Tableau 4). Il s'agit du site avec le sol le plus compact, ce qui pourrait être une explication.

Au Lac St-Jean en 2012, il n'y avait pas de différence significative entre les traitements et les rendements étaient faibles. Il est probable que le sorgho et le millet soient mal adaptés au climat plus frais de la région. Le millet perlé est très sensible au froid et le sorgho-soudan, une plante de type C4, est exigeant en chaleur. La dose de semis de pois était faible (60 kg/m<sup>2</sup>), ce qui peut aussi expliquer les faibles rendements. Une telle dose aurait été adéquate si le sorgho, le millet ou le ray-grass avaient bien poussé.

En 2014, toujours au Lac St-Jean, seul le radis a poussé. Le fait qu'aucune fertilisation n'ait été appliquée sur ce site pourrait aussi avoir joué un rôle. La saison 2014 n'a pas été propice aux engrais verts avec une période de sécheresse après le semis et des températures fraîches aux mois d'août et septembre. Le producteur de la Ferme Tournevent avait semé dans le reste du champ de l'essai un mélange contenant notamment du radis fourrager, du trèfle et du méliot; seul le radis a poussé.

### Développement relatif des plantes dans les mélanges

Le développement relatif de chaque plante dans le mélange a varié. La vesce velue a dominé le seigle, mais s'est assez bien développée avec le millet et le sorgho en s'établissant horizontalement au-dessus de la surface du sol alors que le sorgho et le millet se développaient en hauteur. La biomasse de ces deux graminées semblait toutefois très supérieure à celle de la vesce (Figure 6). À l'opposé, le radis a dominé la vesce et cette dernière ne s'est presque pas développée.

Le développement relatif de chaque plante dans les mélanges de pois n'a pu être évalué puisqu'en 2012, seul le pois a poussé tandis qu'en 2014, ce dernier ne s'est pas établi.



**Figure 6 : Parcelle de millet perlé et vesce commune. Site Monlou – sol léger – 2012.**

### Teneurs foliaires en azote et en carbone des quatre mélanges d'engrais verts

#### Pourcentage d'azote

En Montérégie, le pourcentage d'azote a varié selon la proportion relative de la vesce dans les mélanges (Figure 7).

En 2012 au site Monlou, le pourcentage d'azote était élevé (3,4%) et significativement différent dans le mélange seigle-vesce, car la vesce dominait le mélange. Il variait de 1,1 à 1,6% dans les autres mélanges qui étaient dominés par la graminée ou le radis.

En 2014 à l'IRDA, c'est également dans le mélange seigle-vesce que le pourcentage d'azote était le plus élevé (4,4%) pour la même raison qu'au site Monlou. Dans l'argile, les autres mélanges variaient entre 3,2 et 4,2% tandis qu'ils variaient entre 2,2 et 3,1% en sol sableux.

Au Lac St-jean en 2012, le pourcentage d'azote (3,9 à 4,3%) était élevé car le pois dominait les mélanges. En 2014, le radis a donné un pourcentage d'azote de 3,6%.

Les résultats détaillés pour chaque site sont disponibles à l'Annexe I.

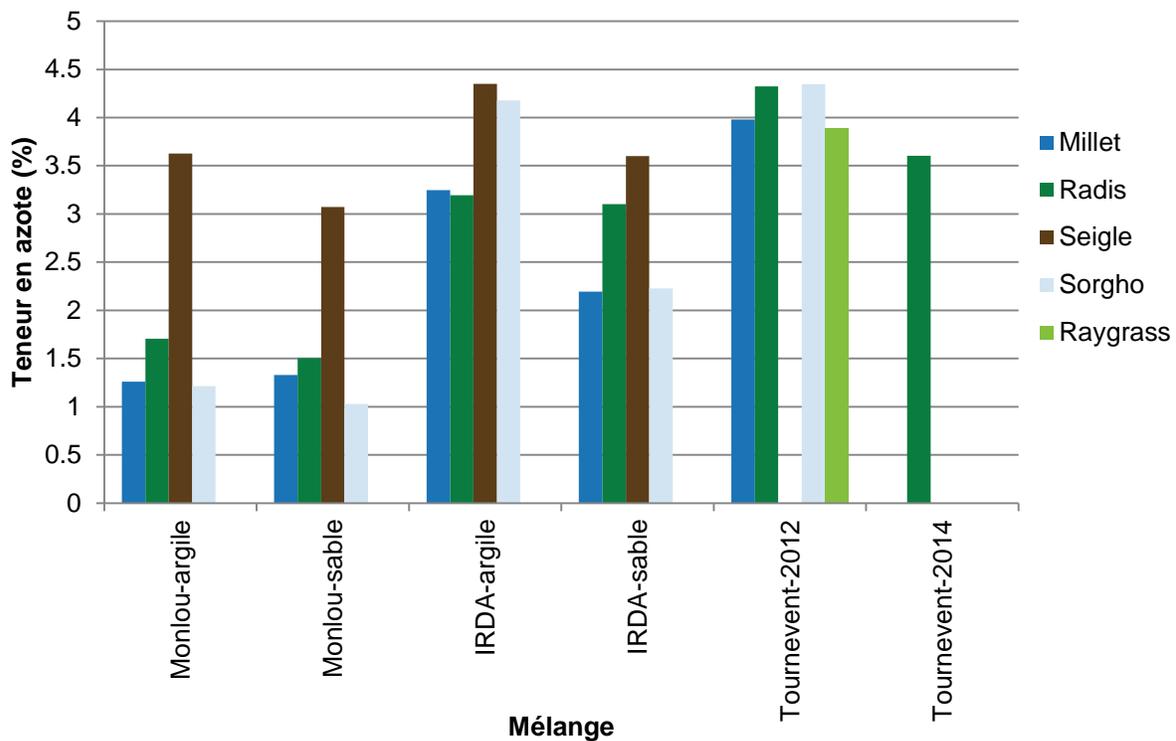


Figure 7 : Pourcentage d'azote de la biomasse foliaire selon les espèces.

### Quantité totale d'azote dans la plante et ratio C/N

La quantité totale d'azote est fortement liée à la biomasse totale produite et au pourcentage d'azote du mélange. En Montérégie, elle était donc élevée avec les mélanges contenant du sorgho et du millet car la biomasse était importante. Avec le mélange contenant du seigle, la quantité totale d'azote était également élevée puisque la teneur en azote était importante grâce à la vesce qui a dominé le mélange (Figure 8).

Au Lac St-Jean, la quantité totale d'azote était plus faible qu'en Montérégie à cause des faibles rendements en biomasse, mais elle était tout de même assez élevée étant donné le pourcentage élevé d'azote des mélanges.

À l'exception du mélange de radis au site Monlou en sol sableux qui était plus faible, il n'y a eu aucune différence significative entre les traitements pour chaque site en ce qui concerne la quantité totale d'azote (Annexe I).

Le ratio C/N était élevé pour les mélanges à forte biomasse et faible pourcentage d'azote (Figure 9), ce qui est normal. Même si de tels mélanges contiennent beaucoup d'azote, le haut rapport C/N indique que cet azote ne sera pas rapidement libéré et qu'un risque d'immobilisation est possible. Les mélanges de millet et de sorgho, qui ont un rapport C/N élevé, sont fibreux et ont l'avantage de produire des matières organiques stables et persistantes, idéales pour accroître le taux d'humus dans le sol.

Seuls les mélanges avec le seigle et le ray-grass, contenant une proportion respective élevée de vesce velue ou de pois, avaient des ratios C/N faibles, ce qui devrait permettre une mise en disponibilité rapide de l'azote.

À l'exception du mélange de seigle au site Monlou en sol sableux, il n'y a eu aucune différence significative entre les traitements pour les C/N pour chaque site (Annexe I).

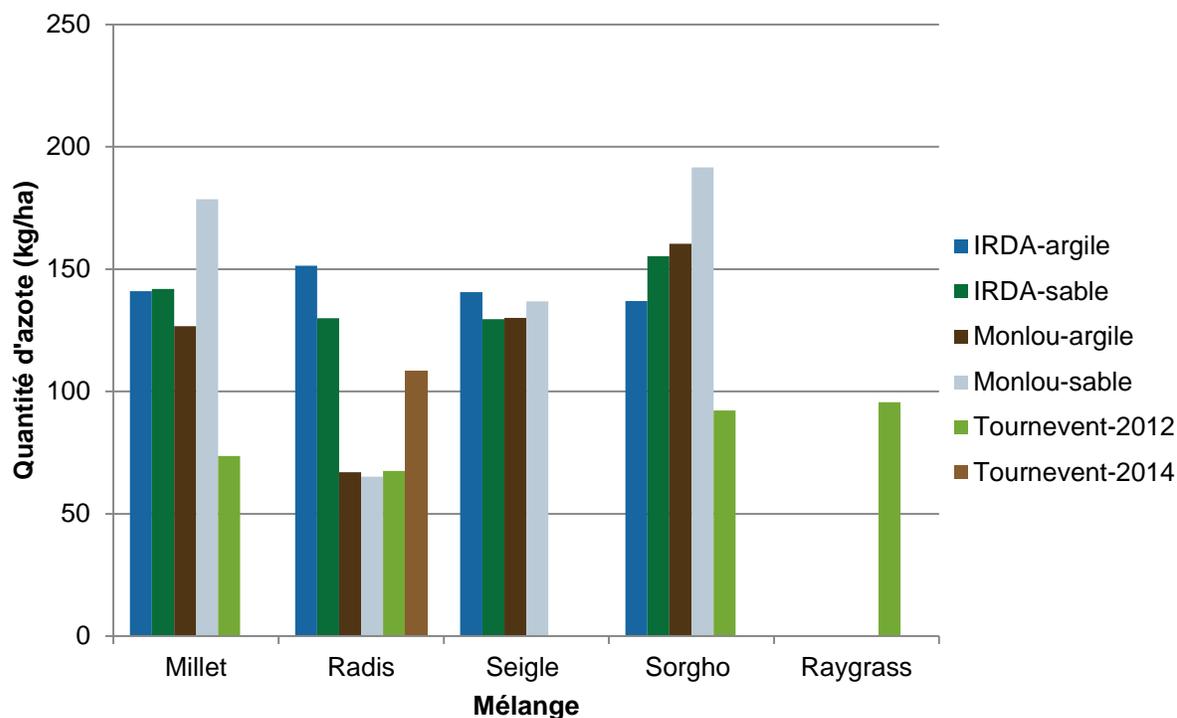


Figure 8 : Quantité d'azote (kg/ha) apportée selon la biomasse et l'analyse foliaire.

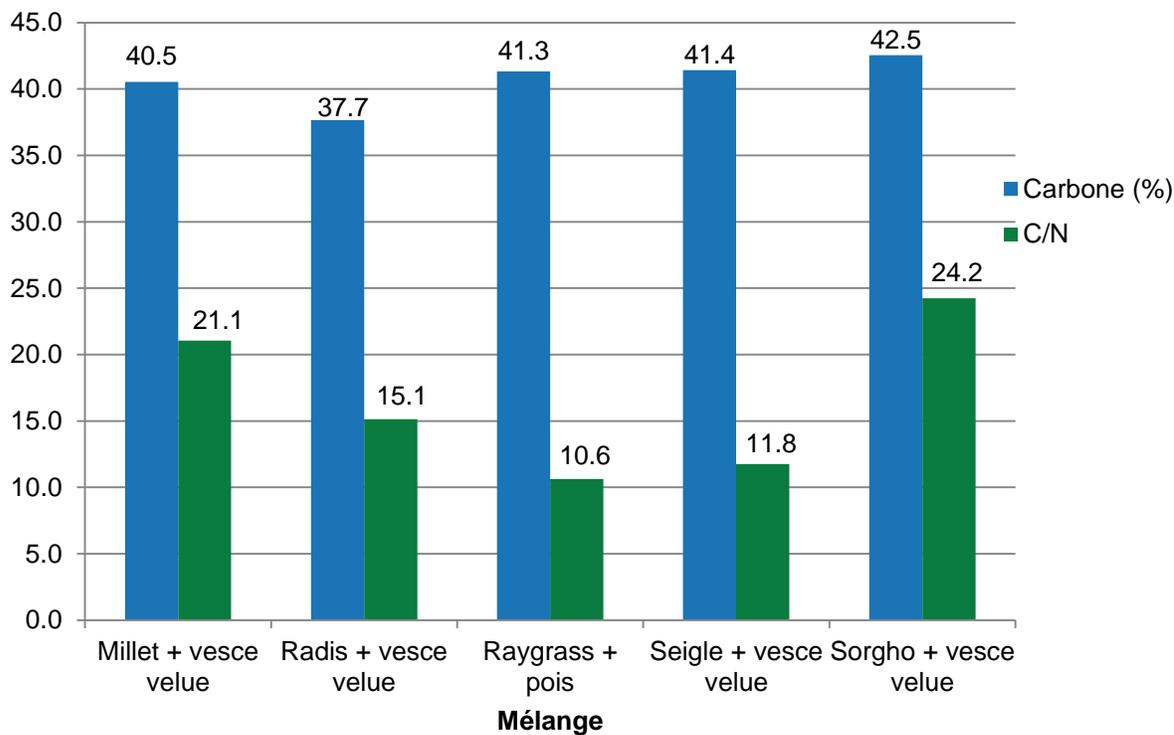


Figure 9 : Teneur en carbone et ratio C/N de chaque mélange.

## ÉTAT DU SOL ET PROFIL RACINAIRE

### État du sol

#### État du sol pour chaque site

Les sols argileux et sableux du site Monlou et le sol argileux du site de l'IRDA étaient très compacts en-dessous de la couche travaillée. La structure de la zone compacte était massive pour ces trois sites. Le sol sableux de l'IRDA n'était pas compact et la structure était particulière sur toute la profondeur observée. Au site Tournevent en 2012 et en 2014, le sol était légèrement compact en-dessous de la couche travaillée (Tableau 5).

**Tableau 5 : Description de la compaction du sol des sites avant l'essai**

Site	Texture de sol	Structure et profondeur de la zone compactée	Commentaires
Monlou - argile	Argile	Structure massive très compacte de 15 cm à plus de 50 cm	Compaction majeure, variable dans le site, pas de racines, pas de macroporosité biologique
Monlou - sable	Loam sableux	Structure massive très compacte de 15 cm à plus de 50 cm	Sol presque cimenté, variable dans le site (probablement dû à une variation du type de sable), pas de racines, pas de macroporosité biologique
IRDA - argile	Argile	Structure massive très compacte de 15 cm à plus de 50 cm	Compaction majeure, variable dans le site, pas de macroporosité biologique
IRDA - sable	Loam sableux	Structure particulière en bon état, légèrement plus compacte de 15 à 50 cm	Sol meuble; pas de compaction, macroporosité biologique présente
Tournevent - 2012	Loam	Structure angulaire (agrégats de 3-5 cm) légèrement compacte de 24 à plus de 40 cm	Compaction légère et variable dans le site, macroporosité biologique présente
Tournevent - 2014	Loam	Structure angulaire (agrégats de 3-5 cm) légèrement compacte de 18 à 40 cm	Compaction légère et variable dans le site, macroporosité biologique présente

Au terme des deux saisons et sur tous les sites, il n'y avait pas de différence entre les structures de sol des différents traitements. Sur les trois sites très compacts, l'intensité de la compaction a décru sur les cinq premiers centimètres de la zone compactée (profondeur de 15-20 cm) pour l'ensemble des parcelles. La structure était polyédrique sub-angulaire et plus meuble de 15 à 20 cm, mais elle est demeurée massive et très ferme de 20 à 50 cm.

Au site Tournevent en 2012, le niveau léger de compaction s'est atténué de 18 à 40 cm durant l'été. Une forte population de vers a été observée ainsi qu'une abondance de macropores grossiers d'origine biologique. La structure était composée d'agrégats moyens, friables et de forme arrondie. En 2014, la même tendance a été observée dans les parcelles de radis fourrager. L'augmentation de la porosité du sol et du nombre de vers en comparaison au témoin était flagrante jusqu'à 40 cm de profondeur.

### Effet du sous-solage sur le sol

En 2012, le sous-solage a partiellement ameubli le sol que ce soit dans l'argile ou dans le sable (Figure 10). Les dents étaient espacées de 75 cm et la profondeur de travail était de 35 cm, ce qui est insuffisant pour ameublir l'ensemble du profil. Dans l'argile, la structure du sol ameubli était en agrégats polyédriques subangulaires d'une taille de 2-5 cm; et dans le sable, la structure était particulière meuble (Figure 11).



Figure 10 : Zone partiellement ameubli au site argileux Monlou.



Figure 11 : Zone partiellement ameubli au site sableux Monlou.

Dans les parcelles sous-solées du sol sableux de l'IRDA, la structure particulière du sol était toujours en bon état. Dans le sol argileux de l'IRDA, il y avait présence de mottes grossières et polyédriques angulaires de 20 à 40 cm (Figure 12).



Figure 12 : Sous-solage en sols sableux à gauche et argileux à droite. Site IRDA - 2014.

## Profil racinaire

### Effet des espèces d'engrais verts sur le profil racinaire

Il n'y a pas eu de différence significative entre les mélanges en ce qui concerne le taux de colonisation par les racines (Annexe II), quels que soient le site et la profondeur.

Tel que l'indiquent les taux obtenus pour chaque espèce aux profondeurs 0-20 cm, 20-30 cm et 30-40 cm (Figure 13, 14, 15 respectivement), aucune tendance ne peut être mise en évidence et les taux sont très variables. Les mélanges ayant les taux de colonisation les plus élevés variaient également d'un site à l'autre, ce qui empêche de tirer une conclusion claire par rapport aux systèmes racinaires.

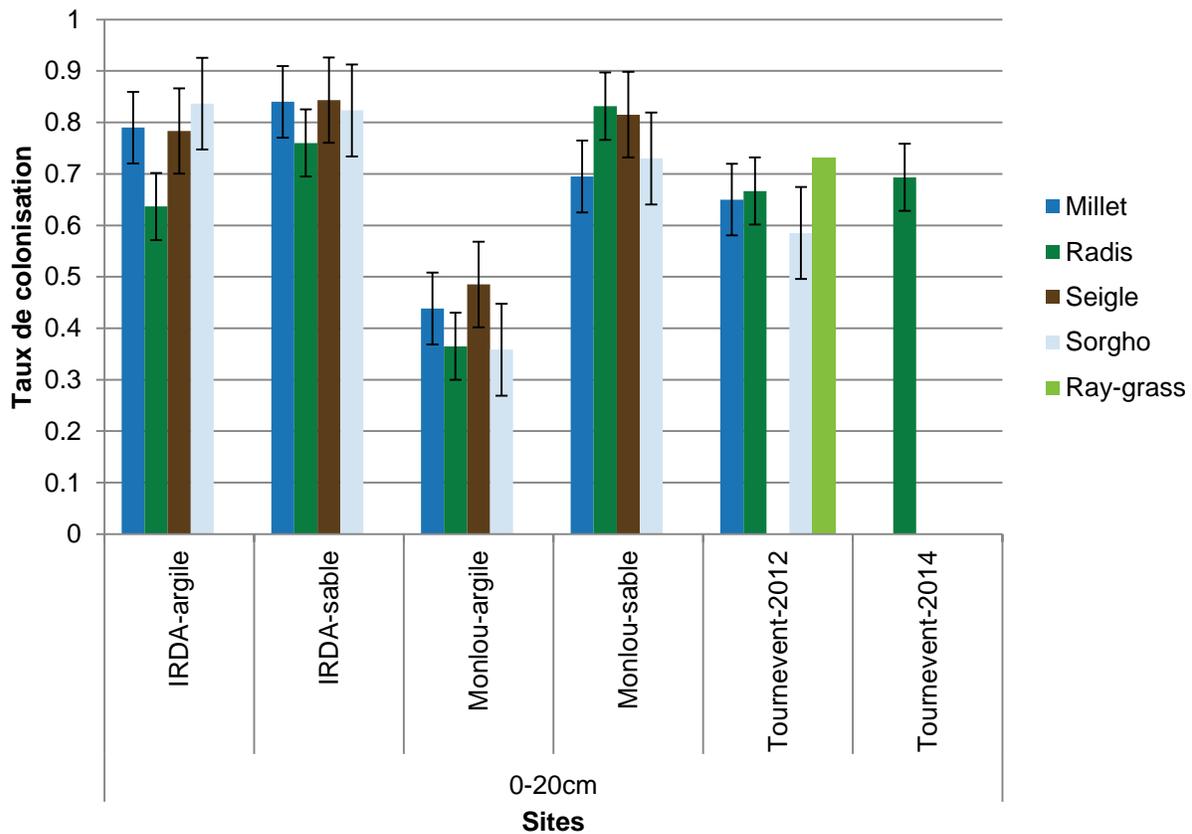


Figure 13 : Taux de colonisation des mélanges sur chaque site à une profondeur de 0-20 cm.

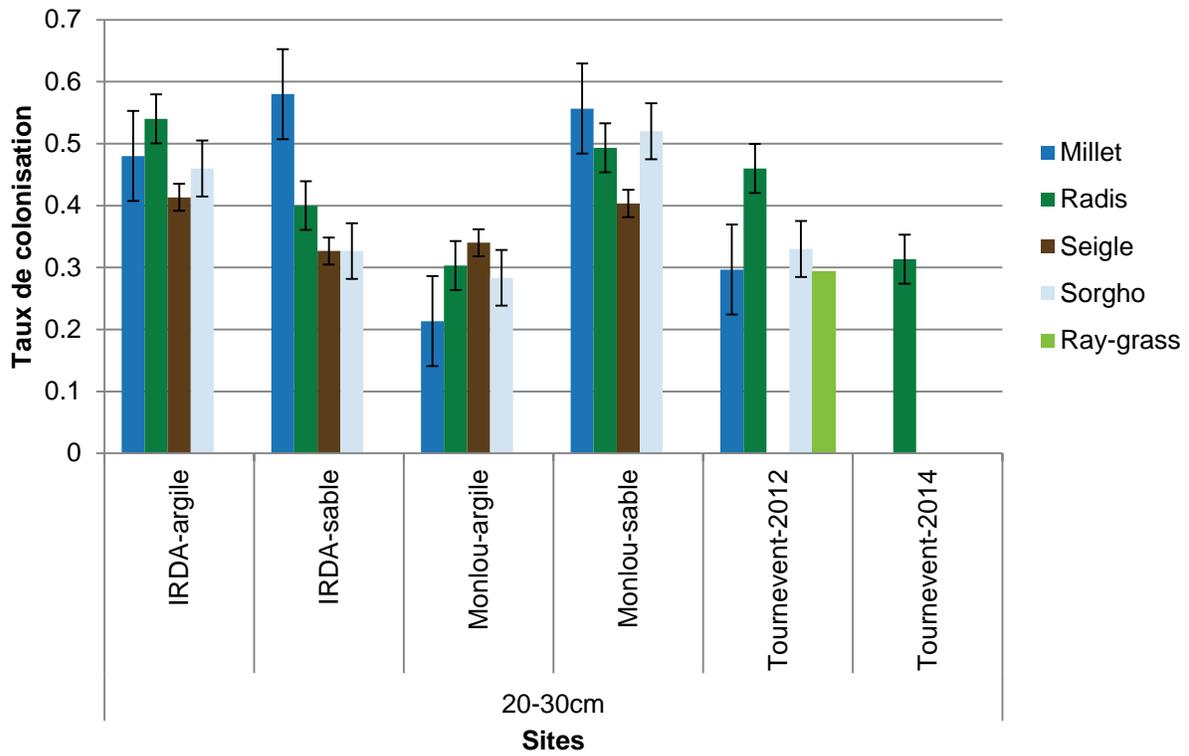


Figure 14 : Taux de colonisation des mélanges sur chaque site à une profondeur de 20-30 cm.

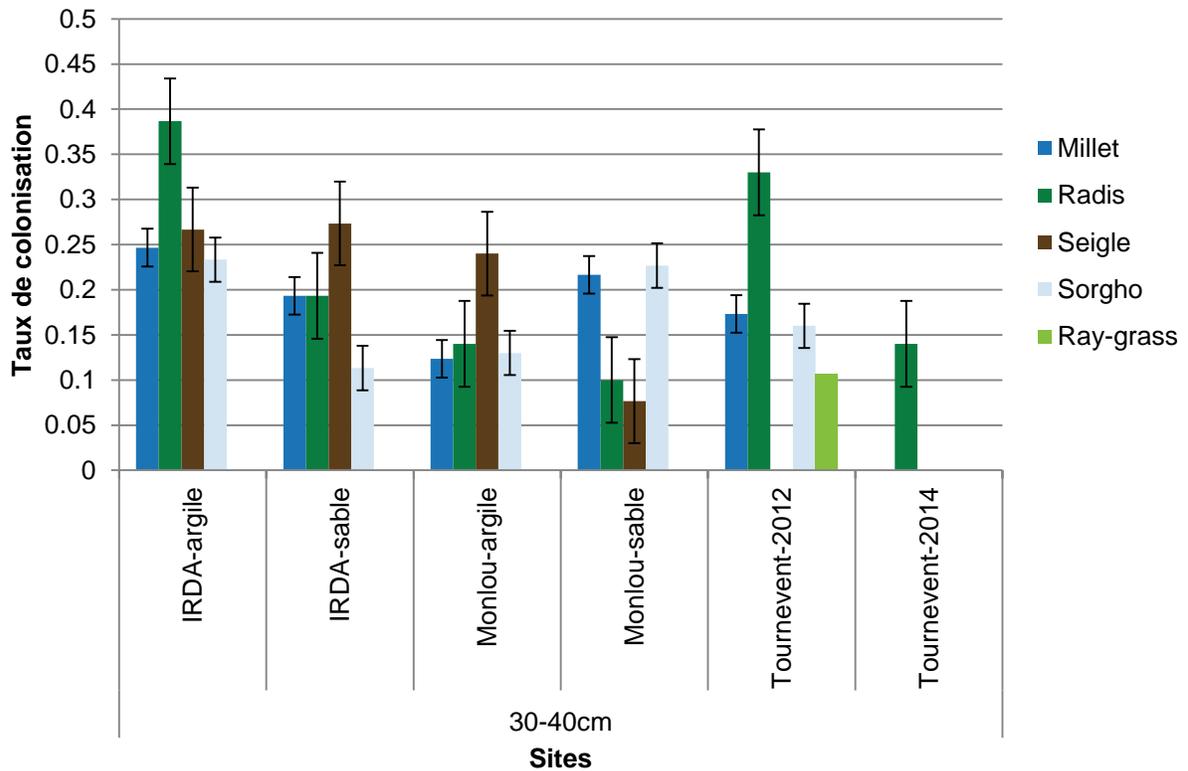
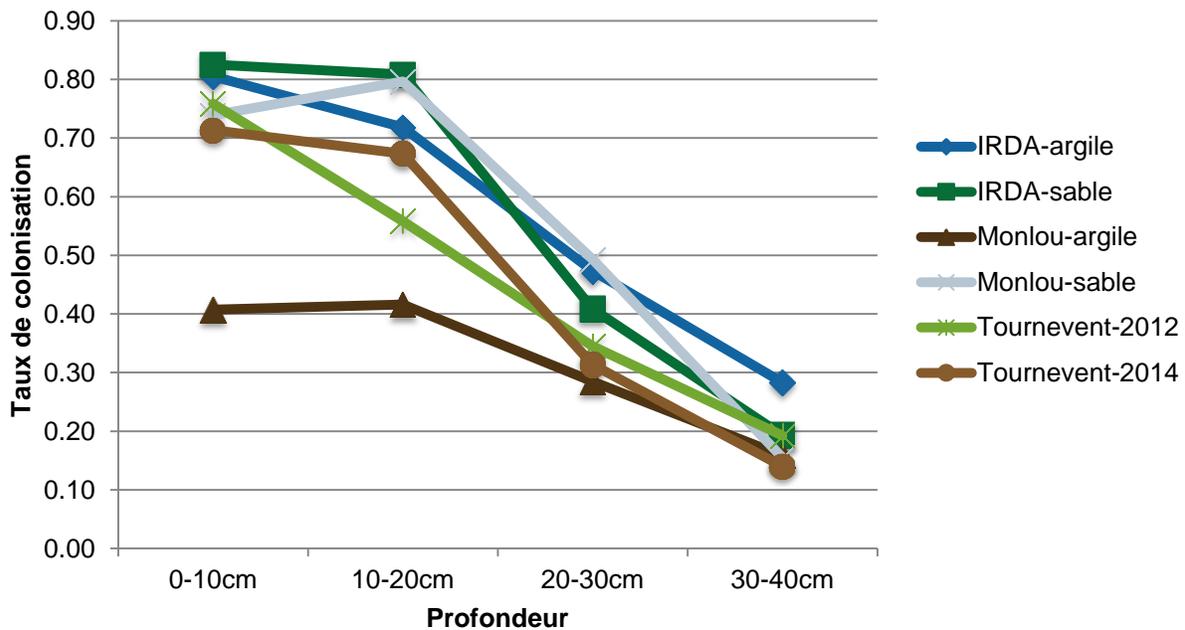


Figure 15 : Taux de colonisation des mélanges sur chaque site à une profondeur de 30-40 cm.

Plusieurs observations intéressantes ont toutefois été réalisées et sont décrites ci-dessous.

Une tendance générale a été observée sur tous les sites à l'exception du site Tournevent en 2012. Le taux de colonisation était assez similaire entre 0-10 et 10-20 cm et diminue ensuite. Au site Tournevent en 2012, les taux ont plutôt diminué de façon constante avec la profondeur (Figure 16).

Les taux de colonisation des couches 0-10 et 10-20 cm se situaient autour de 70%, sauf pour le site Monlou en sol argileux où ils étaient autour de 40%. La densité importante de racines dans la profondeur 0-20 cm s'explique par le travail du sol qui avait ameubli cette couche de sol. Dans la couche 20-30 cm, le taux de colonisation était d'environ 40% et dans la couche 30-40 cm il était d'environ 20% (Figure 16).



**Figure 16 : Taux de colonisation en fonction de la profondeur de chaque site.**

Selon ces chiffres, il semblerait que la moitié des racines présentes dans la couche 0-20 cm ne descendent pas plus bas. Tel qu'observé au champ, elles tendent plutôt à se rediriger horizontalement lorsqu'elles rencontrent de la compaction. La racine pivotante du radis fourrager se soulève de terre lorsqu'elle frappe une couche dure (Figure 17) et ce sont les racines secondaires qui prolongent le tubercule et qui s'étendent dans le sous-sol.

Il est surprenant de constater que le pourcentage de colonisation est parfois plus important en sol compact (par ex. IRDA argile vs Tournevent ou encore IRDA argile vs IRDA sable en dessous de 20 cm).

Les sols argileux compacts peuvent quand-même être fissurés, ce qui peut permettre le développement de racines en profondeur. Ce n'est pas le cas des sols sableux, qui parfois ne semblent pas très compacts, mais dans lesquels les racines ne peuvent quand même pas pénétrer en profondeur. Il serait intéressant de développer davantage la méthode du profil racinaire pour voir si cette mesure permet de mieux évaluer le niveau de compaction.

La mesure prise avec la méthode du profil racinaire donne le pourcentage de mailles avec présence de racines. Toutefois, le nombre de racines par maille n'est pas précisé, ce qui fausse peut-être les résultats. Selon cette étude, cette méthode ne permet pas de bien cerner la réalité.



**Figure 17 : Racine principale du radis qui frappe la couche compactée et sort de terre. Site Monlou - sol argileux – 2012.**

### **Effet du sous-solage sur le profil racinaire**

En 2012, au site Monlou, le sous-solage a eu un effet spectaculaire sur le profil racinaire (observation visuelle uniquement faite un mois après le sous-solage soit le 30 septembre 2012). La zone ameublie par la sous-soleuse a été rapidement envahie de racines comme le montre la Figure 18. Ce phénomène a été observé à maintes reprises dans un projet mené par le CETAB+ sur le sous-solage (Weill, 2015 – document en préparation).



Figure 18 : Racines de sorgho développées uniquement dans la zone sous-solée.

## Résistance à la pénétration

### Effet du site et de l'engrais vert sur la résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration a été mesurée en fin de saison pour l'ensemble des traitements. Il n'y a pas eu de différence significative entre les traitements. Cette donnée était très variable, ce qui explique en partie ce manque de résultats révélateurs (graphiques complets à l'Annexe III). En sol sableux, la résistance variait beaucoup avec la profondeur, et le patron de distribution était erratique (Annexe III et Figure 19). Lors de la prise de données, les opérateurs ont noté que la sonde était très difficile à entrer dans les sols sableux, pourtant moins compacts, et qu'elle rentrait par à-coups, ce qui correspond au patron erratique obtenu.

Une moyenne pour l'ensemble des traitements (sous-solage excepté) est donnée pour chaque site dans la Figure 19. Bien qu'il soit difficile de comparer la résistance à la pénétration entre sites car le taux d'humidité était forcément différent d'un site à l'autre, on peut constater que sur presque tous les sites, la résistance à la pénétration augmente avec la profondeur jusqu'à environ 30 cm.

Pour le site Monlou, la croissance des engrais verts était meilleure en sol sableux qu'en sol argileux. Pourtant, selon les informations tirées du pénétromètre, le sol sableux était beaucoup plus compact que le sol argileux (Figure 19). De tels constats montrent bien qu'il faut interpréter les données de résistance à la pénétration avec précaution. Lors des prises de données, le sol argileux était très humide, ce qui diminuait beaucoup la résistance à la pénétration. Il a déjà été remarqué dans d'autres essais (Weill et

Roy-Fortin, 2013) que la résistance à la pénétration d'un sable, même non compact peut être élevée à cause de la friction importante exercée par ce dernier sur la sonde.

Sur le site de l'IRDA, la résistance à la pénétration était similaire pour les deux textures de sol alors que le sol argileux était très compact et le sol sableux peu compact. De nouveau, l'effet de friction du sable peut être mis en cause.

En ce qui concerne le site Tournevent (2012 et 2014), il est intéressant de noter que même si les sols n'étaient pas très compacts, les résistances à la pénétration étaient aussi élevées ou plus élevées que pour les argiles compactes de la Montérégie.

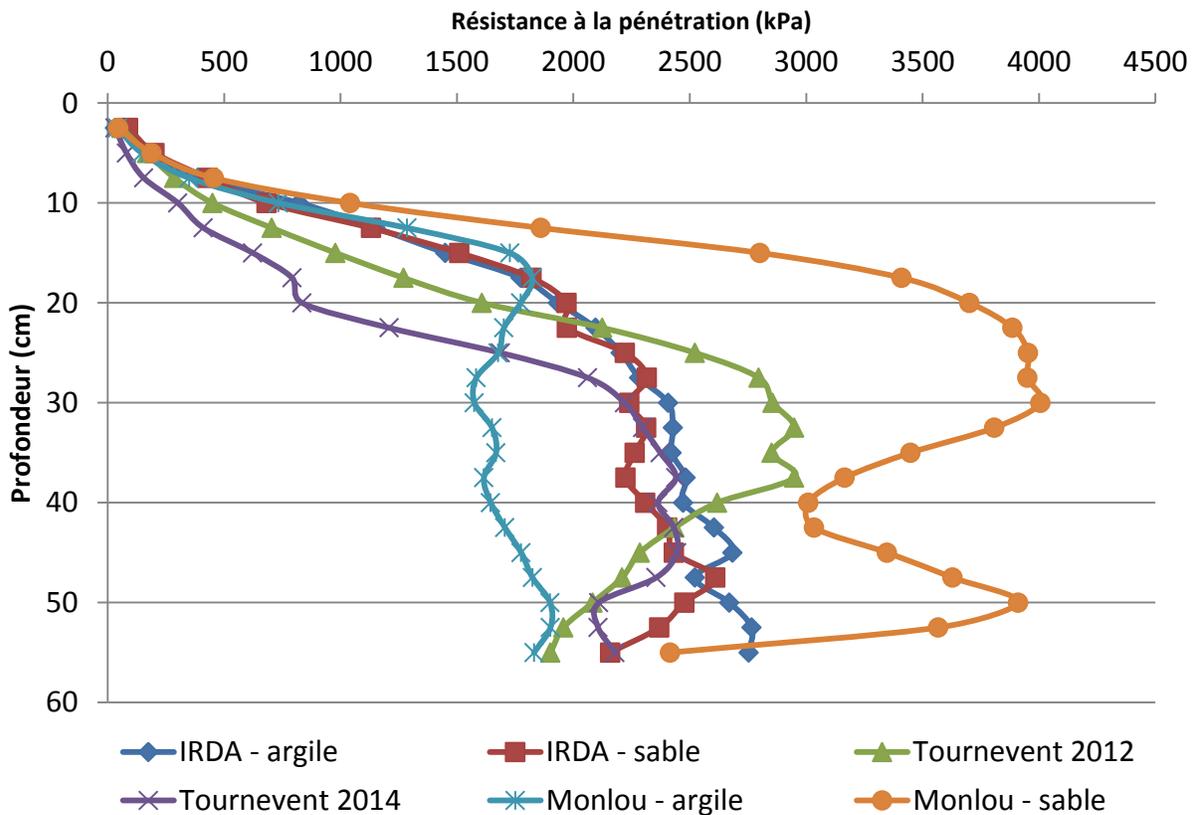


Figure 19 : Résistance à la pénétration pour l'ensemble des sites.

### Évolution de la résistance à la pénétration durant la saison et effet du sous-solage sur la résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration semble avoir diminué avec la saison pour le sol argileux de l'IRDA en 2014 (Figure 20). Cet effet peut être dû à l'humidité du sol plus élevée en fin de saison. Les cycles sécheresse/humidité et les racines peuvent aussi avoir joué un rôle.

Le sous-solage au site de l'IRDA a légèrement diminué la résistance à la pénétration pour les sols argileux (Figure 20) et la même tendance s'est exprimée de façon plus importante pour le sol sableux (Figure 21) par rapport à la moyenne des données pour les autres traitements (engrais verts et témoin).

À la lumière de ces données, on peut dire que le pénétromètre est un instrument dont l'utilité est limitée et que les données doivent être interprétées avec précaution. Le pénétromètre peut être utile pour localiser une zone compacte dans un champ mais cette mesure doit être accompagnée de quelques profils de sol.

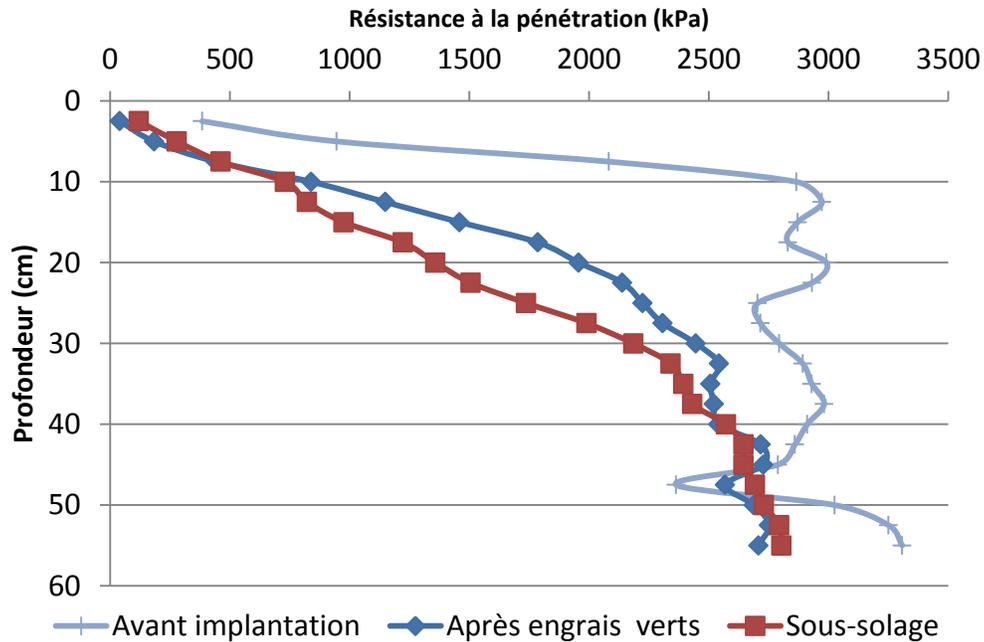


Figure 20 : Effet du sous-solage sur la résistance à la pénétration en sol argileux. IRDA - 2014.

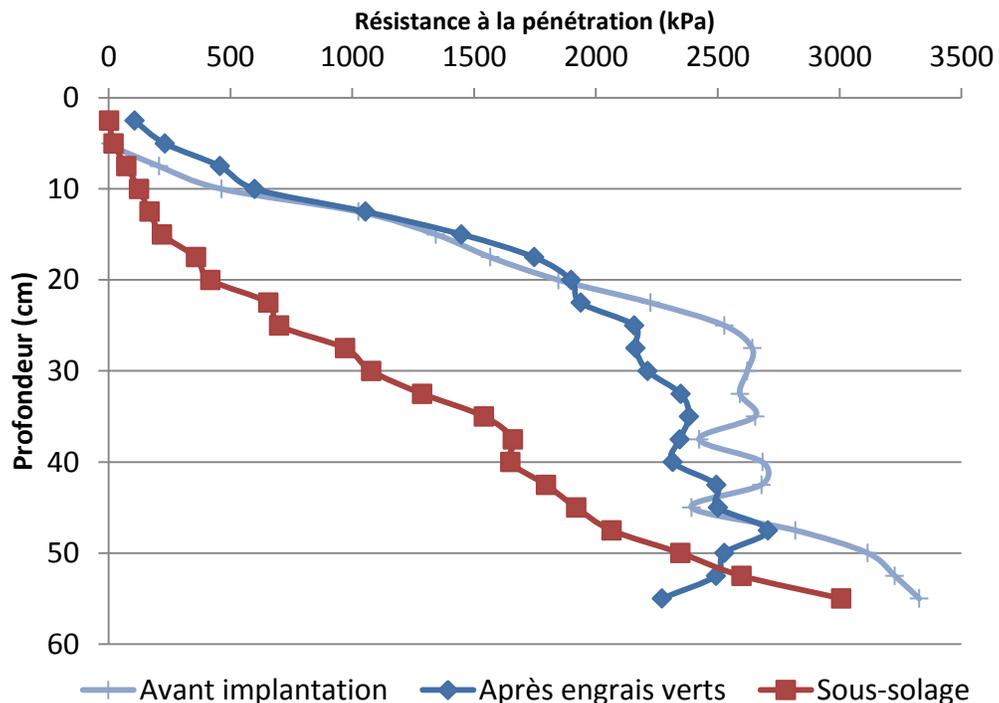


Figure 21 : Effet du sous-solage sur la résistance à la pénétration pour le sol sableux de l'IRDA.

## Densité et stabilité des agrégats sur le site argileux de l'IRDA en 2014

Des mesures de densité ont été prises avant et après l'implantation des engrais verts pour le site argileux de l'IRDA. Les résultats moyens ne diffèrent que très peu, passant de 1,37 à 1,35 g/cm<sup>3</sup> entre le début et la fin de la saison. La profondeur d'échantillonnage (15 cm) peut expliquer pourquoi les valeurs n'ont pas fluctué étant donné que cette zone était déjà relativement ameublie.

Des mesures de stabilité des agrégats (agrégats stables dans l'eau) ont été prises avant et après l'implantation des engrais verts pour le site argileux de l'IRDA (Tableau 6). À nouveau, les résultats entre les deux moments ne diffèrent que très peu, même que la proportion d'agrégats stables a légèrement diminué à la fin de la saison. Par contre, la proportion d'agrégats dans le sol a légèrement augmenté.

**Tableau 6 : Stabilité des agrégats avant l'implantation des engrais verts et en fin de saison sur le site argileux de l'IRDA en 2014.**

Indicateurs	AVANT IMPLANTATION	FIN DE SAISON
<b>Stabilité des agrégats (%)</b> Agrégats stables / agrégats totaux .25 à 2 mm	57,6	52,2
<b>Proportion d'agrégats (%)</b> Agrégats totaux / sol total .25 à 2 mm	92,6	95,0

Conformément à la classe et au groupe texturaux dont fait partie ce sol (argile, G1), les résultats, avant implantation, étaient déjà considérés comme bons avec une évaluation globale de 77%. Le fait que l'échantillonnage ait été pris suite au passage d'un vibroculteur pour la préparation du lit de semence pourrait expliquer ces résultats. Le court intervalle entre les deux échantillonnages (trois mois) pourrait également expliquer la faible différence entre les résultats.

## COÛTS DES ENGRAIS VERTS

Le coût à l'hectare des semences d'engrais verts est présenté dans le Tableau 7. Comme le travail de préparation du sol et la méthode de semis n'a pas différé d'une espèce à l'autre, seul le prix des semences à l'achat est considéré dans le tableau suivant.

**Tableau 7 : Coût des semences (\$/ha) des différents engrais verts en fonction du taux de semis utilisé et du prix des semences**

Espèces	Taux de semis (kg/ha)	Prix pour 25 kg <sup>1</sup> (\$)	Coût (\$/ha)
<b>Graminées ou crucifère :</b>			
Sorgho-soudan	20	45,50	36,40
Millet perlé	10	68,75	27,50
Seigle d'automne	125	17,10	85,50
Tillage radish	10	153,00	61,20
Ray-grass annuel	25	72,00	72,00
<b>Légumineuses :</b>			
Pois fourrager	60	24,50	58,80
Vesce velue	20	114,35	91,50

<sup>1</sup> Prix moyens de trois fournisseurs en date de novembre 2014.

La semence la plus économique est le millet perlé, suivi du sorgho-soudan. Vu les résultats de biomasse favorables à l'endroit du sorgho et du millet au site Monlou et à l'IRDA en Montérégie, soit en région chaude, il est justifié de les recommander sur le plan agronomique et économique. Concernant le choix de la légumineuse, le pois au taux de semis de 60 kg/ha est plus économique que la vesce, mais il faudrait vérifier son interaction avec les autres espèces.

Concernant les revenus, ils peuvent difficilement être exprimés monétairement à l'exception de l'apport en azote. Les effets bénéfiques secondaires de l'amélioration des propriétés du sol sont difficilement chiffrables et ne font pas l'objet du présent protocole. Il n'en demeure pas moins que ces profits « physiques » (amélioration de la structure) doivent être pris en compte lorsque vient le temps d'évaluer la rentabilité de l'intégration des engrais verts dans la rotation.

## CONCLUSION

---

En Montérégie, le sorgho et le millet ont permis d'obtenir des biomasses élevées de l'ordre de 6 à 18 t de matière sèche/ha alors que les biomasses du seigle et du radis étaient autour de 4t/ha. Au Lac St-Jean, les biomasses obtenues ont été faibles, variant entre 1,5 et 3 t/ha. Lorsque la biomasse ou le taux d'azote du mélange étaient élevés, le contenu total en azote total de l'engrais vert était élevé. La disponibilité de cet azote l'année suivante devrait être variable car le ratio C/N variait beaucoup selon le type de mélange.

L'utilisation de mélanges d'engrais verts à racines puissantes n'a pas permis d'ameublir les zones de sol compactes situées sous la couche travaillée. Ce qui a été surprenant est que le taux de colonisation de la zone 15-40 cm n'a pas été meilleur pour les sites moins compactés. Les racines ont toutefois permis d'approfondir d'environ 5 cm supplémentaire la couche superficielle meuble pour la plupart des sites.

La résistance à la pénétration n'a pas été significativement affectée par les traitements et est très variable. Elle ne permet en aucun cas de comparer le niveau de compaction entre les sites car cette mesure varie beaucoup avec le taux d'humidité, en particulier pour les sols argileux.

Les suivis réalisés sur le site Monlou en 2012 ont permis de constater que les racines se développaient abondamment dans les zones ameublées par le sous-solage.

Des études conjointes réalisées au CETAB+ confirment que la combinaison du sous-solage et d'engrais verts déjà établis permettrait d'atteindre un niveau de décompaction optimal à court terme. Les engrais verts sont connus pour augmenter la vie microbienne et par conséquent ils contribuent à améliorer le sol et à stabiliser la structure.

Il s'avère pertinent de poursuivre la recherche sur des techniques de régie faisant appel à des combinaisons de méthodes culturales et biologiques afin d'obtenir le plein potentiel des couverts végétaux.

## BIENS LIVRÉS

---

### *Démonstrations et visites*

- Anne Weill et Pierre-Antoine Gilbert, CETAB+. Visite des parcelles au site Monlou, à La Présentation, septembre 2012.
- Xavier Desmeules, Agrinova. Visite des parcelles au site de la ferme Tournevent à Hébertville, septembre 2012.
- Valérie Roy-Fortin, CETAB+. Visite des parcelles au site de l'IRDA, à St-Bruno-de-Montarville, septembre 2014.

### *Conférences*

- Pierre-Antoine Gilbert, CETAB+. Profils racinaires d'engrais verts pour structurer le sol et essai de sous-soleuses dans une culture établie. Les journées horticoles de St-Rémi, décembre 2012.
- Pierre-Antoine Gilbert, CETAB+. Profils racinaires d'engrais verts pour structurer le sol et essai de sous-soleuses dans une culture établie. Journée Agri-Vision de St-Hyacinthe, décembre 2012.
- Pierre-Antoine Gilbert, CETAB+. Des racines à votre service. Les journées horticoles de St-Rémi, décembre 2014.

### *Documents écrits*

- Weill, Anne et V. Roy-Fortin. 2014. Évaluation du système racinaire de quatre mélanges d'engrais verts pour réduire la compaction. Rapport final (11-INNO1-07).
- Roy-Fortin, Valérie. 2014. Évaluation du système racinaire de quatre mélanges d'engrais verts pour réduire la compaction. Fiche synthèse (11-INNO1-07).
- Roy-Fortin, Valérie. 2014. Des racines à votre service. Brochure technique.

## DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

---

Les principales difficultés rencontrées lors de ce projet se situent au niveau de l'implantation et de l'évaluation des systèmes racinaires et de la structure du sol. Premièrement, en ce qui concerne l'implantation, il importe d'être en mesure de préparer un lit de semences adéquat, c'est-à-dire exempt de mauvaises herbes, pour faciliter l'établissement des cultures. Une telle condition n'a pu être satisfaite sur le site de l'IRDA en 2012, en raison d'une forte infestation de chardon, forçant l'abandon de l'essai. Les variations climatiques ont également eu d'importantes répercussions sur certaines espèces au site du Saguenay-Lac-St-Jean. Le semis retardé et la période de sécheresse qui a suivi n'ont pas été propices à l'établissement d'engrais verts. Cet insuccès aura provoqué l'absence de résultats pour ce site nordique, hormis la constatation que le climat de cette région convient très peu aux cultures exigeantes en chaleur.

Deuxièmement, en ce qui concerne l'évaluation des systèmes racinaires, la variable mesurée soit le taux de colonisation ou profil racinaire a été plutôt laborieuse à recueillir, en plus d'être peu concluante. Face cachée de la plante, les racines sont difficiles à observer au champ. La technique du profil cultural nécessite de creuser le sol et de dégager manuellement les racines, ce qui endommage inévitablement leur état naturel. Comme il est mentionné dans la section présentant ces résultats, les nombreuses sources de variabilité de la distribution des racines n'ont pu mener à des différences significatives.

Troisièmement, la quête de données quantitatives dans l'évaluation de la structure du sol a justifié l'utilisation d'un pénétromètre pour mesurer la résistance du sol. Or, la précision de cet instrument n'est

pas suffisante pour discerner les systèmes racines des différentes espèces étudiées. De plus, le sol est souvent sujet à des variations attribuables à d'autres facteurs que les engrais verts, ce qui est aussi susceptible de fausser les données. Il est ainsi impératif de comparer les mesures selon une même date, de sorte que la teneur en eau du sol n'influence pas les résultats. La récolte d'observations qualitatives a toutefois permis de solidifier les informations acquises.

## REMERCIEMENTS

---

Ce projet a été rendu possible grâce au soutien financier du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, dans le cadre du Programme de soutien au développement de l'agriculture biologique (Innovbio).

Le CETAB+ souhaite remercier leur partenaire, le centre de recherche Agrinova du Saguenay-Lac-St-Jean, et la précieuse contribution de Xavier Desmeules et Régis Pilote qui ont assuré le bon déroulement des essais à la ferme Tournevent. Mentionnons dans un même ordre d'idée la collaboration de plusieurs membres du personnel du CETAB+, à savoir Anne Weill, Pierre-Antoine Gilbert, Aurélie Demers et Audrey Fréchette. L'équipe de recherche tient également à souligner les personnes suivantes pour leur généreux appui : Jacques Dallaire de la ferme Tournevent, Simon Audette des équipements Monlou inc. et les techniciens de l'IRDA à St-Bruno-de-Montarville : Robert Boivin et Benoit McConnell Legault, de même que Sylvie Bellerose pour la gestion du volet administratif.

## RÉFÉRENCES

---

Dumont, A. 2012. *Le sorgho-soudan décompacteur par excellence*. Le bulletin des agriculteurs. <http://www.lebulletin.com/actualites/le-sorgho-soudan-decompacteur-par-excellence-42811>

Gasser, M-O. 2012. *Effets bénéfiques combinés du sous-solage et des cultures à racines profondes pour décompacter le sol et améliorer la productivité des cultures*. [http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/CentreduQuebec/INPACQ2012/INPACQ\\_Grandes\\_cultures\\_MOGasser\\_1\\_fev\\_2012.pdf](http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/CentreduQuebec/INPACQ2012/INPACQ_Grandes_cultures_MOGasser_1_fev_2012.pdf)

Gouvernement du Canada. *Données climatiques historiques*. Consulté en novembre 2014. <http://climat.meteo.gc.ca/>

Jobin, P. et Y. Douville. 2000. *Engrais verts et cultures intercalaires*. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. [http://www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/engvert\\_couleur\\_basse.pdf](http://www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/engvert_couleur_basse.pdf)

Leblanc, V., A. Vanasse, G. Bélanger et P. Séguin. 2012. *Sweet pearl millet yields and nutritive value as influenced by fertilization and harvest dates*. *Agronomy Journal*, vol. 104 no.2, p. 542 à 549.

Magdoff, F. et H. Van Es. 2009. *Building soils for better crops. Sustainable soil management*. Handbook series book 10, 3ième édition, 310 pages.

Robert, L., 2011. *Le Tillage Radish: une sous-soleuse biologique?* <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/chaudiereappalaches/journalvisionagricole/Juin2011/Pages/TillageRadish.aspx>, consulté le 19 décembre 2012.

Weill, A. et V. Roy-Fortin. 2014. *Optimisation de la fertilisation pour la production biologique de tomates en grands tunnels*. CETAB+.

## ANNEXES

## ANNEXE I : ANALYSES FOLIAIRES

Tableau 8 : Pourcentages d'azote et de carbone foliaires analysés dans chaque mélange, le ratio C/N et l'apport d'azote (kg/ha) selon la biomasse mesurée pour tous les sites

Site	Espèce	% N	% C	C/N	N (kg/ha)
<b>2012- Moulou sable</b>					
	Millet + vv	1,3 a	42,4 a	32,0 a	179 a
	T-radish + vv	1,5 a	36,9 a	25,3 a	65 b
	Sorgho + vv	1,0 a	43,6 a	44,5 a	192 a
	Seigle + vv	3,1 b	41,3 a	13,6 b	137 a
<b>2012 – Monlou argile</b>					
	Millet + vv	1,3 a	41,4 a	33,0 a	127 a
	T-radish + vv	1,7 a	35,0 a	21,4 a	67 b
	Sorgho + vv	1,2 a	42,2 a	36,8 a	160 a
	Seigle + vv	3,6 b	41,2 a	11,4 b	130 a
<b>2014 – IRDA sable</b>					
	Millet + vv	2,19 a	40,7 a	18,6 a	142 a
	T-radish + vv	3,10 b	39,2 a	12,6 a	130 a
	Sorgho + vv	2,23 a	42,8 a	19,5 a	155 a
	Seigle + vv	3,60 b	41,2 a	12,2 a	130 a
<b>2014 – IRDA argile</b>					
	Millet + vv	3,25 a	36,6 a	11,2 a	141 a
	T-radish + vv	3,19 a	37,7 a	11,9 a	151 a
	Sorgho + vv	4,18 a	42,2 a	10,3 a	137 a
	Seigle + vv	4,35 a	41,9 a	9,8 a	141 a
<b>2012 Tournevent</b>					
	Millet + pois	3,98 a	41,7 a	10,5 a	18 a
	T-radish + pois	4,32 a	38,7 a	9,0 a	17 a
	Sorgho + pois	4,35 a	42,0 a	10,0 a	23 a
	Ray-grass + pois	3,89 a	41,3 a	10,6 a	24 a
<b>2014 Tournevent</b>					
	T-radish	3,6	38,5	10,7	109

Les résultats à l'intérieur d'une même colonne pour chaque site portant la même lettre ne diffèrent pas significativement ( $p > 0.05$ ).

## ANNEXE II : TAUX DE COLONISATION DES RACINES

Tableau 9 : Taux de colonisation des racines calculés pour tous les sites

Site	Profondeur (cm)	Millet + Lég.	Sorgho + Lég.	Seigle + Lég.	T-radish + Lég.
<b>2012- Moulou sable</b>					
	0 – 10	0,66	0,76	0,74	0,80
	10 – 20	0,73	0,70	0,89	0,87
	20 – 30	0,56	0,52	0,40	0,49
	30 – 40	0,22	0,23	0,08	0,10
<b>2012 – Monlou argile</b>					
	0 – 10	0,49	0,36	0,48	0,30
	10 – 20	0,39	0,36	0,49	0,43
	20 – 30	0,21	0,28	0,34	0,30
	30 – 40	0,12	0,13	0,24	0,14
<b>2014 – IRDA sable</b>					
	0 – 10	0,84	0,89	0,86	0,71
	10 – 20	0,84	0,76	0,83	0,81
	20 – 30	0,58	0,33	0,33	0,40
	30 – 40	0,19	0,11	0,27	0,19
<b>2014 – IRDA argile</b>					
	0 – 10	0,87	0,89	0,85	0,61
	10 – 20	0,71	0,78	0,71	0,67
	20 – 30	0,48	0,46	0,41	0,54
	30 – 40	0,25	0,23	0,27	0,39
<b>2012 Tournevent</b>				<b>Ray-grass</b>	
	0 – 10	0,76	0,76	0,78	0,73
	10 – 20	0,54	0,41	0,68	0,60
	20 – 30	0,30	0,33	0,29	0,46
	30 – 40	0,17	0,16	0,11	0,33
<b>2014 Tournevent</b>					
	0 – 10	∅	∅	∅	0,71
	10 – 20	∅	∅	∅	0,67
	20 – 30	∅	∅	∅	0,31
	30 – 40	∅	∅	∅	0,14

Aucune différence significative entre les traitements

ANNEXE III : RÉSISTANCE À LA PÉNÉTRATION

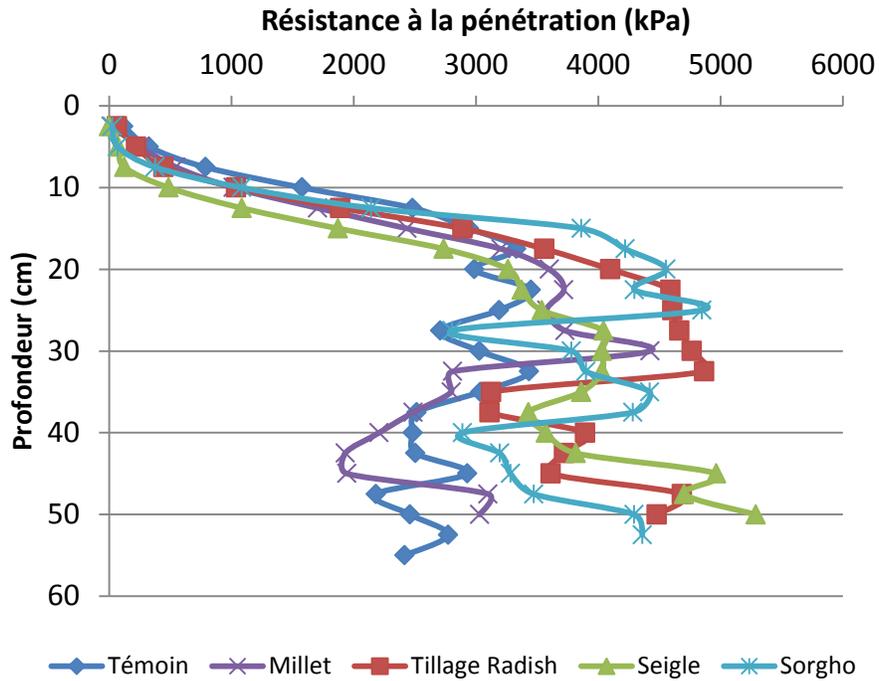


Figure 22 : Résistance à la pénétration. Site Monlou – sol léger – 2012.

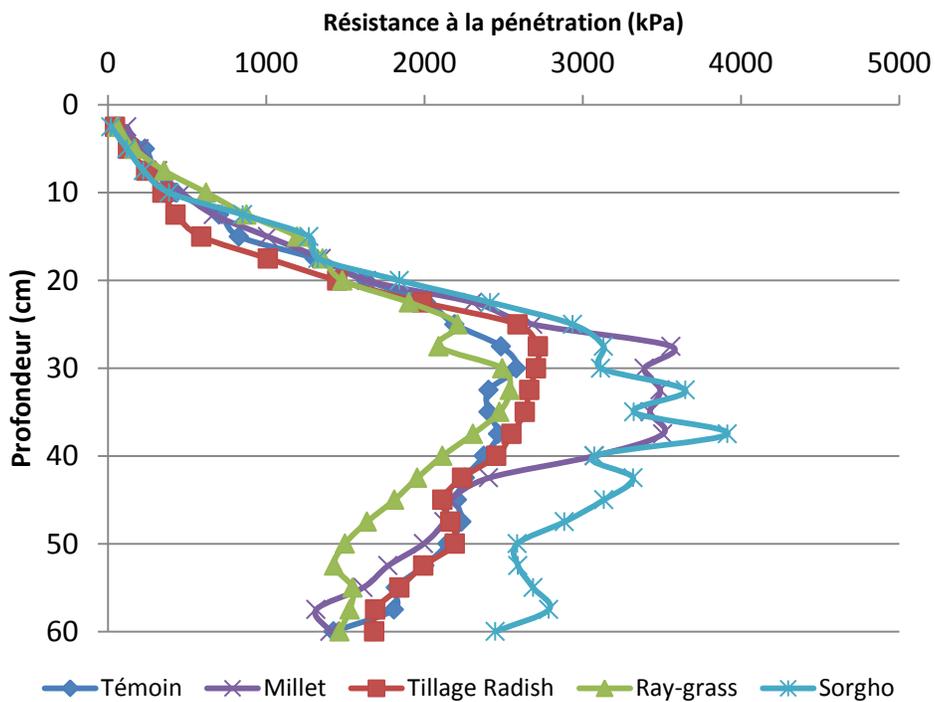


Figure 23 : Résistance à la pénétration. Site Tournevent 2012.

## ANNEXE III : RÉSISTANCE À LA PÉNÉTRATION (SUITE)

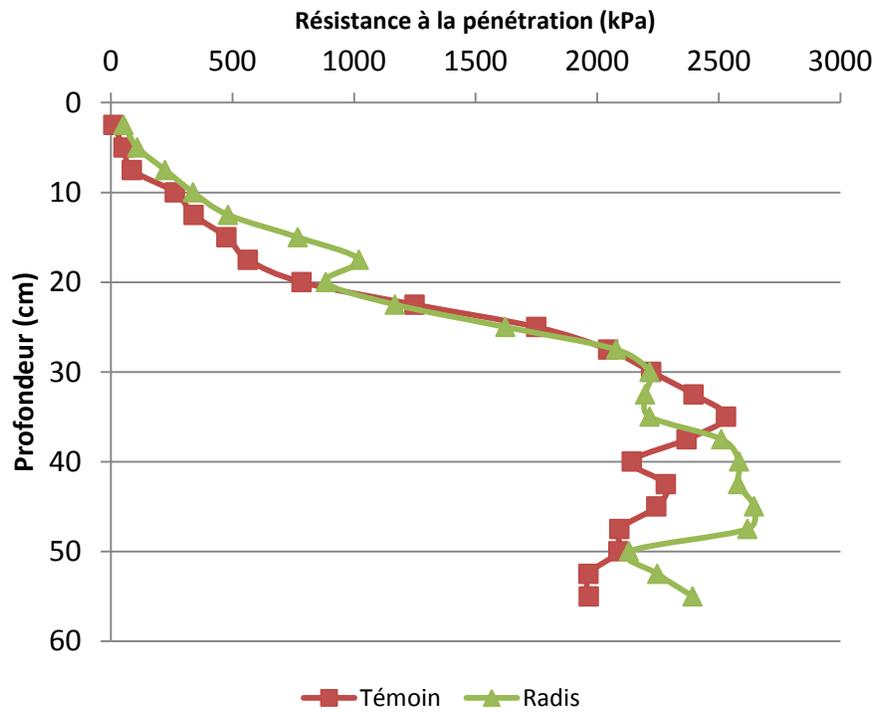


Figure 24 : Résistance à la pénétration. Site Tournevent 2014.