



Gembloux Agro-Bio Tech  
Université de Liège

# **DÉTECTION ET QUANTIFICATION DES RACINES ET DES RÉSIDUS DE CULTURE DE FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.) PAR IMAGERIE HYPERSPECTRALE PROCHE INFRAROUGE**

**GUILLAUME FRAIPONT**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**ANNEE ACADEMIQUE 2014-2015**

**PROMOTEUR: PROFESSEUR BERNARD BODSON**

*Toute reproduction du présent document par quelque procédé que ce soit ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et du Doyen de Gembloux Agro-Bio Tech.*

*Le présent document n'engage que son auteur.*



Gembloux Agro-Bio Tech  
Université de Liège

# **DÉTECTION ET QUANTIFICATION DES RACINES ET DES RÉSIDUS DE CULTURE DE FROMENT D'HIVER (*TRITICUM AESTIVUM* L.) PAR IMAGERIE HYPERSPECTRALE PROCHE INFRAROUGE**

**GUILLAUME FRAIPONT**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**ANNEE ACADEMIQUE 2014-2015**

**PROMOTEUR: PROFESSEUR BERNARD BODSON**

Département AGROBIOCHEM, Axe Ingénierie des productions végétales et valorisation, Unité de Phytotechnie des Régions Tempérées (Faculté Gembloux Agro-Bio Tech, ULg).

Département de Valorisation des productions, Unité de Qualité des produits (Centre wallon de Recherches agronomiques).

## Remerciements

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans la collaboration de nombreuses personnes. J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier le Professeur Bernard Bodson pour son accueil au sein de son unité, sa présence, sa disponibilité et ses conseils avisés.

Je remercie également particulièrement Damien Eylenbosch, assistant, pour son aide au jour le jour et pour m'avoir laissé une place importante dans ses recherches.

Merci également à Messieurs Juan Fernández Pierna, Vincent Baeten et Nicaise Kayoka pour leur accueil au sein de leur unité du CRA-W, leur soutien et leur créativité infinie.

Je remercie Madame Hélène Soyeurt pour son aide dans la partie statistique de ce travail.

Je remercie également plusieurs personnes sollicitées au cours de mes recherches : Mesdames Florine Degrunne et Marie-Pierre Hiel et Messieurs Jean-Pierre Destain et Jérôme Pierreux. Ils ont su m'accorder du temps quand j'en avais besoin.

Je remercie également les équipes du CRA-W et de la ferme expérimentale de Gembloux Agro-Bio Tech pour leur bonne humeur au quotidien et leur professionnalisme.

Nous remercions aussi le plateau technique de calcul et modélisation informatique (CAMI).

Enfin, je ne pourrais terminer sans exprimer mon profond attachement à mes parents et mon frère Antoine pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces 5 ans d'études. Je remercie également mes proches et amis pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon cursus et pour leurs encouragements.

## Résumé

A l'heure actuelle, de nombreux laboratoires s'intéressent aux systèmes racinaires des plantes. Ce mémoire s'est concentré sur le système racinaire du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.). Aujourd'hui, peu de techniques sont capables de quantifier de manière précise le système racinaire de plantes cultivées au champ. C'est la raison pour laquelle ce mémoire se penche sur une méthode innovante de quantification des systèmes racinaires : l'utilisation combinée de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge (NIR-HSI) et des outils de la chimiométrie<sup>1</sup>. Cette méthode présente l'avantage majeur de pouvoir discriminer les éléments sur base de leur spectre infrarouge. Cette particularité a été exploitée afin de discriminer les résidus de culture et les racines dans le but de s'affranchir du temps et de la main d'œuvre requis lors du tri et de la quantification manuels.

Sur base de 384 échantillons de sol prélevés à 4 dates différentes au cours de la saison culturale 2011-2012 dans l'horizon 0-30 cm, ce mémoire a permis d'étudier l'évolution des résidus de culture et le développement du système racinaire du froment d'hiver tout au long de la saison culturale au moyen de la technologie NIR-HSI.

Une influence significative du travail du sol a été observée sur la distribution des résidus de culture. En effet, sur base des données prédites, un mélange de 90% des résidus totaux dans les 10 premiers centimètres du profil en non-labour est observé. Par contre, en modalité de labour, 77 % en moyenne des résidus de culture se retrouvent enfouis entre 10 et 30 cm de profondeur.

Par ailleurs, le développement du système racinaire a pu être suivi. Dans les 30 premiers centimètres du sol, une stagnation de la croissance du système racinaire entre le 17 novembre 2011 et le 4 avril 2012 a été observée. Ensuite, une croissance importante a été mesurée jusqu'au 8 mai 2012 puis une décroissance au 8 août 2012. Une influence significative du travail du sol sur le développement du système racinaire a également pu être mise en évidence. Le labour permet un développement plus homogène du système racinaire au sein du profil alors qu'une concentration du système racinaire dans les 10 premiers centimètres est observée en non-labour. Ceci a pu être mis en relation avec deux éléments : l'humidité du sol et les compactations de sol.

A la suite des mesures réalisées dans le cadre de ce mémoire, il est apparu que des améliorations pouvaient être apportées à la méthode de quantification. Sur base de la variabilité observée, des pistes d'amélioration ont été proposées, testées et appliquées sur certaines données, menant à une amélioration importante des prédictions.

Par conséquent, par sa capacité à pouvoir discriminer les éléments sur base de leur spectre infrarouge, la méthode de discrimination basée sur l'utilisation de la technologie NIR-HSI et les modèles chimiométriques semble être tout à fait pertinente dans les recherches liées aux systèmes racinaires. Un perpétuel enrichissement des sets de calibration, la combinaison de la méthode avec des logiciels d'analyse d'images et une connaissance fine de l'évolution chimique des éléments au cours de la saison devraient rendre cette technique de plus en plus précise.

---

<sup>1</sup> La chimiométrie est la science consistant à extraire une information pertinente au départ de mesures réalisées sur des systèmes chimiques en utilisant des procédures mathématiques et statistiques (Massart et al., 1988, cités par Dale et al., 2012)

## Abstract

Nowadays, many laboratories take an interest in the root systems of plants. This master thesis focused on the root system of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). So far, only a few techniques allow a precise quantification of the root system of field-cultivated plants. In light of this fact, this research proposes an innovative method of root system quantification: the combination of near infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) and chemometric<sup>2</sup> tools. The major advantage of this method is to make scientists able to discriminate elements purely on the basis of their infrared spectrum. In order to overcome the time and labor constraints inherent to manual sorting and quantification, this feature has been used to discriminate crop residues and roots.

On the basis of 384 soil samples collected at 4 different dates during the 2011-2012 crop season in the 0-30 cm soil horizon, this master thesis allowed the study of crop residues evolution and the development of winter wheat root system throughout the crop season by the means of NIR-HSI technology.

A significant influence of tillage on the distribution of crop residues has been observed. Indeed, for reduced tillage, a mix of 90% of total residues in the 10 first centimeters of the soil profile has been noticed on the basis of predicted data. However, for conventional tillage, 77% of crop residues are buried on average between 10 and 30 cm in depth.

Furthermore, the growth of the root system was monitored. In the 30 first centimeters of soil, no growth of the root system was first observed between November 17th 2011 and April 4th 2012. Then, an important growth was measured until May 8th 2012 followed by a decrease on August 8th 2012. Also, a significant influence of tillage on the development of the root system was highlighted. Ploughing allows a more homogeneous development of the root system in the soil profile in opposition to reduced tillage for which a concentration of the root system in the 10 first centimeters of soil was noticed. This observation could be explained by two elements : humidity of soil and its compactions.

In the wake of the measurements achieved in the frame of this master thesis, it appeared that improvements could be brought to the quantification method. Based on the observed variability, improvements were suggested, tested and applied on a part of the data set, leading to an important improvement of predictions.

Consequently, by allowing elements to be discriminated based on their infrared spectrum, the method using both NIR-HSI technology and chemometric tools seems to be relevant for researches related to root systems. A perpetual enrichment of calibration sets, the combination of this method with image analysis software as well as an in-depth knowledge of the chemical composition evolution of elements throughout the season would make this technique even more precise.

---

<sup>2</sup> Chemometrics is the science consisting in the extraction of relevant information on the basis of measurements achieved on chemical systems by using mathematical and statistical procedures (Massart and al., 1988, cited by Dale and al., 2012)

# Table des matières

## Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Revue de la littérature.....	2
2.1.	Le développement du système racinaire du froment d'hiver.....	2
2.2.	Les facteurs influençant le développement racinaire du froment d'hiver .....	6
2.3.	Le phénotypage des systèmes racinaires.....	12
2.3.1.	Le phénotypage « in lab » .....	13
2.3.1.1.	Les milieux de culture utilisés en laboratoire.....	13
2.3.1.2.	Les technologies d'imagerie .....	13
2.3.1.2.1.	Les technologies d'imagerie 2D.....	13
2.3.1.2.2.	Les technologies d'imagerie 3D.....	14
2.3.2.	Le phénotypage « in field » .....	15
2.3.2.1.	L'extraction de systèmes racinaires .....	15
2.3.2.1.1.	Méthodes d'excavation d'un système racinaire entier.....	15
2.3.2.1.2.	Méthode du monolithe .....	16
2.3.2.1.3.	Echantillonnage à la tarière.....	17
2.3.2.1.4.	Ingrowth cores .....	18
2.3.2.1.5.	Une méthode particulière de quantification : la « core-break method ».....	18
2.3.2.1.6.	La méthode du profil (Trench profile method) .....	19
2.3.2.1.7.	Les procédures de lavage des échantillons .....	19
2.3.2.1.8.	Le stockage des racines .....	20
2.3.2.1.9.	La quantification racinaire.....	21
2.3.2.1.10.	L'analyse d'images au service de la quantification racinaire .....	22
2.3.2.1.11.	Présentation d'études ayant exploité ces méthodes.....	23
2.3.2.2.	La Shovelomics .....	23
2.3.2.3.	Les minirhizotrons .....	25
2.3.2.4.	La PCR quantitative au service de la quantification racinaire .....	28
2.3.2.5.	L'utilisation des propriétés électriques des racines .....	29
2.3.2.5.1.	La capacité électrique.....	29
2.3.2.5.2.	L'imagerie par résistivité électrique.....	30
2.3.2.6.	La spectroscopie infrarouge : un outil innovant dans les études relatives aux systèmes racinaires .....	32
2.4.	Conclusion de la revue de la littérature .....	35

3.	Matériel et méthode .....	36
3.1.	Description de l'essai SOLRESIDUS.....	36
3.2.	Prélèvements des échantillons de sol .....	37
3.3.	Extraction des racines et résidus de culture des prélèvements de sol .....	37
3.4.	Description de la caméra hyperspectrale proche infrarouge Line scan.....	38
3.5.	Le protocole de discrimination.....	39
3.6.	Quantification des résidus de culture et des racines de froment .....	40
3.7.	L'analyse statistique .....	41
3.8.	Création, analyse et suivi de standards.....	43
4.	Analyse des résultats : statistiques descriptives et inférence.....	44
4.1.	Inférence : respect des conditions d'application, transformation des données de départ et modèles utilisés.....	44
4.2.	Résidus de culture : analyse des résultats.....	45
4.2.1.	Distribution des résidus de culture dans les 30 premiers cm du profil de sol : analyse intra-dates .....	45
4.2.2.	Evolution de la décomposition des résidus de culture au cours de la saison culturale dans les 30 premiers cm du profil de sol : analyse inter-dates .....	49
4.3.	Racines : analyse des résultats .....	52
4.3.1.	Distribution racinaire au sein des 30 premiers cm du profil de sol : analyse intra-dates .....	52
4.3.2.	Courbes de croissance du système racinaire du froment d'hiver au cours de la saison dans les 30 premiers cm du profil de sol : analyse inter-dates .....	56
5.	Interprétation des résultats .....	60
5.1.	Inférence : pourquoi les conditions d'application n'étaient-elles pas respectées ? .....	60
5.2.	Distribution et évolution de la quantité de résidus de culture au cours du temps dans l'horizon 0-30 cm.....	60
5.2.1.	Distribution des résidus de culture dans l'horizon 0-30 cm en lien avec le travail du sol .....	60
5.2.2.	Quantité de résidus mesurée en fonction du mode de restitution des résidus de culture .....	61
5.2.3.	Dégradation des résidus de culture de froment au cours de la saison culturale 2011-2012 .....	62
5.3.	Distribution et développement du système racinaire au cours de la saison .....	64
5.3.1.	Analyse de l'influence du travail du sol sur le développement du système racinaire dans les 30 premiers cm du profil de sol.....	64
5.3.2.	Analyse de l'influence du mode de restitution des résidus de culture sur les quantités de racines prédites .....	66
5.3.3.	Développement du système racinaire au cours de la saison: discussion de la courbe de croissance .....	66



5.3.4.	Quantifications racinaires réalisées et comparaisons avec la littérature .....	68
5.4.	Utilisation de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge dans les études relatives aux systèmes racinaires et à l'évolution des résidus de culture au sein du sol : perspectives .....	70
5.4.1.	Variabilité des mesures acquises au moyen de la caméra hyperspectrale proche infrarouge au cours du temps .....	70
5.4.2.	Pistes d'amélioration avancées lors de ce mémoire .....	71
5.4.3.	Résultats obtenus sur base d'un élargissement du set de calibration des modèles : comparaison des modèles « 2014 » et « 2015 » .....	71
5.4.4.	Intérêts de la spectroscopie proche infrarouge par rapport aux autres méthodes de quantification racinaire .....	73
6.	Conclusion .....	75
7.	Références bibliographiques .....	76
8.	Annexes .....	I
	Annexe 1 : la méthode commune du monolithe (Böhm, 1979).....	I
	Annexe 2 : extraction d'un monolithe de sol pour l'étude de l'horizon supérieur du sol (Böhm, 1979).....	I
	Annexe 3 : la méthode de la boîte (Böhm, 1979).....	II
	Annexe 4 : la méthode de la planche à aiguilles .....	II
	Annexe 5 : Revue bibliographique de l'utilisation de la spectroscopie infrarouge dans l'étude des systèmes racinaires .....	III
	Annexe 6 : Les systèmes de phénotypage et de quantification racinaire applicables sur des plantes cultivées au champ – Tableau de synthèse .....	IV
	Annexe 7 : Dispositif expérimental du projet SOLRESIDUS.....	VII

## Table des figures

Figure 1.	Organisation du système racinaire des céréales (Gate, 1995).....	2
Figure 2.	Angle formé entre l'horizontale et la ligne connectant le site de pénétration de la racine et le centre du pot (Oyanagi, 1994).....	7
Figure 3.	Tarière manuelle (Böhm, 1979).....	17
Figure 4.	Mesure de la longueur racinaire au moyen de la méthode d'intersection de ligne (Böhm, 1979).....	22
Figure 5.	Traits mesurés lors de l'analyse visuelle du système racinaire (Trachsel et al., 2011). .....	23
Figure 6.	Fonctionnement d'un minirhizotron (Rewald et Ephrath, 2013).....	25
Figure 7.	Principe de la mesure de capacité du système racinaire (Ellis et al., 2012).....	29
Figure 8.	Principe de l'imagerie par résistivité électrique (Amato et al., 2009).....	31
Figure 9.	Le spectre électromagnétique (Mc Bratney et al., 2003, cités par Viscarra Rossel et al., 2005).....	32

Figure 10. Illustration d'un hypercube et relation entre les 2 dimensions spatiales et la dimension spectrale (Gowen et al., 2007). .....	34
Figure 11. Description de l'essai SOLRESIDUS (Vancutsem et al., 2012).....	36
Figure 12. Description du lavage des échantillons. Vue globale de l'installation d'extraction des résidus (A), Transfert d'un échantillon après 48 heures trempage (B), Schéma du système d'extraction (C), Vue de l'entraînement des résidus de culture par le courant d'eau et chute de ces derniers dans le tube central (D), Récupération des résidus sur le filtre (E), Aperçu de ce qui est récupéré sur le filtre (F) (Vancutsem et al., 2012). .....	37
Figure 13. Photo du système d'acquisition d'image: une caméra NIR hyperspectrale combinée à une bande transporteuse (Vincke et al., 2014). .....	38
Figure 14. Description du fonctionnement de la caméra : l'échantillon est éclairé par une source lumineuse et un faisceau est ensuite réfléchi vers un détecteur bidimensionnel perpendiculaire à la surface de mesure (Grahm et al., 2007).....	38
Figure 15. Mode d'acquisition des images hyperspectrales au moyen du système Line scan (CRA-W). .....	38
Figure 16. Disposition de l'échantillon sur la bande transporteuse. L'échantillon est étalé sur le tamis sur lequel il avait été placé pour le séchage. ....	39
Figure 17. Illustration des 4 classes spectrales étudiées: le background (tamis et tapis), le sol (cailloux et résidus de terre), les racines de froment et les résidus de culture de froment. ....	39
Figure 18. Arbre de classification dichotomique basé sur 3 nœuds successifs d'équations SVM .....	39
Figure 19. Représentation des spectres moyens des 4 classes: background, sol, pailles et racines. ...	40
Figure 20. Description de la prise d'image et des résultats obtenus après l'application du protocole de prédiction (Echantillon DQ140581_03_FH_17NOV2011_1C_L). .....	40
Figure 21. Relation entre la masse de résidus de culture de froment et le nombre de pixels prédits comme étant des résidus de culture sur base des images NIR. ....	41
Figure 22. Relation entre la masse de racines de froment et le nombre de pixels prédits comme étant des racines sur base des images NIR. ....	41
Figure 23. Schéma descriptif d'un des standards conçus lors de cette étude. Le standard paille présente 2 classes spectrales : le background (tapis de mesure et tamis) et la classe spectrale « paille » .....	43
Figure 24. Distribution des résidus de culture au sein du profil en fonction des modalités de travail du sol et de restitution des résidus le 17 Novembre 2011. ....	47
Figure 25. Distribution des résidus de culture au sein du profil en fonction des modalités de travail du sol et de restitution des résidus le 4 Avril 2012. ....	47
Figure 26. Distribution des résidus de culture au sein du profil en fonction des modalités de travail du sol et de restitution des résidus le 8 Mai 2012. ....	48
Figure 27. Distribution des résidus de culture au sein du profil en fonction des modalités de travail du sol et de restitution des résidus le 8 Août 2012.....	48
Figure 28. Evolution de la quantité de résidus de froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon A).....	50
Figure 29. Evolution de la quantité de résidus de froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon B).....	50
Figure 30. Evolution de la quantité de résidus de froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon C).....	51
Figure 31. Evolution des résidus de culture au cours de la saison culturale 2011-12- Modalité Labour. Toutes les valeurs sont exprimées proportionnellement à l'objet Labour/Horizon A/17 Novembre 2011. Au sein de chaque horizon, des lettres différentes entre dates signifient que des différences significatives de densités de résidus existent entre ces dates. ....	51

Figure 32. Evolution des résidus de culture au cours de la saison culturale 2011-12- Modalité Non-Labour. Toutes les valeurs sont exprimées proportionnellement à l'objet Labour/Horizon A/17 Novembre 2011. Au sein de chaque horizon, des lettres différentes entre dates signifient que des différences significatives existent entre ces dates.....	52
Figure 33. Distribution racinaire en fonction du mode de restitution des résidus et de la modalité de travail du sol le 17 Novembre 2011. ....	54
Figure 34. Distribution racinaire en fonction du mode de restitution des résidus et de la modalité de travail du sol le 4 Avril 2012. ....	54
Figure 35. Distribution racinaire en fonction du mode de restitution des résidus et de la modalité de travail du sol le 8 Mai 2012. ....	55
Figure 36. Distribution racinaire en fonction du mode de restitution des résidus et de la modalité de travail du sol le 8 Août 2012.....	55
Figure 37. Evolution du système racinaire du froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon A).....	57
Figure 38. Evolution du système racinaire du froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon B).....	58
Figure 39. Evolution du système racinaire du froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon C).....	58
Figure 40. Evolution du système racinaire au cours de la saison culturale 2011-12- Modalité Labour. Toutes les valeurs sont exprimées proportionnellement à l'objet Labour/Horizon A/17 Novembre 2011. Au sein de chaque horizon, des lettres différentes entre dates signifient que des différences significatives de densités racinaires existent entre ces dates.....	59
Figure 41. Evolution du système racinaire au cours de la saison culturale 2011-12- Modalité Non-Labour. Toutes les valeurs sont exprimées proportionnellement à l'objet Labour/Horizon A/17 Novembre 2011. Au sein de chaque horizon, des lettres différentes entre dates signifient que des différences significatives de densités racinaires existent entre ces dates.....	59
Figure 42. Cartes pénétrométriques réalisées par le CRA-W (Claire Olivier, 2012) sur les parcelles n°7 (Labour-Résidus In) et n°5 (Non-Labour-Résidus In) en 2012. Une ligne noire a été tracée à la profondeur 30 cm, délimitant la zone étudiée dans le cadre de ce mémoire. La légende relie la couleur à la résistance à la pénétration (RP) correspondante exprimée en kg/cm <sup>2</sup> . Les couleurs jaune pâle correspondent à de faibles RP, les couleurs plus foncées correspondent à des RP élevées. ...	4365
Figure 43. Evolution de la biomasse aérienne du froment d'hiver par stade de végétation au cours de l'année 2011-2012. Les 3 flèches situent les 3 dernières dates de prélèvement : le 4 avril 2012, le 8 mai 2012 et le 8 août 2012.....	67
Figure 44. Evolution du standard "pailles" durant la période de mesures des échantillons - Prédiction au moyen du protocole de discrimination basé sur des modèles SVM. Les flèches représentent une nouvelle journée d'acquisition. ....	70
Figure 45. Comparaison de 2 images prédites au moyen des anciens (modèles « 2014 ») et des nouveaux (modèles « 2015 ») modèles SVM. Echantillon DQ140581-146-8MAI2012-1B-L1. ....	72
Figure 46. Comparaison des prédictions des images du standard "pailles" au moyen de 2 protocoles de discrimination basés sur des modèles SVM: "2014" et "2015". Les flèches correspondent au début d'une nouvelle journée d'acquisition. ....	73

## Table des tableaux

Tableau 1. Densités racinaires (en g de racines/dm <sup>3</sup> de sol) mesurées pour deux modalités de travail du sol, dans 3 horizons de sol et à 4 stades clés (Huang et al., 2012).....	6
---	---

Tableau 2. Tableau de synthèse sur les avantages et les inconvénients du No-tillage .....	12
Tableau 3. Agents chimiques utilisés lors du trempage des racines dans l'eau (Oliveira et al., 2000). 19	
Tableau 4. Couleur et caractéristiques morphologiques utilisées pour séparer les racines de la culture de céréales étudiée des racines des cultures précédentes et des adventives, dans des échantillons lavés et observés à faible grossissement (x2 à x10) (Watt et al., 2008).....	20
Tableau 5. Logiciels utilisés pour l'analyse d'images acquises grâce au minirhizotron (Rewald et Ephrath, 2013).....	26
Tableau 6. Moyennes des densités de résidus de culture (g/dm <sup>3</sup> ) au sein de chaque horizon, pour les 2 modalités de travail du sol (labour et non-labour). Pour une même modalité de travail du sol, les densités de résidus de culture les plus élevées ont été surlignées en gris. ....	46
Tableau 7. Pourcentages de résidus de culture dans les 10 premiers cm de sol par rapport à l'ensemble du profil étudié (30 cm). La dernière colonne présente les moyennes réalisées pour les 4 objets au cours des 4 dates. ....	46
Tableau 8. Densités racinaires moyennes (g/dm <sup>3</sup> ) selon la modalité de travail du sol. Les données surlignées en gris clair sont les données les plus élevées au cours d'une date donnée, pour un horizon donné. Ceci permet une comparaison des données entre les 2 modalités de travail du sol (Labour et Non-labour). ....	53
Tableau 9. Pourcentages du système racinaire présent dans l'horizon 0-10 cm par rapport à l'ensemble du profil étudié pour chaque date et pour les 4 objets. ....	53
Tableau 10. Teneurs en eau du sol (en %) pour les différentes modalités de travail du sol, dans les horizons A (0-10 cm), B (10-20 cm) et C (20-30 cm) mesurées à 4 dates différentes au cours de la saison culturale 2011-2012. ....	65
Tableau 11. Comparaison des moyennes de densités racinaires (g/dm <sup>3</sup> ) obtenues lors du prélèvement le 8 mai 2012, après prédiction des images hyperspectrales proche infrarouge et des moyennes de densités racinaires (g/dm <sup>3</sup> ) obtenues par Huang et al. (2012) par pesées. Les données les plus élevées entre labour/non-labour ont été surlignées en gris clair. ....	69
Tableau 12. Teneurs (en kg/100 kg de matière sèche) en cellulose, hémicellulose et lignine dans les pailles de froment d'hiver (Godin et al., 2010) et les racines de froment d'hiver (Redin et al., 2013). 70	
Tableau 13. Comparaison des modèles "2014" et "2015". Le modèle "2015" est caractérisé par un élargissement du set de calibration du modèle "2014" .....	72
Tableau 14. Avantages de la spectroscopie infrarouge par rapport aux autres méthodes dans les études relatives aux systèmes racinaires. ....	74

## Table des équations

Équation 1. Relation entre le nombre de feuilles de maître-brin (X) et le nombre de racines primaires adventives (Y) (Gate, 1995). ....	4
Équation 2. Relation entre la longueur racinaire et le nombre d'interceptions du quadrillage (Newman, 1966, cité par Oliveira et al., 2000). ....	21

# 1. Introduction

Nul n'est sans savoir qu'un des défis majeurs de l'agriculture du 21<sup>ème</sup> siècle réside dans le passage d'une agriculture intensive à une agriculture écologiquement intensive. Mais comment produire davantage de biomasse de manière plus durable ? Pour répondre à cette question, de nombreuses disciplines agronomiques et domaines de recherche devront interagir et allier leurs forces. Plus spécifiquement, une piste de réponse peut être apportée par l'étude des systèmes racinaires des plantes. L'étude de cette partie souterraine fera l'objet de ce mémoire.

La racine, véritable interface entre la plante et le sol, joue un rôle prépondérant, entre autres, dans l'acquisition des nutriments et de l'eau, dans l'ancrage de la plante à son substrat et dans la biosynthèse d'hormones. C'est la raison pour laquelle Charles Darwin comparait l'extrémité des racines au cerveau animal. Par ailleurs, les systèmes racinaires, par leur rôle extrêmement important pour la plante, présentent un potentiel d'amélioration non négligeable pour augmenter la productivité de manière plus durable. Or, les systèmes racinaires des plantes se trouvent enfouis dans un milieu complexe, le sol, et sont *de facto* difficilement observables et quantifiables. Chaque système de phénotypage et de quantification racinaires actuels présente des avantages et des inconvénients. De plus, peu de techniques existent pour une quantification racinaire en routine de plantes cultivées en conditions naturelles. Un des défis de la recherche sur les systèmes racinaires consiste donc à développer de nouveaux systèmes de quantification directement utilisables par la recherche agronomique et le domaine de l'amélioration variétale.

L'essai SOLRESIDUS consiste en un projet multidisciplinaire mis en place en 2009 sur les terres de la Faculté Gembloux Agro-Bio Tech et visant à caractériser l'impact à long terme des pratiques culturales de labour/non labour et de restitution ou non des résidus de culture sur diverses composantes de l'agroécosystème. Dans le but d'étudier l'impact de ces pratiques sur l'évolution des résidus de culture au sein du sol et sur le développement des systèmes racinaires, une méthode innovante de détection et de quantification des racines et des résidus de culture a été développée grâce aux propriétés de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge (NIR-HSI) combinée aux outils de la chimiométrie. Ce mémoire consiste en la première application à grande échelle de cette méthode de quantification et, de ce fait, permet de mener une étude approfondie de l'évolution des résidus de culture et du développement du système racinaire du froment d'hiver cultivé sur l'essai SOLRESIDUS au cours de la saison culturale 2011-2012.

Une première partie de la revue de la littérature sera consacrée au système racinaire du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.). La seconde partie s'intéressera quant à elle à l'ensemble des systèmes de phénotypage et de quantification des systèmes racinaires. Ensuite, une étude de l'impact du travail du sol et de la gestion des résidus de culture sur la dégradation des résidus de culture et la croissance du système racinaire du froment d'hiver au cours de la saison culturale 2011-2012 réalisée sur base d'une quantification de ces éléments au moyen de la technologie NIR-HSI sera présentée.

Ce travail se trouve au carrefour entre la spectroscopie et l'agronomie. Un savant mélange de ces deux disciplines permettra de développer un nouveau système de quantification racinaire utilisable par la recherche agronomique et le domaine de l'amélioration variétale.

## 2. Revue de la littérature

### 2.1. Le développement du système racinaire du froment d'hiver

Le froment présente deux systèmes racinaires successifs : les racines **séminales** (aussi dénommées racines primaires ou embryonnaires) et les racines **adventives** (aussi dénommées secondaires, nodales, de tallage, post-embryonnaires ou coronales) (Figure 1) (Moule, 1971 ; Manschadi et al, 2013 ; Rogers et Benfey, 2015). Les racines séminales se développent au niveau de nœuds du scutellum et de l'épiblaste de l'hypocotyle embryonnaire du caryopse en germination. Celles-ci sont importantes car elles assurent une vigueur précoce de la plantule et établissent une structure permettant une exploration du sol pour le prélèvement de l'eau et des nutriments. Elles constituent 1 à 14 % du système racinaire entier. Elles croissent et fonctionnent tout au long de la période végétative et pénètrent le sol plus tôt et plus profondément que le second système racinaire constitué des racines adventives (Manske et Vlek, 2002). Par la suite, les racines adventives émergent au niveau du « plateau de tallage » (F.U.S.A.Gx et C.R.A.Gx, 1990). Ces dernières confèrent à la plante une résistance à la verse et jouent un rôle important dans l'absorption des nutriments. Par ailleurs, des **racines latérales** se développent à partir du péricycle sur toutes les racines au sein du sol et permettent d'augmenter l'absorption d'eau et de nutriments (Rich et Watt, 2013 ; Rogers et Benfey, 2015). Les axes principaux des racines (diamètre de 0,5-1 mm) et les ramifications primaires (diamètre 0.2-0.5 mm) constituent la majeure partie du système racinaire du froment (Barley, 1970 cité par Gregory et al., 1978).

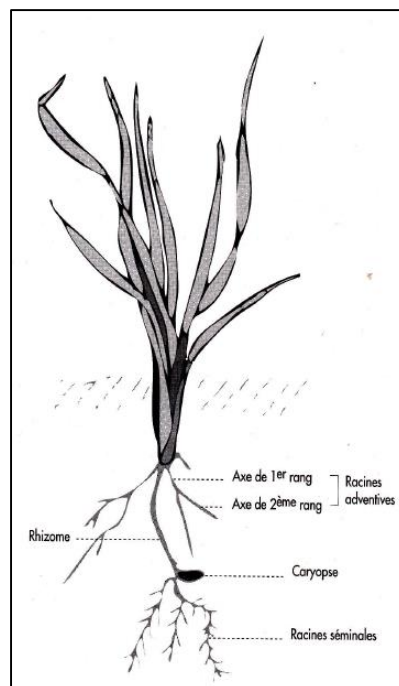


Figure 1. Organisation du système racinaire des céréales (Gate, 1995).

Les racines séminales et adventives présentent des différences d'un point de vue anatomique. En effet, les racines séminales embryonnaires présentent un large vaisseau de métaxylème au centre, entouré de plus petits vaisseaux du même type alors que la région basale des racines adventives présente une moelle de cellules parenchymateuses autour de laquelle gravitent des vaisseaux de métaxylème de taille variable (Watt et al., 2008, cités par Rich et Watt, 2013). Cette différence

anatomique peut être mise en relation avec le fonctionnement du système racinaire. En effet, conformément à la loi de Hagen-Poiseuille selon laquelle le débit volumique d'eau dans un tube est proportionnel au diamètre de ce tube élevé à la puissance 4, le large vaisseau de métaxylème central des racines séminales permettrait une meilleure circulation de l'eau par une diminution de la résistance au flux axial.

Les **poils absorbants** émergent au niveau de la zone d'élongation de la racine et peuvent atteindre une longueur de 3 à 13 mm et un diamètre de 0.003 à 0.007 mm. Leur durée de vie n'est que de quelques jours (Manske et Vlek, 2002). Les poils absorbants et les mycorhizes arbusculaires-vésiculaires et arbusculaires (AMF, Arbuscular Mycorrhizal Fungi) permettent d'augmenter de manière non négligeable la surface d'absorption du système racinaire (Manske et Vlek, 2002).

Le système racinaire du froment peut s'étendre horizontalement sur 30 à 60 cm. Au niveau de la répartition verticale des racines, 70% de la longueur racinaire totale se trouvent dans l'horizon 0-30 cm, zone bien aérée et plus riche en nutriments que les couches plus profondes (Manske et Vlek, 2002).

Le système racinaire du froment est de type fasciculé (Moule, 1971) et présente plusieurs phases au cours du cycle de développement de la plante (Gate, 1995).

#### a) La germination

Les racines séminales sont associées à différentes parties de l'embryon. Une racine principale se développe suite à l'allongement de la radicule, avant l'apparition de 2 ou 3 racines issues du scutellum et 3 racines provenant de l'épiblaste. Au total, ce sont en moyenne 6 racines séminales qui sont initiées (Gregory et al., 1978 ; Gate, 1995).

Klepper et al. (1984, cité par Gate, 1995) ont décrit la chronologie d'apparition de ces racines. La première racine séminale est émise au travers des téguments du caryopse. C'est cette percée au travers des enveloppes de la graine qui définit la germination au sens strict. Ensuite, 2 racines séminales se développent successivement avant l'allongement du coléoptile. Par après, les 2 premières racines de l'épiblaste apparaissent lors de la levée et la troisième, lorsque la première feuille a été complètement émise.

Cependant, en situation de plein champ, ce nombre est généralement atteint lors du stade 3 feuilles. De plus, le nombre de racines séminales généralement observé ne correspond pas au nombre potentiel de 6 ou 7 présentes dans la semence mais s'avère inférieur (4 ou 5). Ces différences sont dues à des effets liés à la variété, à la taille de la semence et aux conditions environnementales auxquelles la graine est soumise (Colnenne et al., 1989, cité par Gate, 1995).

#### b) L'apparition et le développement des racines adventives

Les racines adventives sont émises à partir du stade 3-4 feuilles au niveau du plateau de tallage. En conditions normales de culture, jusqu'à 30 racines adventives peuvent être retrouvées sur une plante. Leur nombre définitif n'est atteint qu'au stade gonflement. Il dépend de la capacité de tallage et varie donc en fonction de la variété et des pratiques culturales telles la date et la densité de semis (Gate, 1995).

Le développement et l'émission de ces racines se réalisent selon des rythmes distincts pendant le cycle de développement des parties aériennes :

- De la phase 3-4 feuilles jusqu'au stade épi à 1cm, c'est-à-dire durant la phase de tallage herbacé, le rythme d'émission de racines adventives se fait à vitesse constante par degrés jour. En fonction de la durée de tallage et des conditions du milieu, la plante présentera entre 6 et 15 axes primaires (Gate, 1995).

- Ensuite, du stade épi à 1 cm jusqu'à l'apparition de la dernière feuille, c'est-à-dire durant la première étape de la montaison, l'émission est accélérée (Gate, 1995).
- Enfin, entre le stade gonflement et épiaison, cette vitesse ralentit pour tendre vers un arrêt de l'émission (Gate, 1995).

C'est donc durant l'étape de montaison que le nombre de racines adventives croît le plus (Gate, 1995). L'anthèse marque la fin de la croissance du système racinaire en raison d'une compétition interne dans la plante pour les assimilats qui sont préférentiellement alloués aux organes reproductifs (Manschadi et al., 2013). De plus, Gregory et al. (1978) ont relevé après l'anthèse une décroissance du poids sec racinaire total mais une croissance persistait sous 80 cm. Le système racinaire du froment de printemps suit la même tendance : sa croissance décroît ou cesse après l'anthèse. Cependant, cette tendance peut varier en fonction du contenu en eau et des teneurs en azote du sol (Campbell et al., 1977).

c) Le développement racinaire au cours de la saison

Une relation linéaire existe entre le nombre de feuilles du maître-brin (X) et le nombre de racines primaires adventives (Y) (Gate, 1995) :

*Équation 1. Relation entre le nombre de feuilles de maître-brin (X) et le nombre de racines primaires adventives (Y) (Gate, 1995).*

$Y=1.92X-5.6$
---------------

La pente de cette relation correspond au rythme d'émission des racines adventives primaires en fonction du stade foliaire de la plante. Cette pente vaut 1.92, ce qui équivaut à dire qu'une tige développe près de 2 racines adventives lors de l'émission d'une feuille supplémentaire après le stade 3 à 3,5 feuilles (Gate, 1995). Par ailleurs, la mort des talles entraîne inévitablement la mort des racines de ces talles (Gregory et al., 1978).

Lorsque la structure du sol n'est pas dégradée, entre le stade début tallage et le stade épi à 1 cm, la progression de l'enracinement dans le profil s'effectue rapidement à vitesse constante exprimée en degrés jour (base 0). Au stade épi à 1 cm, la profondeur d'enracinement peut atteindre 1 m voire plus si le sol le permet et correspond en semis précoces à plus ou moins 90% de la profondeur maximale observée lors de la floraison (Gate, 1995). Gregory et al. (1978, étude anglaise) rapportent des profondeurs d'enracinement de 2 mètres. Par ailleurs, différents taux de pénétration ont été rapportés, allant de 0.5 cm/jour pour un froment cultivé au Royaume-Uni à 2 cm/jour dans des serres Australiennes (Tennant, 1976, cité par Porter et al., 1986).

Des essais réalisés dans des sols limoneux dans le Bassin Parisien ont permis d'évaluer la cinétique d'enracinement au sein des horizons situés au-dessus et en-dessous de 30 cm (Paillard et al., 1992, cité par Gate, 1995) :

- Sous 35 cm, le front racinaire évolue à la vitesse constante de 16 cm par 100 degrés-jours (base 0) jusqu'à l'arrivée du front sur le loess.
- Entre 0 et 30 cm, 2 situations se distinguent : soit la zone est labourée et favorable à l'enracinement, ce qui permet des vitesses d'enracinement de 16 cm/100 degrés-jours, soit la couche de surface est compactée et la vitesse moyenne d'enracinement vaut alors 6 cm/100 degrés-jours. Cependant, bien que la compaction entre 0 et 30 cm ait pour conséquence de retarder momentanément la vitesse de descente du front racinaire, elle ne se traduit pas par des différences de profondeur finale d'enracinement.



Il y a une corrélation positive entre le nombre de racines et le nombre de talles (Hockett, 1986, cité par Manske et Vlek, 2002). Manske et Vlek (2002) présentent ainsi deux types de froment : d'une part les cultivars cultivés en agriculture intensive caractérisés par une dépendance aux racines séminales, un harvest index (Rendement en grain/Biomasse totale) élevé et un faible nombre de talles et, d'autre part, les froments cultivés en agriculture extensive caractérisés par un système racinaire plus large basé sur les racines secondaires.

d) Quantifications du système racinaire

Dans une étude comparant 8 modèles de croissance des cultures dans différents sites en Europe, Palosuo et al. (2011) ont observé une biomasse racinaire à Foulum (Danemark) de 2250 kg/ha à l'anthèse. Par ailleurs, Porter et al. (1986) ont simulé le développement racinaire du froment grâce au modèle WHTRoot et ont rapporté une matière sèche racinaire de 136,5 g/m<sup>2</sup>, correspondant à une longueur racinaire de 37,5 km/m<sup>2</sup>. Chirinda et al. (2014) rapportent des biomasses racinaires de 1200 kg de matière sèche/ha en bas de pente et de 900 kg de matière sèche en haut de pente au Danemark. Gregory et al. (1978) ont quant à eux rapporté un poids sec racinaire de 105 g/m<sup>2</sup> sur base d'une étude réalisée au Royaume-Uni.

Selon une étude comparative de 17 variétés de froments cultivées au Royaume-Uni, White et al. (2015) ont trouvé une longueur racinaire moyenne de 9,8 km/m<sup>2</sup> mais se situant entre 2,9 km/m<sup>2</sup> et 18,2 km/m<sup>2</sup>. Hoad et al. (2004) rapportent durant une étude réalisée au Royaume-Uni, des longueurs racinaires totales variant entre 7 et 28 km/m<sup>2</sup> et des RLD<sup>3</sup> (densités de racines selon leur longueur-Root Length Density) entre 3 et 6 cm/cm<sup>3</sup> dans la couche labourée et généralement inférieures à 1 cm/cm<sup>3</sup> sous 40 cm. Manske et Vlek (2002) quant à eux proposent un RLD variant selon le stade de développement de la plante, la profondeur du sol et des facteurs environnementaux, entre 2 et 10 cm/cm<sup>3</sup>. White et al. (2015) rapportent, selon une revue de la littérature, des RLD variant entre 5,6 et 10 cm/cm<sup>3</sup> dans les 20 premiers centimètres du sol et entre 0,4 et 1,5 cm/cm<sup>3</sup> dans l'horizon 80-100 cm du sol lors d'une mesure à l'anthèse.

e) Quantifications du système racinaire du froment d'hiver en relation avec le travail du sol

Huang et al. (2012, étude chinoise, rendement de l'ordre de 7 tonnes/ha) ont comparé le système racinaire de froment d'hiver cultivé selon 4 modalités de travail du sol différentes :

- le travail du sol conventionnel avec exportation des résidus de culture (CT)
- le no-tillage avec exportation des résidus de culture (NT)
- le no-tillage avec les chaumes laissés en place sans broyage (NTSS)
- le no-tillage avec un mulch de chaumes hachés (NTS)

Les systèmes NTSS et NTS ont permis d'augmenter la densité de poids sec racinaire moyenne par rapport au travail du sol conventionnel. Au stade premier nœud, la densité de poids racinaire en travail du sol conventionnel était significativement plus faible dans les 10 premiers cm, mais significativement plus élevée entre 10 et 20 cm de profondeur comparé aux systèmes NT, NTSS et NTS. Par exemple, en 2006-2007, 4 prélèvements ont été réalisés. Pour les horizons 0-10, 10-20 et 20-30 cm, respectivement, les densités racinaires suivantes ont été mesurées (g de racines/dm<sup>3</sup> de sol) (tableau 1).

---

<sup>3</sup> RLD = Root Length Density = densités de racines selon leur longueur = longueur racinaire présente dans une unité de volume de sol (Manschadi et al., 2013)

Tableau 1. Densités racinaires (en g de racines/dm<sup>3</sup> de sol) mesurées pour deux modalités de travail du sol, dans 3 horizons de sol et à 4 stades clés (Huang et al., 2012).

Stade	Travail du sol	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Premier nœud	CT	0.459	0.224	0.118
	NT	0.565	0.177	0.1
Epiaison	CT	0.574	0.226	0.127
	NT	0.774	0.197	0.121
Floraison	CT	0.587	0.240	0.130
	NT	0.807	0.212	0.129
Maturité	CT	0.522	0.157	0.108
	NT	0.641	0.177	0.114

Une étude réalisée par Plaza-Bonilla et al. (2013, étude espagnole, rendement de l'ordre de 8 tonnes/ha) a comparé 3 systèmes de travail du sol dans 3 zones présentant un rendement potentiel élevé, moyen ou faible à cause d'un déficit en eau différent. Dans la zone à haut rendement, les 3 travaux de sol étaient :

- le travail du sol conventionnel (sous-solage à 40 cm et passage au chisel avant le semis)
- le travail du sol réduit (passage au chisel)
- le no-tillage

Dans la partie supérieure du profil de la zone à haut rendement, à l'anthèse, 68.91 g de racines/m<sup>2</sup> en travail du sol conventionnel, 136.07 g de racines/m<sup>2</sup> en travail du sol réduit et 120.33 g de racines/m<sup>2</sup> en no-tillage ont été mesurés. Cependant, la tendance inverse a été observée pour l'horizon 30-60 avec respectivement 72.14 g/m<sup>2</sup>, 42.57 g/m<sup>2</sup> et 44.57 g/m<sup>2</sup> et en ce qui concerne l'horizon 60-90 avec respectivement 27.18 g/m<sup>2</sup>, 23.68 g/m<sup>2</sup> et 23.82 g/m<sup>2</sup>. Par ailleurs, un ratio tige : racines de 7.66 en travail du sol conventionnel, de 5.87 en travail du sol réduit et de 9.11 en no-tillage et un ratio grain : racines de 7.98 en travail du sol conventionnel, de 6.01 en travail du sol réduit et de 7.90 en no-tillage ont été calculés.

Qin et al. (2004, étude suisse) affirment que les informations concernant l'impact du travail du sol sur la croissance racinaire sont rares. La croissance racinaire de froment cultivé en système de travail du sol conventionnel ou en no-tillage est similaire en région tempérée (Ellis et Barnes, 1980, Dzienia et Wereszczaka, 1999, cités par Qin et al., 2004). Cependant, l'impact du travail du sol peut dépendre de la période entre la mise en place du no-tillage et les premières mesures (Pearson et al., 1991, cités par Qin et al., 2004). Qin et al. (2004) ont montré que la distribution verticale du RLD était influencée par les pratiques de travail du sol dans les parties supérieures du profil de sol (0-10 cm), avec des RLD supérieurs en no-tillage qu'en travail du sol conventionnel. La tendance inverse a cependant été observée pour la zone 10-30 cm.

## 2.2. Les facteurs influençant le développement racinaire du froment d'hiver

### a) Les facteurs liés à la plante

Des travaux comparant des génotypes de froment rapportent une variabilité significative des caractères racinaires (Hoad et al., 2004). Ainsi, le nombre de racines émis peut être plus ou moins

important en fonction de la variété, avec un même rythme de développement foliaire. Cette différence peut provenir à la fois de variations du nombre de racines séminales et de la vitesse d'émission de racines adventives (Gate, 1995).

Certains gènes du froment sont en interaction directe avec le système racinaire de la plante. Plusieurs études se sont penchées sur l'effet des gènes *Rht 1* et *Rht 2*, deux gènes de nanisme. Ces gènes ont un effet positif sur la taille du système racinaire du froment par une augmentation de celui-ci, ce qui est probablement dû au fait que les assimilés non utilisés pour développer le système caulino-foliaire sont détournés vers les racines pour développer un système racinaire plus étendu (Waines et Ehdai, 2007). Manske et Vlek (2002) ont quant à eux démontré un effet neutre des gènes *Rht1*, *Rht2* et *Rht3* sur la longueur totale du système racinaire et sur l'infection par les AMF.

De plus, des études réalisées par Waines et Ehdai (2007) ont permis de démontrer des différences de taille de systèmes racinaires entre les cultivars anciens présentant une biomasse racinaire plus élevée que des cultivars modernes sélectionnés par le CIMMYT dans des stations bien irriguées et fertilisées. Selon White et al. (2015), il se pourrait que les variétés modernes aient été sélectionnées par inadvertance pour avoir des systèmes racinaires moins développés qu'auparavant à cause du fait que les conditions dans lesquelles elles ont été sélectionnées ont imposé seulement de faibles stress hydriques ou nutritifs.

En outre, les génotypes possédant la translocation 1B/1R provenant du seigle présentent des racines plus fines et des RLD plus élevés (Manske et Vlek, 2002 ; Waines et Ehdai, 2007 ; Richards et al., 2010, Christopher et al., 2013).

Le gène *tin* engendre quant à lui, pour les génotypes le contenant, des individus avec un tallage plus modéré, ce qui se traduit également par un développement plus important du système racinaire. Cette propriété a d'ailleurs été exploitée pour la création d'un marqueur moléculaire du gène *tin* disponible aujourd'hui pour les programmes d'amélioration (Richards et al., 2010).

Oyanagi (1994) a montré des distributions verticales des racines différentes en fonction des cultivars. Ces dernières présentent une corrélation positive avec l'angle de croissance des racines séminales. Le lien entre la profondeur du système racinaire et l'angle de croissance des racines séminales réside dans le fait qu'une forte relation positive existe entre l'angle de croissance des racines adventives et celui des racines séminales (figure 2). Manschadi et al. (2008) ont montré que les génotypes de froment présentant un angle formé par les 2 premières racines séminales faible avaient plus de chance de développer un système racinaire profond et compact tandis que les génotypes présentant un angle élevé allaient probablement développer un système racinaire plus étendu. Christopher et al. (2013) proposent une héritabilité au sens large de 50% pour l'angle formé par les racines séminales et de 31% pour le nombre de racines séminales, ce qui semble suffisant pour mener une sélection sur base du phénotype. Ces deux caractères seraient contrôlés par de multiples loci de relativement faible effet, ce qui contredit le contrôle génétique par un seul gène dominant avancé par Oyanagi et al. (1991, cité par Christopher, 2013).

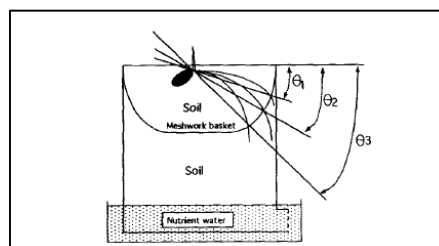


Figure 2. Angle formé entre l'horizontale et la ligne connectant le site de pénétration de la racine et le centre du pot (Oyanagi, 1994).

## b) Les facteurs liés aux conditions de croissance

- La température

L'élongation racinaire augmente avec la température jusqu'à atteindre un pic et décroît ensuite (Gregory, 2006, cité par Rich et Watt, 2013). Pour le froment, l'élongation des racines séminales augmente linéairement entre 5°C et 25°C (Abbas al-Ani et Hay, 1983, cités par Rich et Watt, 2013). Conformément à cela, Gate (1995) affirme qu'une température plus élevée au niveau du sol se traduira par une émission plus rapide des racines adventives. De plus, la densité de racines latérales sur les racines séminales du froment est plus importante à 30°C qu'à 10°C (Huang et al., 1991).

Comme déjà développé précédemment, le stade de développement du système racinaire adventif peut être calculé à partir du phyllochrone qui correspond à l'unité de temps entre 2 stades de croissance de feuilles successives. Ce phyllochrone dépend de la température de l'air. Pour le froment, chaque phyllochrone requiert 100 degrés jours (Rickman et al., 1984, cité par Manske et Vlek, 2002).

- L'eau

L'eau constitue le facteur le plus limitant pour la croissance de la plante. Un stress hydrique se traduit par « une déshydratation et une perte de turgescence cellulaire avec généralement pour conséquence une limitation de l'élongation racinaire » (Rich et Watt, 2013). En cas de déficit hydrique, une plante tolérante va allouer une partie de ses assimilés vers le système racinaire afin de s'étendre et d'explorer des zones plus profondes (Gregory, 2006, cité par Rich et Watt, 2013). Cependant, si le potentiel hydrique du sol devient trop faible, c'est-à-dire en deçà de -1.5MPa, la croissance racinaire peut s'arrêter (Rich et Watt, 2013). Certes, l'élongation racinaire peut être maintenue en période de stress hydrique et de nouvelles racines adventives peuvent être émises (Pardales et Kono, 1990, cités par Smith et De Smet, 2013), mais ces racines sont en général plus fines (Sharp et al., 1988, cité par Smith et De Smet, 2013) et les taux d'élongation et de ramification sont en général plus faibles qu'en conditions bien pourvues en eau (Salim et al., 1965 ; Stasovski et Peterson, 1991 ; cités par Smith et De Smet, 2013).

Des travaux sur les racines séminales du froment ont montré que le système racinaire pouvait se développer dans des conditions extrêmement sèches à condition qu'une autre partie du système racinaire soit pourvue en eau (Boyer et al., 2010, cité par Rich et Watt, 2013). Sur base de cela, les mêmes auteurs ont déduit que 50% de l'eau utilisée pour l'élongation des racines primaires venaient du phloème, les 50 autres pourcents venant du sol. L'exploitation de l'architecture racinaire pourrait permettre d'obtenir des plantes capables de puiser l'eau plus profondément et de pouvoir ainsi diminuer l'irrigation (Smith et De Smet, 2013).

De plus, il existe une combinaison entre la résistance mécanique et le stress hydrique. En effet, au champ, le contenu en eau du sol augmente après une chute de pluie et décroît ensuite grâce au drainage du sol par gravité et à l'évapotranspiration. Par conséquent, le potentiel matriciel et la résistance du sol fluctuent continuellement à un endroit donné, ce qui peut mener à un ralentissement de l'élongation racinaire à cause d'une combinaison de stress hydrique et de résistance mécanique en sol sec (Bengough et al., 2011).

- L'oxygène

L'engorgement des sols peut se traduire par une hypoxie, c'est-à-dire un niveau trop bas en oxygène ou par une anoxie, un manque total d'oxygène. Cet état est très défavorable pour les céréales en général et se traduit par l'inhibition de l'élongation des racines séminales et de l'initiation de racines latérales (Rich et Watt, 2013).

### c) Les facteurs liés à la nutrition des plantes

Une plasticité élevée du système racinaire peut procurer un sérieux avantage dans les zones où la distribution en nutriments est hétérogène dans le temps et dans l'espace (Rich et Watt, 2013).

Lors d'une étude sur le système racinaire du froment, Watt et al. (2008) n'ont pas observé de racines adventives en profondeur. Ces dernières ont sans doute été restreintes par une concentration faible en nutriments et en eau (Tennant, 1976, Gregory et al., 1978, cités par Watt et al., 2008), un faible gravitropisme positif, ou un temps insuffisant pour atteindre les couches profondes. Ainsi, les racines séminales sont précieuses pour les céréales puisque d'une part, elles constituent la partie la plus profonde du système racinaire et d'autre part, sont les premières à émerger, la survie de la jeune plantule dépendant d'elles.

L'azote et le phosphore sont 2 éléments qui limitent le plus fréquemment la croissance de la culture et le rendement (Manschadi et al., 2013).

- Le phosphore

Comparé aux autres éléments essentiels, le phosphore est le moins mobile et le moins disponible dans de nombreux sols. La réponse face à une déficience en phosphore est espèce-dépendante mais se traduit généralement par une augmentation du nombre de racines latérales et des poils absorbants (Rogers et Benfey, 2015). Trois voies peuvent être exploitées pour améliorer l'absorption de cet élément.

- Augmentation de la surface racinaire par le biais de caractéristiques architecturales, morphologiques et anatomiques. La densité de racines dans les couches supérieures du profil semble le trait le plus important associé à une meilleure acquisition d'éléments peu mobiles tels le phosphore (Manschadi et al., 2013). De plus, les géotypes avec des racines plus fines montrent une meilleure absorption du phosphore (Manske et al., 1996, cité par Manschadi et al., 2013). En conditions de déficience en cet élément, les racines présentent un grand nombre de longs poils absorbants (Föhse et al., 1991, cité par Manschadi et al., 2013).
- Exsudation de composés organiques et de protons. En effet, la disponibilité en phosphore peut être améliorée par une modification de la rhizosphère en jouant sur l'exsudation racinaire de composés tels les protons, des molécules organiques complexes et des phosphatases (Ortiz-Monasterio et al., 2002)
- Formation de symbioses avec des mycorhizes. Les mycorhizes arbusculaires-vésiculaires et arbusculaires<sup>4</sup> sont importantes pour l'absorption d'éléments peu mobiles. Les symbioses avec les AMF améliorent l'absorption de phosphore par unité de longueur racinaire, mais une augmentation des doses d'engrais réduit l'infection par ces mycorhizes (Manschadi et al., 2013).

- L'azote

Concernant l'azote, les connaissances des effets de la morphologie et de l'architecture racinaire sur l'absorption de l'élément sont moins étendues (Manschadi et al., 2013). Cependant, on observe que le système racinaire se développe davantage dans les zones dans lesquelles cet élément est présent en plus grandes quantités (Miller, 2005). La réponse générale des plantes à une déficience en

---

<sup>4</sup> Les mycorhizes consistent en une association entre un champignon et une racine. Le champignon colonise le cortex racinaire et forme de cette manière un réseau mycélien constitué d'arbuscules (haustoria ramifiés dans les cellules du cortex) et parfois de vésicules (structure de stockage formée par beaucoup de champignons). (Mycorrhizal Associations : The Web Resource, en ligne).

azote se traduit par des racines plus verticales et plus profondes, avec moins de racines à proximité de la surface du sol (Rogers et Benfey, 2015).

Cependant, des études réalisées en champ n'ont pas montré d'effet significatif d'un apport azoté sur la croissance du système racinaire (Wilhelm et al., 1982 ; Hoad et al., 2004).

Des études réalisées en champ suggèrent qu'il existe une variabilité génétique (Le Gouis et al. 2000). Pour l'absorption de l'azote du sol, les caractères racinaires importants semblent la vigueur racinaire, la profondeur d'enracinement, le RLD, et la longévité racinaire (spécialement pour une absorption post-anthèse) (Hirel et al., 2007 ; Foulkes et al., 2009 ; Garnett et al., 2009, Palta et Watt, 2009, cités par Manschadi et al., 2013). Puisque les engrais azotés sont appliqués communément dans les horizons supérieurs du sol, les génotypes de froment présentant une croissance racinaire importante dans ces horizons semblent présenter une plus grande efficacité d'absorption de l'azote appliqué (Manschadi et al., 2013).

Par ailleurs, les nitrates ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) sont des ions très mobiles qui peuvent être facilement lixiviés dans le profil. Ainsi, un nombre plus important de racines séminales aurait pour conséquence un nombre plus accru de ramifications et de RLD en profondeur, ce qui accroîtrait substantiellement la capacité du système racinaire à acquérir l'azote et l'eau des couches plus profondes. Par conséquent, les génotypes de froment manifestant un nombre élevé de racines séminales combiné avec un angle de croissance racinaire étroit seraient particulièrement intéressants dans les sols à risque élevé de lixiviation. Une variation génotypique de la distribution racinaire en profondeur a été rapportée par plusieurs auteurs (Manschadi et al., 2008 ; Christopher et al., 2013 ; Manschadi et al., 2013).

#### d) Les facteurs liés aux pratiques culturales

- La date de semis

Pour un cultivar donné à un endroit donné, la date de semis n'agit pas sur la vitesse d'enracinement mais se traduit par un effet retard par rapport au développement des parties aériennes. En semis tardifs, l'enracinement est moins profond au stade épi à un cm qu'en semis précoce. Cet écart s'annule ou se réduit au moment de la floraison (Gate, 1995). L'avancement de la date de semis a des répercussions importantes car elle permet une augmentation de la croissance racinaire en profondeur spécialement dans les sols présentant une mauvaise structure ou qui présenteraient une barrière à la pénétration racinaire (Hoad et al., 2004). En effet, la date de semis influence non seulement la durée de la période végétative, mais également la température moyenne dont va pouvoir profiter la culture en début de développement (Kirkegaard et Lilley, 2007).

- La densité de semis

Hoad et al. (2004) rapportent qu'une densité de semis plus faible peut augmenter le RLD et la proportion du système racinaire total sous la couche labourée. En effet, à plus haute densité de semis, les racines ont tendance à se concentrer dans le haut du profil. Ainsi, une densité de population plus faible pourrait augmenter la proportion du système racinaire en profondeur par une augmentation de la compétition intra-plante causée par une augmentation du tallage et donc du nombre de racines adventives initiées (Hoad et al., 2004).

- La structure du sol

Ce facteur est très important car il peut constituer d'une part un stress physique par une résistance à l'élongation racinaire et d'autre part, conditionne la disponibilité en nutriments, en eau et en oxygène (Bengough et al., 2006, cité par Smith et De Smet, 2012). La variation de résistance du sol

n'aurait pas d'influence sur la densité de racines latérales sur le froment (Bingham et Bengough, 2003, cité par Rich et Watt, 2013). Cependant, selon Watt et al. (2003), les sols compacts ont pour effet de réduire l'élongation des racines primaires du froment et donc d'accélérer la différenciation de racines latérales. Or, un système racinaire moins étendu aura pour conséquence une moindre capacité d'absorption d'eau et d'éléments nutritifs, ce qui se traduira par un moindre développement de la plante en sol compacté (Rich et Watt, 2013). Une mauvaise structure du sol peut également impacter la croissance racinaire, l'ancrage ou encore l'expansion des poils absorbants par une présence insuffisante de pores (Withmore et Whalley, 2009, cités par Smith et De Smet, 2013). Une compaction de la zone labourée peut stimuler la vitesse d'apparition de racines adventives tout en réduisant leur croissance en longueur. De plus, une quantité importante de cailloux peut modifier le développement de ces racines adventives (Gate, 1995).

- Le travail du sol

L'agriculture de conservation est de plus en plus utilisée mondialement. Elle est constituée de 3 piliers majeurs : un travail du sol réduit voire abandonné, une gestion des résidus de culture et la rotation des cultures (Van den Putte et al., 2010). Celle-ci est appliquée dans le but de protéger les sols de l'érosion et de la compaction, de conserver l'humidité du sol et de réduire les coûts de production (Holland, 2004, cité par Van den Putte et al., 2010).

Des études réalisées en Europe ont montré que les conditions de croissance racinaire pour les céréales étaient moins favorables en no-tillage qu'en travail du sol conventionnel. Un travail du sol profond semble donc plus favorable qu'un travail superficiel pour des plantes telles le maïs ou le froment (Van den Putte et al., 2010). Pour le maïs et, dans une moindre mesure, pour les céréales d'hiver, le rendement de la culture diminue significativement lors d'un travail du sol réduit. Une explication probable réside dans l'effet du no-tillage ou du travail réduit sur le développement du système racinaire. Pour le maïs, le labour conventionnel entraîne un nombre plus important de racines plus fines qu'en no-tillage, ce qui est probablement dû à une plus faible résistance du sol, une température plus élevée en début de croissance et une disponibilité en phosphore plus uniforme avec la profondeur (Qin et al., 2006, étude suisse, cité par Van den Putte et al., 2010). Pour les céréales d'hiver, aucun effet significatif sur le développement racinaire n'a été trouvé (Qin et al., 2004, étude suisse, cité par Van den Putte et al., 2010). En effet, Qin et al. (2004) ont mené une étude en Suisse et ont montré que les effets du no-tillage sur l'ensemble du système racinaire du froment d'hiver étaient similaires à ceux du travail du sol conventionnel. L'effet du travail du sol sur le RLD et le diamètre racinaire moyen a été observé principalement dans les couches 0-30 et 0-50 cm, respectivement. En général, le no-tillage résultait en un RLD plus élevé dans la partie supérieure du sol et à un RLD plus faible en profondeur en comparaison avec le travail du sol conventionnel. Une tendance similaire a été trouvée pour le diamètre racinaire moyen dans le rang même si celui-ci était peu affecté par l'intensité de travail du sol. Cependant, dans l'inter-rang, ce dernier paramètre était significativement plus élevé seulement dans la couche 0-10 cm en no-tillage qu'en labour.

Par ailleurs, l'arrêt du labour augmente la résistance mesurée à l'aide d'un pénétromètre et diminue la macroporosité. Dans les sols non labourés, certes, les racines peuvent profiter d'une plus grande réserve en eau et de macropores plus continus, mais ces effets positifs résultant d'une diminution du travail du sol ne peuvent compenser la résistance mécanique accrue, des macropores moins volumineux et la fourniture plus réduite en nutriments en début de saison (Pietola, 2004, étude finlandaise). De plus, à cause de l'albédo élevé des résidus de culture et de leur effet isolant, le no-till induit un réchauffement du sol moins rapide, plus spécialement en début de saison, ce qui a un impact direct sur la croissance racinaire en profondeur (Baker et al., 2007).

Clark et al. (2003, cité par Munoz-Romero, 2010) affirment que la partie supérieure du sol peut être plus dure en no-tillage tandis que le travail du sol conventionnel peut causer des compactations juste sous la couche labourée et mener à la formation d'une semelle de labour, ce qui peut affecter le développement du système racinaire. Concernant le no-till, Baker et al. (2007) affirment sur base d'une revue de la littérature que cette pratique culturale induit une plus grande résistance du sol, une densité apparente du sol plus élevée et une proportion plus faible d'agrégats inférieurs à 5 mm, trois facteurs pouvant altérer la croissance racinaire en profondeur.

Lors d'une étude du développement racinaire du froment d'hiver en Angleterre, Ellis et Barnes (1980) ont rapporté qu'il y avait davantage de racines en profondeur en semis direct qu'en terre labourée au printemps, après qu'un déficit en eau se soit fait ressentir le mois précédent. Cependant, après une période hivernale humide prolongée, dans un sol avec une grande fraction d'argile et une faible conductivité hydraulique, la croissance et la pénétration racinaire au printemps, avant le développement d'un déficit hydrique, étaient plus limitées en semis direct qu'en terre labourée.

Qin et al. (2004) et Van den Putte et al. (2010) ont réalisé une revue de la littérature sur les effets du no-tillage. Le tableau 2 synthétise les différents avantages et inconvénients de cette pratique.

Tableau 2. Tableau de synthèse sur les avantages et les inconvénients du No-tillage

Avantages du No-tillage	Inconvénients du No-tillage
Réduction du risque d'érosion du sol	Densité apparente du sol plus élevée et par conséquent, une plus grande résistance du sol
Réduction de la lixiviation des nitrates	Stratification des nutriments du sol, spécialement d'éléments mobiles tels le P, ce qui induit des RLD plus élevés dans les couches supérieures du sol
Réduction de la compaction du sous-sol	Conditions d'implantation moins homogènes (Moins bon contact sol-semence, moins bon drainage de l'eau excédentaire, etc.)
Meilleure structure du sol et un vaste système de macropores	Réduction des rendements des céréales d'hiver de l'ordre de 7% en Europe de l'Ouest

### 2.3. [Le phénotypage des systèmes racinaires](#)

La section précédente nous montre que le système racinaire du froment présente une variabilité génétique qui peut être à la base d'un processus d'amélioration. Cependant, le manque de moyens de phénotypage efficaces, abordables et rapides semble le facteur limitant dans la recherche et l'amélioration sur les systèmes racinaires (Manske et al., 2002 ; Nakhforoosh et al., 2014).

La littérature scientifique classe les différents types d'observation des systèmes racinaires selon différentes modalités telles le lieu d'observation (In Lab ou In Field), la dimension de l'observation (2D ou 3D) ou encore le caractère destructif de l'analyse. Les nouveaux outils d'étude des systèmes racinaires doivent être utilisables à haut débit, applicables dans des expérimentations à grande échelle et fournir des données quantitatives précises avec une résolution élevée (Wells et al., 2012).

L'objectif de cette partie est d'exposer les différentes techniques existant actuellement dans le domaine du phénotypage racinaire. La présentation se divisera en 2 parties distinctes : d'une part, les techniques d'analyse en conditions contrôlées et d'autre part, les techniques d'analyse en champ ; la complexité et le temps requis pour l'observation allant *crescendo* entre ces 2 milieux (Rich et Watt,



2013). Ainsi, Wasson et al. (2012) insistent sur l'importance de combiner ces deux méthodes. Cependant, nous nous concentrerons davantage sur les techniques de phénotypage en champ, leur importance dans la recherche agronomique et dans la sélection n'étant plus à démontrer.

### 2.3.1. Le phénotypage « in lab »

#### 2.3.1.1. Les milieux de culture utilisés en laboratoire

Différentes techniques de screening ont été adoptées en laboratoire ou en serre afin de sélectionner certains traits plus rapidement et de manière plus reproductible. Citons notamment l'aéroponie, l'hydroponie, la couche de cire, les systèmes de plaques de gélose ou de papier, la croissance en milieu de gel transparent ou encore les chambres de culture ou les tubes de PVC remplis de terre tels les mésocosmes (Gregory et al., 2009 ; Zhu et al., 2011 ; Prasanna et al., 2013).

Les rhizotrons sont des installations utilisant des parois transparentes pour étudier les racines dans le sol. Des rhizotrons de plain-pied ou des chambres de plus petite taille existent également. Ils peuvent alors être utilisés comme des lysimètres et peuvent contenir des capteurs qui enregistrent les conditions régnant dans le substrat. De plus, des mesures successives peuvent être réalisées facilement sur une racine précise ou sur une partie visible du système racinaire (Taylor et al, 1990). Cependant, ce type d'installation présente plusieurs désavantages, les frais d'installation et d'entretien étant les plus patents (Rewald et Ephrath, 2013).

#### 2.3.1.2. Les technologies d'imagerie

Les technologies d'imagerie incluent les techniques classiques telles le scanner à plat ou les caméras, encore largement utilisées et de nouvelles technologies telles l'imagerie par résonance magnétique et la tomographie à rayons X assistée par ordinateur. De nombreux logiciels ont été créés et ciblent chacun différents traits et différentes contraintes expérimentales (Lobet et al., 2011). Ces logiciels sont classifiés selon leur degré d'interaction avec l'utilisateur en manuel, semi-automatique ou pleinement automatique (Lobet et al., 2011). L'ULg et le FNRS ont développé une plateforme web regroupant l'ensemble des logiciels d'analyse d'image existant (<http://www.plant-image-analysis.org/>, 7 avril 2015) (Lobet et Draye, 2013 ; Lobet et al., 2013).

##### 2.3.1.2.1. Les technologies d'imagerie 2D

Par rapport aux techniques tridimensionnelles actuellement disponibles, les techniques bidimensionnelles offrent un grand champ d'observation ou une résolution supérieure à champ d'observation équivalent ainsi qu'une mise en œuvre simplifiée et un coût faible (Pierret et al., 2003).

Les systèmes utilisés en imagerie bidimensionnelles sont, notamment, l'absorption des rayons X ou encore la transmission de lumière 2D (Pierret et al., 2003 ; Guarrigues et al., 2006 ; de Dorlodot et al., 2007).

Par ailleurs, le système d'analyse d'image WinRHIZO est largement utilisé pour quantifier les caractères morphologiques des systèmes racinaires tels la longueur racinaire totale, le diamètre, la surface ou encore le volume racinaire. WinRHIZO comprend un programme informatique et un scanner sur lequel le système racinaire est étalé pour éviter les chevauchements (Fang et al., 2012). Ce

programme a, notamment, été utilisé par Costa et al. (2000) pour mesurer la longueur racinaire totale, le diamètre racinaire moyen et la surface racinaire de 3 géotypes de maïs cultivés en conteneur.

#### 2.3.1.2.2. Les technologies d'imagerie 3D

Ces techniques d'imagerie permettent de phénotyper les systèmes racinaires dans des milieux de croissance constitués de gel ou de sol (Zhu et al., 2011).

##### a) L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

La technologie IRM a été développée notamment dans le domaine médical. Cette technique exploite le phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN) pour représenter les protons de l'eau et fournit ainsi des informations structurales de manière non-destructive. La résolution spatiale de l'IRM peut s'élever à  $30 \mu\text{m}^3$  par voxel (pixel d'une image tridimensionnelle) (Jahnke et al., 2009).

Plusieurs limitations peuvent cependant restreindre l'utilisation de cette technologie. En effet, la présence d'éléments paramagnétiques tels le  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  ou le  $\text{Cu}^{2+}$  à des concentrations couramment présentes dans les sols peut causer des interférences, ce qui peut pousser à devoir cultiver la plante en milieu artificiel. De plus, la méthode est sensible à l'eau présente dans les échantillons. Par ailleurs, le temps requis pour mener les analyses est assez conséquent et peut s'élever à plusieurs heures. Enfin, du fait de son caractère non portatif, la méthode n'est applicable que sur des carottes de sol prises au champ ou sur des plantes cultivées en pots (Asseng et al., 2000).

Jahnke et al. (2009) ont combiné la technique IRM à la tomographie par émission de positons (PET) qui est une technologie permettant la détection de radionucléides émettant des positons tels le  $^{11}\text{C}$  et a la capacité de mesurer le transport et la distribution de photoassimilés marqués au  $^{11}\text{C}$ . Les auteurs ont utilisé la combinaison IRM-PET pour évaluer la croissance et l'allocation de carbone dans des systèmes racinaires complexes.

##### b) La tomographie à rayons X assistée par ordinateur (X-ray computed tomography ou CT)

Cette technologie permet d'observer l'architecture racinaire des plantes en 3 dimensions de manière non destructive et non invasive dans un substrat tel du sol. La CT utilise des rayons X pour acquérir des images de tranches en coupe transversale d'un objet. Ces coupes contiennent des informations concernant l'atténuation des rayons X, ceci étant fonction de la densité du matériel contenu dans l'échantillon. Ces tranches sont ensuite reconstruites et fournissent une visualisation tridimensionnelle du volume analysé. Actuellement, la résolution spatiale de ce type de scanners peut atteindre moins de 500 nm permettant la détection des poils absorbants (Tracy et al., 2010 ; Perret et al., 2007). Bien que largement utilisée en conditions contrôlées, cette méthode a été exploitée par Pierret et al. (1999) pour quantifier des systèmes racinaires d'arbres dans des carottes de sol.

Différents facteurs peuvent influencer la qualité de l'image tels la composition de l'échantillon (type de sol, espèce de plante), la condition de l'échantillon (niveau de compaction, humidité) ou les réglages de numérisation (énergie du rayon X, nombre d'images de projection) (Mairhofer et al., 2012).

La technologie présente cependant plusieurs désavantages. En effet, le coefficient d'atténuation d'un système racinaire est similaire à celui de la matière organique. Cette situation est d'autant plus problématique que le contenu en eau du substrat est élevé. Une solution pourrait être de sécher le milieu de culture, ce qui pourrait avoir des répercussions sur l'architecture racinaire et la structure du sol. Une autre solution pourrait être d'utiliser des substrats sableux contenant peu de matière organique, ce qui éloigne encore les mesures de conditions réelles. La solution la plus judicieuse semble résider dans l'utilisation de logiciels capables de repérer les pixels de racines dans des images bruyantes fournissant ainsi une image tridimensionnelle du système racinaire (Tracy et al., 2010). En outre, cette méthode peut s'avérer onéreuse lors de l'étude de systèmes racinaires plus conséquents.

Cependant, malgré son caractère non portatif similaire à l'IRM, le X-ray CT semble plus intéressant du fait de son insensibilité aux ions paramagnétiques (Tracy et al., 2010).

c) Le scanner laser

Cette technologie a été utilisée notamment par Fang et al. (2009) pour caractériser les changements d'architecture racinaire du riz et du soja croissant sous des concentrations différentes en phosphore. La combinaison du système de scanner laser et d'un milieu de culture solide à base de gel a permis de suivre *in situ* les images tridimensionnelles du système racinaire de manière dynamique sans perturbation de la plante ou de son milieu de culture (Fang et al., 2009).

d) La caméra digitale

Cette approche utilise également un milieu de croissance solide à base de gel mais, dans le cas présent, une caméra digitale est utilisée pour acquérir l'image (Iyer-Pascuzzi et al., 2010, cité par Zhu et al., 2011).

### 2.3.2. Le phénotypage « in field »

Bien que les systèmes de phénotypage de l'architecture racinaire en conditions contrôlées permettent d'augmenter le débit d'analyse et requièrent moins de ressources, elles ne permettent pas de caractériser précisément l'architecture racinaire en conditions naturelles. En effet, le nombre de facteurs biotiques et abiotiques intervenant au champ étant beaucoup plus élevé, les méthodes de screening à grande échelle des systèmes racinaires en conditions naturelles de croissance nécessitent davantage de développement. En conditions contrôlées, les paramètres environnementaux sont simulés, ce qui entraîne des conditions artificielles pour le système racinaire pouvant mener à des artefacts de croissance racinaire ou d'interaction racine-tige (Gregory et al., 2009 ; Trachsel et al., 2011 ; Zhu et al., 2011).

#### 2.3.2.1. L'extraction de systèmes racinaires

##### 2.3.2.1.1. Méthodes d'excavation d'un système racinaire entier

Cette méthode est sans doute la plus évidente puisqu'elle consiste en l'extraction pure et simple du système racinaire dans sa globalité. La plante dont on veut étudier le système racinaire est tout d'abord sélectionnée et une tranchée est creusée à 20 à 80 cm de la plante, pour les graminées. Cette fosse sera orientée au nord sous nos latitudes pour éviter l'impact du rayonnement direct. Ensuite, le sol sera petit à petit retiré du système en partant de la surface et en descendant vers les parties plus profondes.

Retirer les particules de sol requiert du matériel particulier. Pour les plantes avec un système racinaire fin comme les graminées, un fin piolet, des aiguilles affûtées et des brosses en poils de chameau seront utilisées. Il est également conseillé de légèrement humidifier la zone durant une nuit afin de faciliter le travail d'excavation (Böhm, 1979).

Concomitamment à la procédure d'excavation, des dessins, mesures et photographies seront pris. Les racines extraites peuvent alors être conservées en papier buvard pour le séchage puis collées sur un poster ou un carton. Cette méthode est la plus économique pour conserver les systèmes racinaires extraits. 2 autres méthodes existent : la conservation en alcool ou d'autres liquides organiques, ce qui conserve la couleur et empêche la racine de devenir sèche et cassante, ou la

pulvérisation sur les racines d'un produit synthétique translucide, technique qui n'a pas toujours été très fructueuse (Böhm, 1979).

Le désavantage majeur de cette technique est sans conteste le temps et la main d'œuvre requis pour extraire le système racinaire d'une plante. Ces facteurs peuvent rester acceptables lors de l'étude de plantes annuelles ou de jeunes arbres mais peut s'avérer être un réel frein lors de l'étude des racines d'arbres matures (Böhm, 1979).

Plusieurs variantes de la méthode d'excavation ont été utilisées afin de faciliter le travail. Tout d'abord, un jet d'eau sous pression peut permettre de débarrasser le système racinaire des particules de sol. Une autre variante est l'utilisation de l'air pour enlever la terre, soit par pression, soit par aspiration. Une dernière possibilité consiste à retirer le système racinaire dans un plan horizontal, sans creuser de fosse au départ. Cependant, cette technique a souvent été utilisée en combinaison avec la technique d'excavation en plan horizontal développée plus bas (Böhm, 1979).

#### 2.3.2.1.2. Méthode du monolithe

Cette méthode requiert l'extraction de monolithes de sol et la séparation de la terre et des racines ultérieurement par lavage. Ces méthodes sont principalement utilisées dans la quantification racinaire par les chercheurs en agronomie. Plusieurs méthodes existent (Böhm, 1979).

##### a) La méthode simple à la bêche

Cette méthode est utilisée dans le but d'obtenir une information sur les racines présentes dans les horizons supérieurs du sol. Ceci est réalisé en extrayant des monolithes de 20 cm en carré à l'aide d'une bêche (Görbing, 1948, cité par Böhm, 1979). Les blocs de sol sont alors secoués doucement en employant les parties supérieures de la plante et, ainsi, la partie exposée du système racinaire peut être évaluée. Cette technique a notamment été utilisée dans plusieurs études relatives aux céréales (Böhm, 1979).

##### b) La méthode commune du monolithe

2 formes de monolithes peuvent être rencontrées : carrés ou ronds.

Dans le cas d'un monolithe carré, une fosse de 1 m de large est creusée jusqu'à la profondeur d'enracinement maximale (Annexe 1). Des monolithes sont alors retirés de la paroi couche par couche. En général, leur volume oscille entre 1000 et 5000 cm<sup>3</sup>. Les échantillons de sol sont alors placés dans des seaux et les racines séparées par lavage.

Si seules les racines de l'horizon supérieur du sol sont étudiées, un monolithe dit « indépendant » peut être réalisé en isolant un volume de profondeur souhaitée (Annexe 2). Ensuite, le monolithe est coupé à la base et envoyé au lavage. Une autre possibilité consiste à utiliser une boîte en métal à 3 côtés de 5x5 cm à 30x30 cm et d'une longueur de 10 à 50 cm enfouie dans le sol à l'aide d'une masse pour en retirer ensuite le monolithe (Böhm, 1979).

Des cylindres en métal de 40 cm de diamètre et de 100 cm de longueur ont été utilisés dans le but d'échantillonner des monolithes cylindriques. Cette technique a peu à peu été remplacée par la méthode de la tarière (Böhm, 1979).

##### c) La méthode de la boîte

Cette technique consiste à préparer de grands monolithes de sol insérés dans une boîte dans laquelle le système racinaire est lavé (Annexe 3). Contrairement au système précédent, le monolithe n'est ici pas découpé en sections. Ainsi, le système racinaire complet ou les parties principales du système d'une ou de plusieurs plantes sont décrits. Cependant, l'utilisation de cette technique demande beaucoup de temps et de main d'œuvre et n'est donc économiquement soutenable que pour des plantes jeunes pour lesquelles le monolithe peut être retiré à la main, sans avoir recourt à un quelconque équipement mécanique (Böhm, 1979).

#### d) La méthode de la planche à aiguilles

Cette méthode a la particularité de combiner à la fois une présentation picturale et une description quantitative du système racinaire de la plante (Annexe 4). Par cette technique, une partie représentative du système racinaire est extraite à l'aide d'un panneau en bois sur lequel sont placés des clous ou des aiguilles. Ces derniers permettent l'extraction des racines maintenues dans leur position originelle. L'ensemble est ensuite mis à tremper et est lavé. Pour des monolithes de petite taille, un panneau de 50x50 cm avec des aiguilles de 5 cm est généralement utilisé tandis que pour des échantillons de plus grande taille, un panneau de 60x100 cm avec des aiguilles de 20 cm peut être employé (Böhm, 1979).

Une fosse de 1m de long et de large est alors creusée et la paroi est lissée pour obtenir un plan parfaitement vertical. Ensuite, la planche à aiguilles est introduite à l'aide d'une masse contre la paroi puis le monolithe est retiré et lavé pour en retirer le sol (Böhm, 1979).

#### 2.3.2.1.3. Echantillonnage à la tarière

Cette méthode permet d'échantillonner des volumes de sol contenant le système racinaire. Ceci peut être réalisé de manière manuelle ou mécanique.



Figure 3. Tarière manuelle (Böhm, 1979).

Les tarières manuelles les plus utilisées sont celles décrites par Schuurman et Goedewaagen (1971, cité par Oliveira et al., 2000) (figure 3). Celle-ci est constituée d'un cylindre long de 15 cm et d'un diamètre interne de 7 cm le plus fréquemment en inox ou en Plexiglas. Le manche est terminé par une poignée en T pour faciliter la rotation et la pénétration lors de l'introduction ou du retrait de l'ustensile dans le sol. De nombreux auteurs ont modifié ce système soit en changeant le diamètre d'échantillonnage soit en utilisant une masse pour introduire le tube dans le sol (Oliveira et al., 2000).

Lorsque des échantillons doivent être prélevés plus profondément, c'est-à-dire en deçà d'un mètre, le recours à des techniques mécaniques peut s'avérer nécessaire. Le plus simple est alors d'introduire la tarière dans le sol à l'aide d'un marteau pilon mécanique et de le retirer à l'aide d'un vérin à vis (Böhm, 1979). Une autre technique consiste à utiliser des échantillonneurs de carottes de sol attelés à un tracteur capable d'insérer et de retirer le tube grâce à la force hydraulique. Enfin, des machines utilisées en ingénierie agricole dans le domaine du drainage ou de la cartographie pédologique peuvent également être utilisées (Oliveira et al., 2000).

Le diamètre du tube est un facteur crucial lors de l'échantillonnage. Lorsque ce diamètre diminue, le nombre d'échantillons prélevés doit alors être augmenté (Oliveira et al., 2000). Ainsi, Schuurman et Goedewaagen (1971, cité par Böhm, 1979) préconisent un diamètre de 7 cm pour les tarières manuelles. Böhm (1979) affirme qu'avec les méthodes mécaniques, un diamètre de 10 cm est rarement dépassé.

Concernant le nombre d'échantillons à prélever, Böhm (1979) préconise un nombre minimum de 5 prélèvements par site, ce nombre devant être augmenté lorsque la densité racinaire est faible. Selon Oliveira et al. (2000), le nombre de répliques varie selon les études entre 3 et 10. Il n'est ainsi pas rare de rencontrer des coefficients de variation de 100% (Van Noordwijk et al., 1985, cité par

Oliveira et al., 2000). Dans le but de diminuer le nombre d'échantillons à traiter, Schroth et Kolbe (1994, cités par Oliveira, 2000) proposent une méthode de combinaison et d'homogénéisation des échantillons d'une parcelle permettant une augmentation du nombre de prélèvements et/ou une diminution du temps de traitement.

Par ailleurs, les cultures en rang peuvent également poser des problèmes dans l'échantillonnage. Schuurman et Goedewaagen (1971, cités par Böhm, 1979) proposent alors d'effectuer 24 prélèvements par parcelles, la moitié dans la ligne, l'autre moitié dans l'interligne. Cependant, un tel nombre de prélèvements s'avère fastidieux à réaliser en conditions pratiques.

La profondeur d'échantillonnage s'élèvera au minimum à 30 cm ou à la profondeur de la semelle de labour, la majorité des racines étant concentrée dans cette zone. Si des horizons différents sont présents dans l'échantillon, celui-ci sera divisé selon les différentes couches de sol. Une taille de carotte de 10 cm est la plus couramment rencontrée (Oliveira et al., 2000).

#### 2.3.2.1.4. Ingrowth cores

Cette technique consiste à présenter un sol dépourvu de racines à un système racinaire en croissance durant une période de temps déterminée afin de quantifier la croissance de ce système racinaire et la production de racines fines (Steen 1984, 1991 ; Hansson et al., 1991, cités par Oliveira et al., 2000 ; Majdi, 1996). Cette méthode peut néanmoins introduire des biais à cause du fait que le sol n'est pas identique aux conditions initiales non perturbées. Le principe de cette méthode est assez simple et consiste à retirer un volume de sol. Le même volume est alors remplacé par du sol dépourvu de racines entouré par un filet (« mesh bag method »). Après une période de temps déterminée par l'expérimentateur, le système racinaire au sein de ce filet est quantifié. Ainsi, en faisant varier la concentration en nutriments dans le sol étudié, l'effet d'un élément ou de la combinaison de plusieurs éléments sur la croissance racinaire au niveau du microsite peuvent être étudiés (Majdi, 1996).

#### 2.3.2.1.5. Une méthode particulière de quantification : la « core-break method »

La phase de prélèvement racinaire au champ ne constitue pas l'étape la plus demandeuse en temps et en main d'œuvre par rapport aux phases de lavage et de mesure des paramètres racinaires. Cependant, l'étape de nettoyage peut être évitée grâce à la core-break method qui consiste à casser horizontalement en 2 parties approximativement égales la carotte issue du forage et à compter les racines au niveau des faces cassées. Chaque racine est comptée, indépendamment de son ordre (primaire, secondaire ou ordre plus élevé) (Böhm, 1979 ; Oliveira et al., 2000).

Lorsque le nombre de racines devient plus élevé, le comptage s'avère plus compliqué et le nombre de racines est alors plutôt estimé. *A contrario*, lorsque la densité racinaire est plus faible, les faces brisées seront comparées à des figures standard consistant en un ensemble de cercles du même diamètre que celui de la carotte et contenant un nombre croissant de points blancs sur un fond noir (Schuurman et Knot, 1957 ; Schuurman et Goedewaagen, 1971, cités par Böhm, 1979).

Cette méthode semble particulièrement indiquée pour l'étude quantitative de plantes à système racinaire plus fin telles les graminées. Une description morphologique n'est en effet pas possible avec ce type de méthode. Certes, la variabilité observée avec ce type de quantification peut s'avérer élevée, avec un coefficient de variation pouvant avoisiner 50-100%. Ce chiffre s'avère plus élevé que lorsque les racines sont extraites à la tarière et lavées mais ce problème peut être compensé par la facilité et la rapidité de la technique permettant d'augmenter le nombre d'échantillons prélevés par parcelle (Oliveira et al., 2000). Plusieurs sources d'erreurs sont cependant inhérentes à la méthode : l'effet d'orientation préférentielle des racines, une variation aléatoire du nombre de racines interceptant le plan d'observation et des erreurs de comptage (Bland, 1989, 1991, cité par Van Noordwijk et al., 2000).

#### 2.3.2.1.6. La méthode du profil (Trench profile method)

Cette méthode requiert le creusement d'une tranchée aléatoirement en prairie, mais transversalement aux lignes en culture en rang. Cette fosse aura une largeur d'un m, une longueur de 1,20-1,50 m et une profondeur minimale de 1 m, ces mesures variant avec le stade de développement du système racinaire étudié. La paroi verticale obtenue est ensuite lissée à l'aide d'une lame spéciale. L'étape suivante consiste à retirer 3 à 5 mm de sol du profil pour exposer les racines, exposition réalisée via une combinaison de pulvérisation d'eau et de raclage (Böhm, 1979).

Les racines sont ensuite comptées et les caractéristiques du profil enregistrées. Le nombre d'intersections racinaires peut être compté soit en utilisant une grille d'échantillonnage soit en cartographiant la position des racines sur une couverture en polythène (plastic), cette dernière méthode offrant plus de flexibilité dans l'analyse ultérieure des données. Le rayonnement solaire direct sera évité afin de ne pas assécher les racines et de faciliter le comptage. Ainsi, un écran peut être utilisé pour ombrager le lieu d'observation et fournir une lumière diffuse (Van Noordwijk et al., 2000).

#### 2.3.2.1.7. Les procédures de lavage des échantillons

Lorsque l'échantillon a été prélevé, celui-ci doit être lavé afin de le débarrasser des particules de sol qui entourent les racines. La méthode la plus couramment utilisée est le lavage à l'eau, manuel ou mécanique. Des agents chimiques peuvent être utilisés préalablement lors du trempage des racines dans l'eau, surtout lorsque le sol est très argileux. Le tableau 3 synthétise différentes techniques décrites dans la littérature et revues par Oliveira et al. (2000).

Tableau 3. Agents chimiques utilisés lors du trempage des racines dans l'eau (Oliveira et al., 2000).

Agent chimique	Référence	Concentration
$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$	Schuurman et Goedewaagen (1971)	0.27%
$\text{Na}_3\text{PO}_4$	Cassel et al. (1995)	0.2 M
$(\text{NaPO}_3)_6$	Van Noordwijk (1993)	5%
NaCl	Tardieu et Manichon (1986)	Solution saturée
HCl	Böhm (1979)	3-5%
$(\text{COOH})_2$	Heringa et al. (1980)	10 g/l
$\text{CH}_3\text{COOH}$	Mitchell et al. (1993)	0.25-2.5 M
$\text{NaHCO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$	Pallant et al. (1993)	/
Détergents	Kücke et al. (1995)	/

Tableau 4. Couleur et caractéristiques morphologiques utilisées pour séparer les racines de la culture de céréales étudiée des racines des cultures précédentes et des adventices, dans des échantillons lavés et observés à faible grossissement (x2 à x10) (Watt et al., 2008).

<b>Caractéristique</b>	<b>Racines de la culture en place</b>	<b>Anciennes racines et racines d'adventices</b>
Couleur	Plus pâles et plus blanches	Plus foncées
Forme	Déformations le long des racines, avec des bords arrondis	Forme de bâtonnet ; des racines latérales émergent des racines parents à angle droit
Poils absorbants	Présents et visibles à faible grossissement	Pas de poils absorbants apparents ; difficiles à voir à faible grossissement
Ratio [diamètre de stèle : diamètre de cortex]	Bas ; la stèle et le cortex sont visibles, avec la stèle plus opaque que le cortex	Elevé ; stèle presque entièrement opaque avec peu de cortex
Diamètre et longueur	Tendance à être plus épaisses et plus longues que les autres racines	Tendance à être plus fines et plus courtes que les racines de la culture, mais pas toujours



a) Le lavage manuel

Ce procédé consiste à détacher le sol des racines grâce à un jet d'eau et à retirer manuellement la terre. Cette technique est la plus simple et la plus économique. Les racines sont récupérées sur un tamis ayant une taille de maille fonction de la taille des racines (entre 0.2 et 2 mm<sup>2</sup>) (Böhm, 1979).

b) Le lavage mécanique

Le premier appareil commercialement disponible était un système d'élutriation hydropneumatique (The Gillison root washer) développé par Smucker et al. (1982, cité par Oliveira et al., 2000). Ce système était constitué d'un vortex d'eau à haute énergie cinétique généré dans une chambre dans laquelle les résidus de culture et les racines étaient séparés du sol. Les racines et le matériel associé passaient ensuite sur des écrans de séparation à basse énergie cinétique submergés dans de l'eau. Ainsi, la séparation mécanique des racines est réalisée par un système fermé basé sur la pression de l'eau et de l'air comprimé pour isoler et déposer les racines sur un tamis submergé. Actuellement, un autre système développé par CSIRO Cuninghnam Laboratory est disponible sur le marché : le Delta-T root washer (Oliveira et al., 2000).

Le principal avantage de cette technique réside dans la standardisation du procédé. De plus, la main-d'œuvre est considérablement réduite via ce système (Oliveira et al., 2000).

c) Trier les racines vivantes et mortes et les résidus de culture

Le tri des débris se fait souvent manuellement ou par flottation en répétant les processus de décantation. Dowdy et al. (1995, cité par Oliveira et al., 2000) ont développé un système de discrimination des racines vivantes des débris s'appuyant sur des techniques d'imagerie considérant que le ratio longueur : largeur des racines diffère significativement des débris organiques (Oliveira et al., 2000).

Les racines vivantes peuvent être différenciées des racines mortes sur base de plusieurs critères, le principal étant la couleur, la forme, les poils absorbants, le ratio diamètre stèle : diamètre cortex et enfin, le diamètre et la longueur (Watt et al., 2008). Le tableau 4 est une traduction d'une synthèse réalisée par Watt et al. (2008).

d) Les erreurs liées au lavage

Le lavage, bien que nécessaire, peut entraîner un certain nombre d'erreurs tels, entre autres, la perte des fines racines, la perte de matière sèche, les changements de composition chimique des racines, une séparation incomplète des racines, des débris et du sol, une distinction plus compliquée des racines mortes et vivantes et des différences entre opérateurs (Oliveira et al., 2010).

#### 2.3.2.1.8. Le stockage des racines

Ce stockage peut devoir être réalisé avant lavage pour des raisons logistiques ou après lavage pour la conservation du matériel dans le temps (Oliveira et al., 2000).

a) Stockage avant lavage

En théorie, les échantillons devraient être lavés directement après leur prélèvement afin de minimiser les phénomènes de respiration et de dégradation microbienne. Si cela n'est pas possible, ils seront alors stockés temporairement (durée inférieure à 2-3jours) au froid pour ralentir le processus de dégradation. Deux autres possibilités, pour un stockage de longue durée avant lavage, sont le séchage à 60-75°C ou la congélation (Oliveira et al., 2000).

b) Stockage après lavage

Plusieurs stratégies de stockage après lavage sont envisageables (Oliveira et al., 2000).

La première consiste à conserver les racines humides ou en suspension dans l'eau dans un réfrigérateur pendant 48 heures. Si la période de stockage s'avère plus longue, un conservateur chimique sera alors ajouté dans la suspension.

Par ailleurs, la congélation à -20°C est une option de stockage à long terme. Les échantillons sont alors stockés dans des sachets ou des boîtes en plastique avec un fond d'eau pour éviter les dommages lors du refroidissement.

Le séchage est une autre solution envisageable pour un stockage à long terme. Les échantillons seront séchés à 60-75°C pour éviter la pulvérisation qui peut arriver lorsque l'on chauffe à 100°C.

Enfin, des agents chimiques peuvent être utilisés pour une conservation à long terme. Citons notamment le formol et l'alcool fréquemment utilisés.

2.3.2.1.9. La quantification racinaire

De nombreux paramètres peuvent être estimés à partir des échantillons réalisés selon les méthodes décrites précédemment :

a) La masse racinaire

Cette masse est estimée sur base de racines fraîches, ou, plus fréquemment, sur base de racines séchées. La matière sèche racinaire est une mesure pratique de l'investissement de la plante dans son système racinaire et de la contribution des racines à l'humus du sol, particulièrement quand ceci est relié à la biomasse de la tige (Oliveira et al., 2000).

b) La longueur racinaire

Ce paramètre peut être mesuré de 2 manières : soit manuellement, soit via des logiciels d'analyse d'images. Ce deuxième système sera développé dans une partie ultérieure.

Les méthodes manuelles se font par mesure directe, par la méthode d'intersection de ligne ou par la méthode d'estimation visuelle. La mesure directe est utilisée surtout dans la quantification de la longueur racinaire d'arbres et est rarement réalisée sur des plantes herbacées. La méthode d'intersection de ligne a été proposée par Newman (1966, cité par Oliveira et al., 2000) (figure 4). Cette méthode est basée sur la relation existant entre la longueur racinaire et le nombre d'interceptions entre les racines étalées sur une surface d'aire définie, et des lignes placées aléatoirement dans cette zone et de longueur connue. La relation entre la longueur racinaire et le nombre d'interceptions est la suivante :

*Équation 2. Relation entre la longueur racinaire et le nombre d'interceptions du quadrillage (Newman, 1966, cité par Oliveira et al., 2000).*

$$\text{Root length (cm)} = \frac{\pi}{4} * \text{Nombre d'interceptions} * \text{unité de grille (cm)}$$

Enfin, la méthode d'estimation visuelle peut également être utilisée. Celle-ci consiste à attribuer une cotation subjective, par exemple, de 1 à 9 en fonction d'une longueur racinaire faible ou élevée. Cette méthode présente cependant une faible précision (Oliveira et al., 2000).

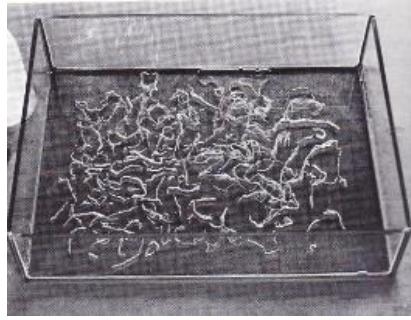


Figure 4. Mesure de la longueur racinaire au moyen de la méthode d'intersection de ligne (Böhm, 1979).

#### c) Le diamètre et la surface racinaires

Le diamètre racinaire peut être mesuré sur des échantillons étalés sur une grille, en utilisant un binoculaire pourvu d'un micromètre oculaire. La surface racinaire totale a été estimée à partir d'autres paramètres racinaires tels le diamètre et la longueur, par des mesures d'adsorption de solution ou encore en utilisant des appareils photoélectriques (Böhm, 1979). Actuellement, les systèmes d'analyse d'image permettent la détermination de la longueur racinaire, de la surface ou du diamètre avec plus de précision et en moins de temps (Oliveira et al., 2000).

#### 2.3.2.1.10. L'analyse d'images au service de la quantification racinaire

Par rapport aux méthodes traditionnelles de mesure, l'analyse d'image est plus rapide, plus précise et moins sujette à erreur humaine. Il est de plus possible grâce à ces logiciels de mesurer des paramètres de morphologie racinaire autres que la longueur totale (Richner et al., 2000).

Tout d'abord, les résidus de cultures doivent être retirés de la zone à analyser. Ceci est d'autant plus important que le système ne sait pas discriminer les résidus des racines. Ceux-ci pourraient alors mener à une surestimation des paramètres racinaires (Richner et al., 2000).

Pour augmenter le contraste des racines, des colorants peuvent éventuellement être utilisés (Richner et al., 2000).

Les racines sont ensuite étalées sur la surface d'enregistrement de manière à éviter au maximum le recouvrement. En effet, la superposition des racines peut causer une sous-estimation de paramètres tels la longueur racinaire ou une surestimation du diamètre ou des ramifications.

L'acquisition de l'image peut être réalisée soit via une caméra soit via un scanner. Citons notamment les caméras CCD (charged coupled device) qui sont largement utilisées (Fang et al., 2012).

Après acquisition, l'image doit subir une étape de « segmentation » qui permet de discriminer les racines du background. Cette étape est un préalable nécessaire avant l'évaluation des paramètres morphologiques (Richner et al., 2000).

Les principaux paramètres morphologiques pouvant être mesurés sont : la longueur racinaire, la surface racinaire projetée, le diamètre racinaire moyen, des paramètres de ramifications, des paramètres d'architecture racinaire et la géométrie fractale<sup>5</sup> (Richner et al., 2000 ; Oliveira et al., 2000).

---

<sup>5</sup> La géométrie fractale est une méthode quantitative de description d'objets naturels complexes avec des dimensions non entières (Mandelbrot, 1983, cité par Manschadi et al., 2013)

### 2.3.2.1.11. Présentation d'études ayant exploité ces méthodes

Wasson et al. (2014) ont utilisé la core-break method jusqu'à 2 m de profondeur pour identifier des variations dans la profondeur d'enracinement du froment de printemps afin d'accélérer la sélection de génotypes tolérants à la sécheresse dans les programmes d'amélioration.

Par ailleurs, Watt et al. (2013) ont échantillonné des carottes de sol afin de voir si une corrélation existait entre les caractères d'enracinement de la jeune plantule de froment et le système racinaire de la plante à maturité.

Enfin, White et Kirkegaard (2010) ont analysé l'abondance de racines de froment dans le sous-sol afin d'en déduire les implications sur l'absorption hydrique par un échantillonnage de carottes de terre et une analyse microscopique au laboratoire.

### 2.3.2.2. La Shovelomics

#### a) Description de la méthode

Trachsel et al. (2011) ont mis au point une nouvelle méthode de phénotypage haut débit de l'architecture racinaire du maïs en champ. Les racines sont excavées à l'aide d'une pelle sous la forme d'un cylindre de 40 cm de diamètre et de 25 cm de profondeur, la base de la plante se situant au centre du cylindre. Les racines excavées sont alors secouées afin de retirer une partie du sol adhérent aux racines. La plupart de la terre restante est retirée en trempant le système racinaire dans un détergent léger à une concentration de 0.5 %. Une troisième étape de lavage consiste à enlever les particules de sol restantes à l'aide d'un rinçage à l'eau à faible pression (Trachsel et al., 2011).

10 traits relatifs à l'architecture racinaire sont ensuite évalués visuellement sur les racines lavées (figure 5) :

- Nombre de verticilles au-dessus de la surface du sol occupés par des racines d'ancrage (BW)
- Nombre de racines d'ancrage (BO)
- Angle par rapport à l'horizontale de l'axe de premier rang (c'est-à-dire la partie basale de la racine d'ancrage croissant dans une trajectoire initiale) et de l'axe de deuxième rang (seconde partie de la racine d'ancrage croissant de manière inclinée par rapport à la trajectoire de l'axe de premier rang) des racines d'ancrage ayant pour origine le premier et second verticille (BA1a, BA1b, BA2a, BA2b)
- Les ramifications des racines d'ancrage (BB)
- Le nombre, l'angle et les ramifications des racines nodales souterraines (CN, CA, CB)

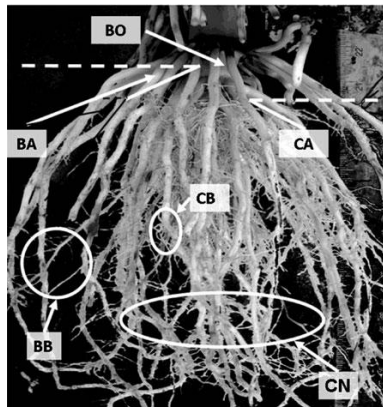


Figure 5. Traits mesurés lors de l'analyse visuelle du système racinaire (Trachsel et al., 2011).

Un nombre entre 1 et 9 est alors attribué pour chaque caractère. La valeur un indique un angle caractéristique de racines étendues ( $10^\circ$ ), peu de racines et un faible niveau de ramification tandis que la valeur 9 représente un angle racinaire profond ( $90^\circ$ ), beaucoup de racines et un niveau de ramification élevé (Trachsel et al., 2011).

En fonction du type de sol où les plantes sont cultivées, l'excavation et le lavage requièrent de 3 minutes (sol sableux) à 8 minutes (sol argileux). Par après, la prise de mesures visuelle demande 2 minutes, quel que soit le type de sol. (Trachsel et al., 2011).

Une reproductibilité élevée entre différents environnements, années et opérateurs indique que la méthode peut être utilisée sous des conditions environnementales différentes sans devoir y apporter de modifications. De plus, les résultats obtenus pourraient être comparés entre années et entre différentes parcelles de culture (Trachsel et al., 2011).

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir être réalisée à haut débit à un coût raisonnable et son apprentissage est assez aisé. Cependant, pour l'évaluation de céréales telles le froment, il serait nécessaire d'étudier la manière dont le tallage du plant mère sera pris en compte. Les plantes dicotylédones présentent quant à elles une architecture racinaire tout à fait différente qu'il convient de prendre en compte. Un système de scoring a notamment été utilisé sur le haricot (Trachsel et al., 2011).

Les principaux désavantages de cette méthode sont sa demande en main-d'œuvre, en superficie cultivée et en temps d'occupation de la parcelle. Cependant, ces points négatifs sont contrebalancés par l'avantage de pouvoir mesurer les paramètres d'architecture racinaire directement reliés aux performances de la culture au champ (Trachsel et al., 2011).

#### b) Les logiciels d'analyse d'images appliqués à la Shovelomics

Le logiciel DIRT (Digital Imaging of Root Traits) a été développé dans le but de mesurer 13 paramètres racinaires supplémentaires de dicotylédones et de monocotylédones inaccessibles par estimation manuelle (Bucksch et al., 2014). Cependant, bien que DIRT soit capable de gérer un grand nombre de qualité d'images, des progrès en matière d'acquisition photographique et de préparation de l'échantillon pourraient encore être réalisés. Par exemple, la shovelomics manuelle et le logiciel DIRT ne phénotypent que les racines externes et ne prennent pas en compte les racines internes, plus jeunes (Colombi et al., 2015).

Pour remédier à ces problèmes et améliorer la technique, le système REST (Root Estimator for Shovelomics Traits) a été créé et fournit une description des caractéristiques de base du système racinaire du maïs à partir d'images standardisées. Pour obtenir des informations sur la forme externe et la complexité interne des systèmes racinaires, ceux-ci sont coupés longitudinalement et photographiés avec un appareil photographique de 10 mégapixels dans une tente conçue à cet effet, avec une illumination contrôlée. Les images résultantes sont ensuite traitées avec le logiciel REST. Ce logiciel permet de phénotyper un système racinaire en 46 secondes : 40 secondes pour la prise d'image et 6 secondes d'analyse avec REST (Colombi et al., 2015).

#### c) Etudes réalisées

La méthode shovelomics a notamment été utilisée par Trachsel et al. (2013) dans une étude visant à caractériser l'influence de différentes concentrations en azote dans le sol sur l'architecture racinaire du maïs.

### 2.3.2.3. Les minirhizotrons

#### a) Description de la technique

Bates proposa en 1937 (cité par Rewald et Ephrath, 2013) une nouvelle technique non destructive d'observation des systèmes racinaires. Le principe est assez simple : un tube transparent en plastique ou en verre est installé dans le sol sous la plante. Ainsi, grâce à une caméra placée dans le tube, des images des racines poussant le long ou autour du tube peuvent être acquises et le développement racinaire observé (Taylor et al., 1990 ;Zhu et al., 2011 ; Fang et al., 2012) (figure 6).

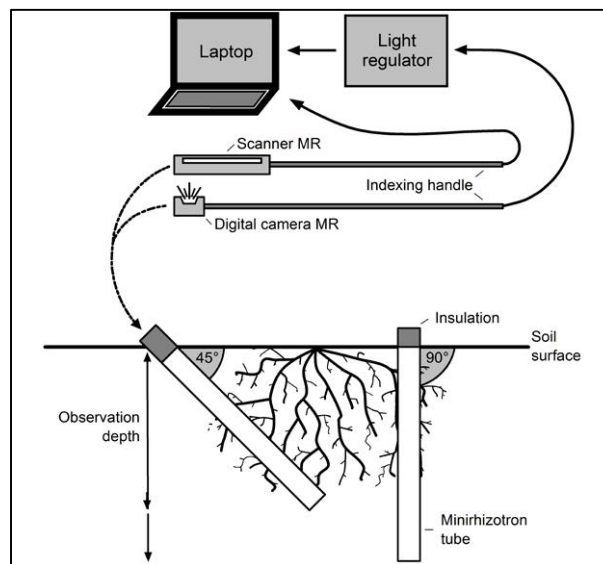


Figure 6. Fonctionnement d'un minirhizotron (Rewald et Ephrath, 2013).

Bien que les endoscopes soient encore utilisés pour l'analyse de systèmes racinaires de petite taille, les 2 appareils les plus exploités pour la prise d'images sont la caméra digitale et le scanner (Rewald et Ephrath, 2013).

Plusieurs tailles de caméra existent et le diamètre du tube sera sélectionné sur base de la taille de la caméra. L'image enregistrée par la caméra ne couvre qu'une section étroite du tube, c'est-à-dire moins de 2 cm de largeur. Si l'on veut acquérir un profil de sol plus large, la caméra doit alors être pivotée à chaque profondeur de mesure (Rewald et Ephrath, 2013).

Les scanners utilisés sont des scanners à plat CCD (charged coupled device) modifiés. Ces appareils sont capables de photographier la paroi du tube à 360°. La résolution maximale d'un scanner est de 1200 dpi mais en routine une résolution de 300-600 dpi sera préférée pour réduire le temps de mesure (Rewald et Ephrath, 2013).

L'installation du minirhizotron est une étape très importante. Toute compaction inutile sera évitée. De plus, l'appareil sera installé avant la plantation ou lorsque les biomasses des racines et de la tige sont les plus faibles. Le tube sera inséré manuellement ou à l'aide d'un dispositif de forage mécanique (Rewald et Ephrath, 2013).

Idéalement, le tube doit être installé de telle manière à ce qu'il soit en contact étroit avec le sol, affectant la croissance racinaire de la même manière que des pierres l'affecteraient. Un contact étroit prévient la rotation du tube et la formation d'écart entre la paroi et le sol mais pourrait causer une compression du substrat pouvant mener à une croissance racinaire en périphérie. Si le trou est trop grand, l'installation s'avère plus aisée et les griffes en surface du tube peuvent être évitées.

Cependant, des vides étroits peuvent constituer une zone de faible résistance qui peut augmenter artificiellement la croissance, la ramification et la survie racinaire et sont plus susceptibles d'être le lieu de condensation de vapeur pouvant interférer avec les observations (Rewald et Ephrath, 2013).

Par ailleurs, l'angle d'installation du tube est également important. Les minirhizotrons sont souvent installés soit verticalement (90°), soit avec un angle (30° ou 45°). Les tubes inclinés estimeraient la distribution du système racinaire des espèces herbacées et des plantes cultivées de manière plus efficace que les tubes verticaux. Par contre, lors d'observations dans des pots, des lysimètres ou des phytotrons, le tube peut très bien être installé horizontalement, le milieu étant totalement homogène et artificiel et le sol pouvant être également distribué autour du tube lors de l'installation (Rewald et Ephrath, 2013).

En outre, l'insertion du tube causant des perturbations au niveau du sol et des systèmes racinaires, les mesures ne seront pas prises directement après l'installation. Certaines sources préconisent une période d'attente de 6 à 12 mois, alors que d'autres commencent leurs mesures immédiatement ou après quelques mois. Cependant, en écosystème agricole, ce problème semble moins important si le tube est placé avant plantation (Rewald et Ephrath, 2013).

Le tube présente un diamètre interne se situant entre 13 mm (endoscope) et 64 mm (scanner). Des tubes carrés ont rarement été utilisés. Les tubes en plastic présentent une plus grande résistance que les tubes en verre, plus spécialement dans les terrains caillouteux, gonflants ou gelés, sont plus faciles à manipuler et sont moins onéreux. Le choix du matériel se fera sur base du système d'acquisition des images, du type de sol, de la période de temps prévue, de l'intensité d'utilisation ainsi que du coût (Rewald et Ephrath, 2013).

Concernant le nombre de répétitions à réaliser, Rewald et al. (2011, cité par Rewald et Ephrath, 2013) suggèrent que 5 à 6 tubes sont nécessaires pour estimer la densité racinaire d'une parcelle en champ cultivé.

Un des principaux avantages de ce système est sa capacité à pouvoir réaliser des mesures de manière continue. La plupart des études ont adopté une fréquence de mesures entre 2 à 4 semaines, avec une fréquence d'échantillonnage plus faible durant la période de dormance. En fait, le principal facteur qui va déterminer la fréquence d'acquisition d'image dans une étude utilisant un minirhizotron est le trait racinaire étudié : une fréquence de mesure plus élevée sur une étude du taux de renouvellement des racines mais plus faible lors d'une étude sur la profondeur racinaire (Rewald et Ephrath, 2013).

Les images acquises grâce au minirhizotron peuvent ensuite être analysées grâce à des programmes spécialement dédiés à cela (Tableau 5, liste non exhaustive). Tous ces programmes sont manuels (Rewald et Ephrath, 2013) et permettent de mesurer la longueur, le diamètre et la couleur des racines ainsi que la formation ou la disparition de racines (Fang et al., 2012).

Tableau 5. Logiciels utilisés pour l'analyse d'images acquises grâce au minirhizotron (Rewald et Ephrath, 2013)..

Programme	Référence
Rootfly	Birchfield et Wells, 2006
RooTracker	Duke University, Durham, NC, USA
Root Measurement System	Ingram et Leers, 2001
WinRHIZO Tron	Régent Instruments, Quebec, Canada

Certains logiciels d'analyse automatique des images commencent progressivement à faire leur entrée dans le domaine. Cependant, ces programmes automatiques ne sortent une information fiable que si le contraste entre les racines et le background est suffisamment élevé. Dans le futur, de nouvelles avancées en imagerie telles la combinaison du spectre visible et de la réflectance infrarouge permettront de distinguer automatiquement les racines mortes et vivantes, la matière organique et le sol (Nakaji et al., 2008 ; Lei et Bauhus, 2010).

A l'avenir, plusieurs améliorations devraient être apportées à la technique. Citons notamment la possibilité de pouvoir distinguer les racines de différentes espèces, l'automatisation de la capture d'images sur le terrain et la mesure simultanée de paramètres environnementaux (température et contenu en eau du sol, pH, éléments présents, etc.).

#### b) Avantages et inconvénients

La technique du minirhizotron présente l'avantage de pouvoir être utilisée *in situ*, d'être non destructive et de pouvoir suivre l'évolution du système racinaire au cours du temps (Rewald et Ephrath, 2013). De plus, bien que l'installation du tube requière 30 à 45 minutes, l'observation dans chaque tube ne demande que 10 à 15 minutes (Taylor et al., 1991).

Cependant, la technique présente 2 limitations majeures : le coût du matériel et des logiciels et le délai de stabilisation du milieu après l'installation du tube. En outre, bien que l'installation du tube et la prise d'images soient assez rapides, l'analyse ultérieure peut être assez exigeante en temps et donc en main-d'œuvre (Rewald et Ephrath, 2013). De plus, la plupart des études rapportent que les minirhizotrons sous-estiment la longueur racinaire dans les couches supérieures de sol comparé à la densité de racines selon leur longueur (RLD), et surestiment la longueur racinaire dans les couches plus profondes en comparaison à la technique d'échantillonnage des racines. Les sous-estimations dans les couches supérieures du sol ont été attribuées à un mauvais contact sol/tube et à l'inhibition de la croissance racinaire due à la lumière entrant dans le sol. Dans les couches plus profondes, cependant, la croissance racinaire tend à être surestimée à cause de la croissance préférentielle le long du tube (Munoz-Romero et al., 2010).

#### c) Applications

Les minirhizotrons demeurent un outil précieux dans l'étude des systèmes racinaires. Plusieurs applications sont possibles et ont été revues par Rewald et Ephrath (2013) :

- La mesure de la biomasse racinaire, du RLD et de la distribution des racines en profondeur
- Le suivi du système racinaire dans le temps :

Les minirhizotrons permettent de décrire les changements à court terme de dynamique racinaire et plus particulièrement des racines fines (Rewald et Ephrath, 2013). En effet, des paramètres tels le taux de croissance, les ramifications, la longévité et la présence de poils absorbants peuvent être monitorés (Smit et al., 2000). De plus, les racines sont classées en 2 groupes selon qu'elles soient en vie ou mortes sur base de 3 critères : les changements de couleur (Cheng et al., 1991, Hendrick et Pregitzer, 1992, cités par Rewald et Ephrath, 2013), les signes de désintégration (Repo et al., 2008, cité par Rewald et Ephrath, 2013) et la disparition (Comas et al., 2000, cité par Rewald et Ephrath, 2013).

- L'étude de la morphologie racinaire :

Le paramètre morphologique le plus accessible est le diamètre racinaire. Moins d'études ont abordé la pigmentation ou la ramification racinaire.

- L'étude des interactions biologiques souterraines :

Les interactions entre les racines et les mycorhizes, les racines et la faune du sol ou les parasites des plantes ou encore la compétition ont pu être explorées grâce aux minirhizotrons.



#### 2.3.2.4. [La PCR quantitative au service de la quantification racinaire](#)

##### a) Description de la technique

A la fin des années 90, des séquences d'ADN de plantes ont été amplifiées par la réaction de polymérisation en chaîne (PCR) afin d'identifier de manière qualitative des mix de racines d'arbres dans des échantillons de sol (Jackson et al., 1999, cité par Huang et al., 2013). Plus récemment, plusieurs études ont utilisé la technologie de PCR quantitative en temps réel (qPCR) pour des estimations de biomasse ou de distribution racinaire au sein d'un profil de sol, pour étudier la réponse du système racinaire face à l'addition de chaux en sol acide ou à un traitement herbicide (Huang et al., 2013).

L'ADN de plante dans les échantillons de sol provient pour la majeure partie de racines vivantes, l'ADN se dégradant assez rapidement quand une plante meurt (Huang et al., 2013). Cette technique surmonte ainsi le problème de la discrimination entre racines mortes et vivantes rencontré par d'autres méthodes de quantification racinaire.

Les mesures de concentration en ADN végétal dans les sols à l'aide de la qPCR sont réalisées grâce à l'amplification d'une séquence d'ADN cible. Les ITS (internal transcribed spacers) de l'ADN ribosomal nucléaire (ADNr) sont largement utilisés dans les études phylogénétiques et du code-barres génétique à cause de leur niveau élevé de divergence interspécifique. Une autre cible est la région du génome située entre 2 loci de microsatellites (Inter Simple Sequence Repeat) (Huang et al., 2013). La méthode développée par Riley et al. (2010, cité par Haling et al., 2011) permet de ne plus devoir séparer les racines du sol pour la quantification

La distribution verticale de la densité d'ADN racinaire peut ainsi être évaluée. De plus, la concentration en ADN de la plante peut aussi être quantifiée dans le sol et reliée à la biomasse et la longueur racinaire en ayant établi une calibration sérieuse au départ. Cependant, la proportion de cellules de racines vivantes dans le sol change en fonction de la localisation du champ, de la profondeur du sol et de l'âge des plantes. Une calibration est donc nécessaire pour chaque situation (Huang et al., 2013). De plus, le sol contient des acides humiques et d'autres composés chimiques capables d'entraver le processus. Enfin, il faut prendre en compte le fait que la quantité d'ADN est plus faible dans les vieux tissus racinaires que dans les plus jeunes (Jones et Bentley, 2015).

##### b) Exemples d'applications

Mommer et al. (2008) ont pu caractériser l'abondance relative de racines de différentes espèces dans des échantillons mixtes de racines. Cette étude constitue une avancée dans la recherche sur les systèmes racinaires puisqu'elle permet de pouvoir détecter quantitativement les racines d'espèces différentes, les 2 autres techniques existantes étant la spectrométrie proche infrarouge et des méthodes biochimiques. Ceci permettrait également de reconstruire les systèmes racinaires des différentes espèces dans leur tridimensionnalité, ce qui pourrait fournir une quantité non négligeable d'informations dans les domaines de l'écologie des populations et des communautés.

Haling et al. (2011) ont utilisé la technique pour étudier l'effet d'un apport de chaux sur la croissance racinaire de graminées pérennes tolérantes ou sensibles à un sol acide cultivées ensemble dans un sol contenant de l'aluminium.

Huang et al. (2013) ont utilisé cette technique pour comparer la réponse de 20 géotypes de froment à la sécheresse dans un essai au champ et en conditions contrôlées. Une différence en termes

de RDD (Densité d'ADN racinaire) a été observée entre les différents génotypes adaptés ou non à cet environnement.

La technique a été utilisée par Jones et Bentley (2015) dans des essais du NIAB TAG et a permis de détecter des différences significatives de masses racinaires entre des modalités d'apports réguliers d'azote et de fongicides et le témoin sans intrants. Des différences significatives entre les profondeurs d'enracinement, les variétés et les différents gènes de nanisme ont été décelées.

### 2.3.2.5. [L'utilisation des propriétés électriques des racines](#)

#### 2.3.2.5.1. [La capacité électrique](#)

La mesure de la capacité électrique au travers d'un système racinaire est présentée comme une technique rapide, abordable, non-invasive et non-destructive pour estimer la biomasse racinaire d'une plante (Aulen et Shipley, 2012). Cette méthode fut initialement proposée par Chloupek en 1972 sur base d'une corrélation entre la masse de racines et la capacité électrique du système racinaire global. La méthode s'est révélée assez efficace en hydroponie et en substrat de sable mais moins fiable lors de mesures de plantes en pot ou en champ (Aulen et Shipley, 2012). Elle fut surtout utilisée pour des mesures sur des espèces herbacées (Ellis et al., 2013).

Une explication toujours hypothétique du phénomène a été avancée par Dalton (1995). Ce dernier propose un modèle selon lequel les racines se comportent comme des condensateurs cylindriques avec l'épiderme et le xylème correspondant respectivement aux électrodes externes et internes (figure 7). Les membranes de l'épiderme des racines jouent le rôle d'isolant et séparent 2 éléments conducteurs : d'une part, la solution du sol et d'autre part, le milieu interne de la racine. Plus précisément, toute membrane biologique située entre les 2 électrodes de mesure pourrait aussi jouer ce rôle. Ces membranes se comportent donc comme des condensateurs électriques imparfaits correspondant à 2 milieux conducteurs séparés par un isolant et est caractérisé par sa capacité à stocker les charges électriques. La méthode de la capacité électrique est donc basée sur une polarisation active de ces membranes racinaires avec une source d'énergie externe et mesure les propriétés diélectriques du système racinaire (Chloupek et al., 1999, cité par Aulen et Shipley, 2012 ; Dalton, 1995 ; Ellis et al., 2013).

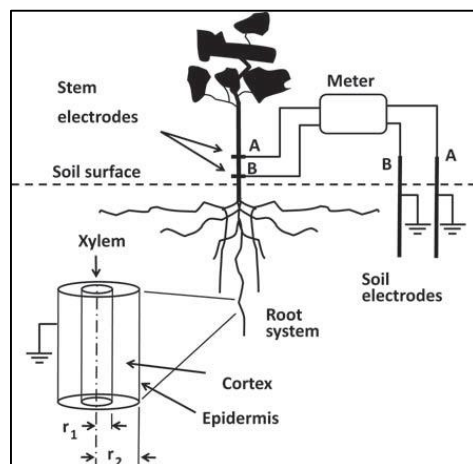


Figure 7. Principe de la mesure de capacité du système racinaire (Ellis et al., 2012).

En pratique, une électrode du RLC-mètre (Résistance, Inductance-L-, Capacité) est placée au niveau de la base de la tige de la plante, la seconde électrode, une tige métallique, est placée dans le sol environnant. La capacité résultante, mesurée en farads, rapporte une quantité de charges électriques stockées par les membranes racinaires pour un potentiel spécifique appliqué, à une fréquence habituellement de 1KHz (Dalton, 1995 ; Aulen et Shipley, 2012 ; Dietrich et al., 2012). La capacité varie donc en fonction de la surface, de la masse et de la longueur racinaire ainsi que de la permittivité relative du tissu végétal (Ellis et al., 2013).

Cependant, selon Aulen et Shipley (2012), bien qu'une relation hautement significative ait été observée entre la capacité électrique et la matière sèche racinaire, cette méthode n'est pas capable de prédire de manière précise la matière sèche racinaire d'espèces herbacées cultivées en pot sans une calibration préalable spécifique à l'espèce. Et Dietrich et al. (2012) de rajouter que bien que la mesure de capacité peut en certaines circonstances être corrélée avec la masse racinaire, ce n'est pas une mesure directe de cette biomasse. Par ailleurs, le placement de l'électrode sur la tige a toute son importance. L'électrode placée au niveau de la tige doit se trouver le plus proche possible des racines primaires afin de minimiser l'effet de la tige dans le circuit (Dalton, 1995). De plus, le contenu en eau du sol a une influence significative sur la mesure. Ceci est dû d'une part, au fait qu'un sol humide conduit mieux le courant et d'autre part, que le contact entre la surface racinaire et le sol est réduit lors d'une réduction du contenu en eau dans les pores du substrat. C'est pourquoi les mesures seront réalisées à la capacité au champ (Dalton, 1995 ; Van Beem et al., 1998, cité par Repo et al., 2012). Des améliorations doivent donc être apportées à la technique pour que cette méthode non destructive de quantification racinaire puisse être utilisée en routine au champ (Aulen et Shipley, 2012). Cette technique est, de plus, difficile à appliquer sur froment car chaque plante possède plusieurs talles (Manske et al., 2001).

#### 2.3.2.5.2. L'imagerie par résistivité électrique

La tomographie de résistivité électrique est une méthode non-destructive et non-invasive de quantification et de cartographie racinaire à 2 ou 3 dimensions utilisée jusqu'ici pour les racines d'arbres. La technique a maintenant été appliquée sur des racines de plantes herbacées telles la luzerne en conditions contrôlées (Amato et al., 2009). Ses principaux avantages sont sa couverture spatiale, sa rapidité et une perturbation faible du milieu (Amato et al., 2012).

La résistivité électrique ( $\rho$ ) est définie comme la résistance électrique au travers d'un corps uniforme de longueur et de section données et représente une mesure de la capacité de matériaux à limiter le transfert d'un courant électrique. La résistivité au niveau du sol est alors mesurée en appliquant un courant électrique au travers d'au minimum 2 conducteurs (« électrodes de courant ») et de mesurer les différences de potentiel résultantes sur au moins 2 conducteurs séparés (« électrodes de potentiel »). Les électrodes peuvent être placées selon différentes configurations géométriques, avec les électrodes de potentiel placées entre les électrodes de courant (comme dans la configuration de Wenner ou de Wenner-Schlumberger) ou placées à la suite des électrodes de courant, de manière similaire à la configuration dipôle-dipôle. La profondeur étudiée dépend de la configuration et augmente avec un espacement entre les électrodes (Amato et al., 2009) (figure 8). Un ensemble de minimum 4 électrodes est requis pour la mesure de la résistivité dans un seul volume de sol tandis que des mesures bi ou tridimensionnelles requièrent de multiples électrodes placées en réseau linéaire, en grilles ou dans des trous de forage (Amato et al., 2009). 2 étapes interviennent dans le calcul de résistivité du sol : une résistivité apparente est tout d'abord évaluée dans l'hypothèse d'un sol homogène et ensuite, l'hétérogénéité est prise en compte par modélisation numérique grâce à une procédure appelée inversion (Rossi et al., 2011).

Bien que des différences de résistances électriques entre espèces soient attendues selon des variations entre la composition des cellules racinaires, Rossi et al. (2011) émettent l'hypothèse que pour des plantes du même âge cultivées au même endroit, les principaux facteurs contrôlant la réponse électrique sont le contenu en eau et la variation de contraste entre la racine et le background du sol (Rossi et al., 2011).

La méthode permet une quantification de la biomasse racinaire mais aussi une cartographie de la distribution racinaire au sein du sol qui peut être appliquée à différentes échelles et résolutions (Amato et al., 2008). De plus, les méthodes électriques peuvent fournir concomitamment aux mesures racinaires des informations sur d'autres propriétés du milieu (Amato et al., 2012).

Cependant, lorsque la densité racinaire est trop faible, il est difficile de distinguer le signal des racines du bruit du background. L'hypothèse avancée suppose qu'à biomasse faible, la réponse de résistivité des racines est du même ordre de grandeur que les variations d'autres propriétés du sol comme l'eau, la présence de pierres ou la texture et est donc trop faible que pour être discriminée (Amato et al., 2009 ; Amato et al., 2012). En effet, la résistivité du sol est en fait une fonction de plusieurs propriétés du substrat (Samouelian et al., 2005, cité par Rossi et al., 2010) et chacune d'elle peut prédominer en un endroit et ainsi, masquer l'effet des autres. Il est donc nécessaire de réaliser une calibration préalable afin d'identifier les variables du sol qui dominent (Rossi et al., 2010). De plus, en terres cultivées, les pratiques agricoles telles le travail du sol, le passage, l'irrigation localisée et la fertilisation pourraient introduire des variations dans les propriétés du sol qui pourraient avoir un impact ensuite sur la résistivité. La technique se révèle réellement intéressante si l'effet des autres propriétés du sol est minimisé, réduit ou inclus dans les modèles et que dans chaque cas il soit vérifié que la résistivité est un bon prédicteur des caractéristiques racinaires (Amato et al., 2012). Un autre paramètre pouvant affecter l'acquisition de l'image est la température, la résistivité décroissant avec la température de 2.02% par °C (Campbell et al., 1948, cité par Amato et al., 2012). Enfin, actuellement, la technique ne peut détecter que les racines d'un diamètre supérieur à 2mm (Amato et al., 2012). Cependant, en conditions contrôlées, les autres propriétés du sol peuvent être minimisées et un effet résistif a pu être détecté et quantifié (Amato et al., 2009). Des recherches futures devraient explorer la réponse des racines plus fines (Amato et al., 2012).

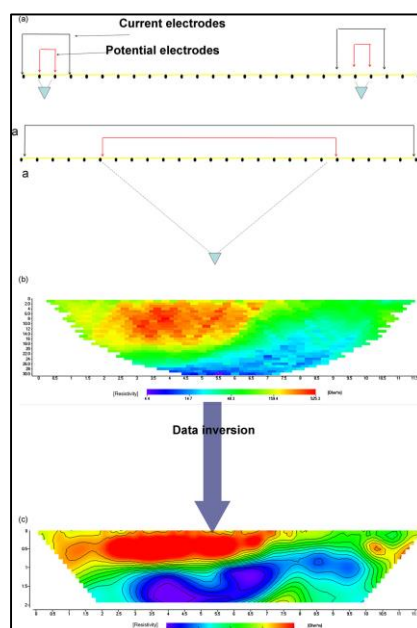


Figure 8. Principe de l'imagerie par résistivité électrique (Amato et al., 2009).

### 2.3.2.6. [La spectroscopie infrarouge : un outil innovant dans les études relatives aux systèmes racinaires](#)

La spectroscopie infrarouge est une méthode analytique utilisée pour la détermination quantitative et qualitative de substances basée sur l'information chimique qu'elles contiennent. L'infrarouge s'étend de la région du visible jusqu'à la région des micro-ondes du spectre électromagnétique (figure 9) (Rewald et al., 2012).

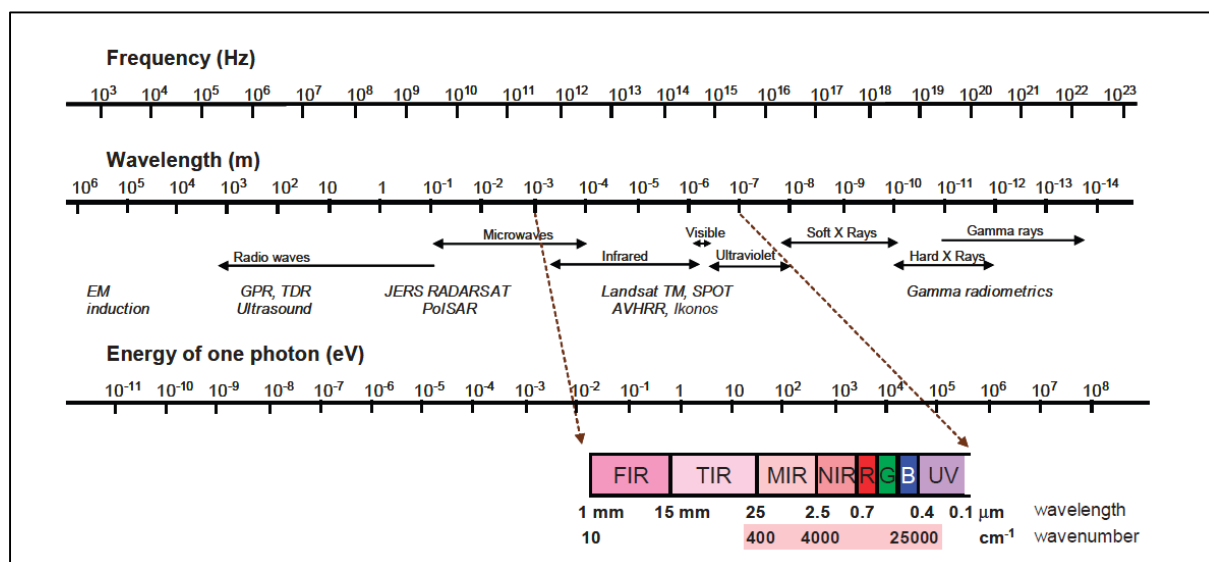


Figure 9. Le spectre électromagnétique (Mc Bratney et al., 2003, cités par Viscarra Rossel et al., 2005).

Le principe de la spectroscopie infrarouge consiste à éclairer un échantillon et à enregistrer la réponse spectrale. La composition chimique d'un échantillon détermine ainsi l'empreinte spectrale en fonction du nombre d'ondes (Chalmers et Griffiths, 2002, Günzler et Gremlich, 2002, cités par Rewald et al., 2012). Plus concrètement, l'énergie des photons associés à la région infrarouge (de 1 à 15 kcal/mole) n'est pas assez élevée que pour exciter les électrons. Cependant, cette énergie est capable d'induire des vibrations au niveau des liaisons covalentes entre atomes et groupes. En effet, les liens covalents ressemblent en quelque sorte à des ressorts rigides qui peuvent être étirés et pliés. Ainsi, en plus de la rotation aisée des groupes autour d'une liaison simple, les molécules éprouvent une grande variété de mouvements vibratoires caractéristiques des atomes dont elles sont composées. Par conséquent, presque tous les composés organiques vont absorber le rayonnement infrarouge correspondant énergétiquement à ces vibrations. Les spectromètres infrarouges permettent d'obtenir des spectres d'absorption des composés reflétant leur structure moléculaire (IOCD, Infrared Spectroscopy, en ligne). Cette technique est rapide, non destructive, non invasive, simple, ne requiert pas de préparation onéreuse et chronophage des échantillons ou l'utilisation de réactifs nocifs pour l'environnement et est potentiellement adaptable pour des applications en champ (Viscarra Rossel et al., 2006 ; Dale et al., 2012).

Dans les recherches relatives aux systèmes racinaires, jusqu'à maintenant, la spectroscopie IR est utilisée seulement sur des racines excavées. Avant d'acquérir les spectres infrarouges, le matériel doit être séché et l'échantillon ne doit pas être broyé, ou alors, légèrement. La calibration requise avec cette méthode peut être vue comme un désavantage. En effet, cette étape de calibration est longue et laborieuse, notamment parce que la composition chimique des racines peut changer au cours du développement ou suite à des stress biotiques ou abiotiques (Rewald et al., 2012).

Sur base des données acquises au moyen du spectromètre infrarouge, dans le but d'extraire une information qualitative et quantitative, les outils de la chimiométrie devront être appliqués (Roggo et al., 2005, cités par Dale et al., 2012). La chimiométrie est la science consistant à extraire une information pertinente au départ de mesures réalisées sur des systèmes chimiques en utilisant des procédures mathématiques et statistiques (Massart et al., 1988, cités par Dale et al., 2012). L'analyse des spectres est composée de 3 grandes étapes (Dale et al., 2012) :

- Le prétraitement des spectres
- La calibration des modèles
- La validation des modèles

L'annexe 5 présente une synthèse des différentes applications de la spectroscopie dans l'étude des systèmes racinaires. Dans les études relatives au sol et aux racines, seules les spectroscopies NIR et MIR sont relatées. La principale différence entre la spectroscopie proche et moyen infrarouge réside dans le fait que l'absorption dans le MIRS correspond aux bandes fondamentales des vibrations moléculaires tandis que les absorptions dans le NIRS correspondent aux overtones et aux combinaisons des bandes fondamentales (Williams et Norris, 1987, cités par Bellon-Maurel et al., 2011). Cette différence entraîne de facto 2 conséquences :

- Les coefficients d'absorption (ou coefficient d'extinction) sont plus faibles dans la gamme NIR, ce qui permet à la lumière de mieux pénétrer la matière.
- Le spectre NIR est beaucoup plus encombré à cause de la combinaison de bandes et des overtones. Par conséquent, le MIRS présente une plus grande spécificité de bandes comparé au NIRS.

La spectroscopie moyen infrarouge doublée d'un dispositif de réflectance totale atténuée (ATR) peut pénétrer les échantillons jusqu'à une profondeur de quelques  $\mu\text{m}$ . Le NIR, quant à lui, peut pénétrer les échantillons jusqu'à des profondeurs d'approximativement 27-180  $\mu\text{m}$  (Clarke et al., 2002, cité par Rewald et al., 2012).

#### a) Spectroscopie proche infrarouge

La spectroscopie proche infrarouge est une technique rapide dans l'analyse des constituants et est considérée comme un outil précieux pour les applications, entre autres, en écologie (Foley et al., 1998, cité par Rewald et al., 2012). Des applications en écosystème agricole sont relatées dans la littérature.

Cette méthode a notamment été utilisée par Kusumo et al. (2011) dans le but de **quantifier les densités de racines** de maïs au départ des réflectances spectrales dans le visible et le proche infrarouge, à partir de carottes de sol. Kusumo et al. (2010) ont appliqué la même technique pour prédire la densité de racines dans un pâturage ou quantifier les racines de ray-grass cultivé en serre (Kusumo et al., 2009).

La technique peut également être appliquée dans la **discrimination de racines selon qu'elles soient mortes ou vivantes**. Ceci a été réalisé par Nakaji (2008) dans le visible et le proche infrarouge pour discriminer les racines mortes des racines vivantes de peupliers hybrides. Picon-Cochard et al. (2008) ont utilisé le proche infrarouge pour prédire le pourcentage de racines mortes ou vivantes de 5 espèces de graminées cultivées en champ.

Des racines de **différentes espèces** peuvent également être discriminées grâce au proche infrarouge. Une expérience menée par Lei et Bauhus (2010) a permis de prédire la proportion de différentes espèces ligneuses et de racines de plantes (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*). Roumet et al. (2006) présentent la spectroscopie proche infrarouge comme un outil intéressant dans la quantification de mélanges de racines provenant d'espèces différentes. Les

auteurs ont pour cela créé des mélanges artificiels de racines avec des combinaisons de 2 ou 3 espèces cultivées en serres (*Festuca arundinacea*, *Holcus lanatus*, *Lolium perenne*) ou d'espèces d'un ancien champ (*Brachypodium phoenicoides*, *Bromus erectus*, *Picris hieracioides*) (Roumet et al., 2006 ; Rewald et al., 2012).

#### b) Spectroscopie moyen infrarouge

A l'heure actuelle, la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) est utilisée couramment. Concrètement, la spectroscopie FT-IR enregistre un «interférogramme », résultat des trains d'ondes réfléchis, qui est converti par la transformation de Fourier en spectre d'absorption ou de transmission (Rewald et al., 2012).

Naumann et al. (2010) ont utilisé la technique FT-MIR-ATR pour discriminer les racines de pois et d'avoine dans des cultures en mélange. Cette méthode est réellement pertinente dans la caractérisation de la compétition entre les différentes espèces.

#### c) L'imagerie hyperspectrale

L'imagerie hyperspectrale est une technique émergente intégrant l'imagerie conventionnelle et la spectroscopie dans le but d'obtenir une information spatiale et spectrale d'un objet. Les images hyperspectrales sont donc composées de centaines de bandes d'ondes contigües en chaque point de l'échantillon étudié. Par conséquent, chaque pixel d'une image hyperspectrale contient le spectre correspondant à cette position précise (Gowen et al., 2007). Les images hyperspectrales consistent donc en des *hypercubes* (Lu & Chen, 1998, cités par Gowen et al., 2007), c'est-à-dire des blocs de données tridimensionnels, avec 2 dimensions spatiales et une dimension spectrale correspondant aux longueurs d'ondes (figure 10) (Gowen et al., 2007).

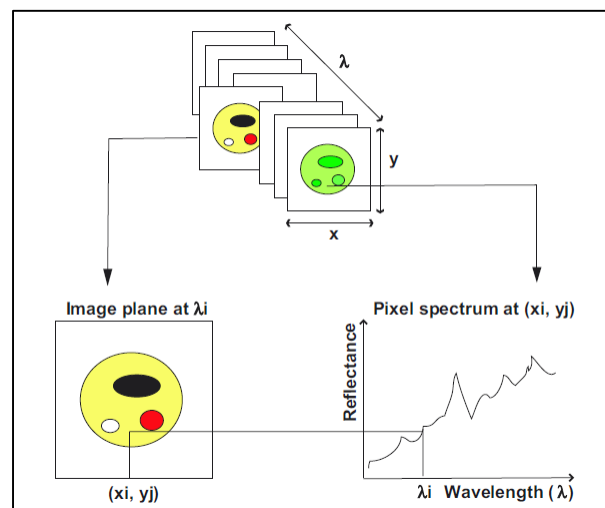


Figure 10. Illustration d'un hypercube et relation entre les 2 dimensions spatiales et la dimension spectrale (Gowen et al., 2007).

La technologie NIR-HSI (imagerie hyperspectrale proche infrarouge) combinée aux outils de la chimimétrie a été appliquée pour des applications de détection et de quantification des résidus de culture et de racines au départ d'échantillons de sol (Vincke et al., 2014 ; Eylembosch et al., 2015).

## 2.4. Conclusion de la revue de la littérature

Après avoir brossé les différentes techniques de quantification au champ, nous pouvons voir que chaque méthode a ses propres spécificités, avec des avantages et des inconvénients. Zhu et al. (2011) affirment que les techniques d'excavation et de minirhizotron semblent supérieures pour le phénotypage de l'architecture racinaire au champ. L'annexe 6 tente de résumer les différentes techniques de phénotypage au champ.



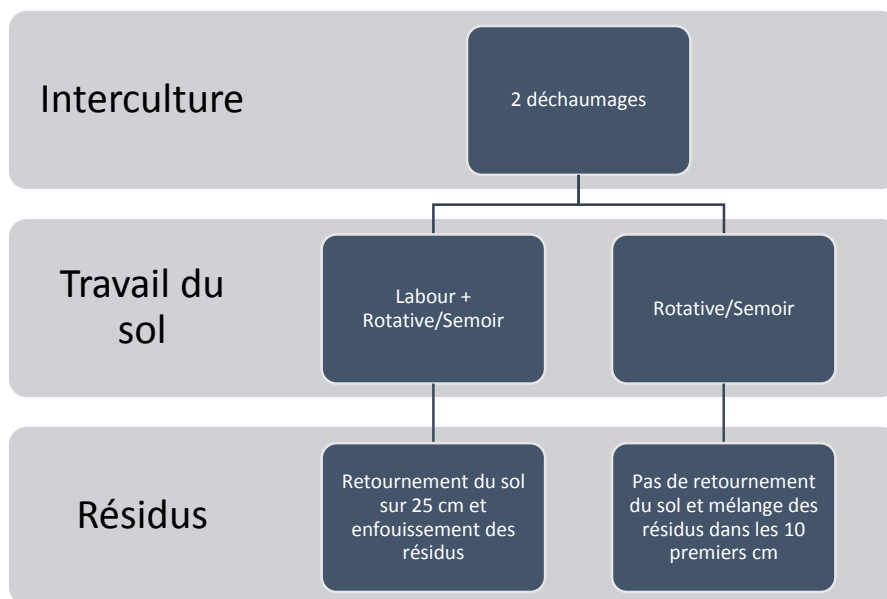


Figure 11. Description de l'essai SOLRESIDUS (Vancutsem et al., 2012).

### 3. Matériel et méthode

#### 3.1. Description de l'essai SOLRESIDUS

Le projet « SOLRESIDUS » est un projet multidisciplinaire mis en place en 2009 et réunissant plusieurs équipes de la faculté Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) et du CRA-W (Centre Wallon de Recherches Agronomiques). L'objectif de ce projet de recherche est de pouvoir caractériser l'impact à long terme des pratiques culturales de labour/non labour et de restitution ou non des résidus de culture sur différentes composantes telles que les échanges de CO<sub>2</sub>, la croissance aérienne et racinaire de la culture ainsi que son développement et ses rendements (paille et grain), les compactations de sols, la macro-faune et les populations microbiennes du sol, l'humidité du sol, la composition du sol et son pH, les teneurs en N, P, K et autres éléments solubles, l'énergie nécessaire au travail du sol et les efforts de traction du tracteur (Vancutsem et al., 2012).

L'originalité du projet réside dans la collaboration de multiples spécialistes apportant leur expertise dans des disciplines agronomiques diverses sur un seul site d'essai. La mise en commun de leurs résultats permettra de tirer des conclusions sur l'impact agronomique et écologique des pratiques de travail du sol et du mode de restitution des résidus dans une optique d'agriculture durable.

L'essai est réalisé à Gembloux (Belgique), dans la région agricole limoneuse de Hesbaye, en climat tempéré. Le schéma expérimental consiste en un carré latin-magique-split ploté<sup>6</sup> (Annexe 7). Les 2 facteurs étudiés sont le travail du sol et la modalité de restitution des résidus de culture. Par conséquent, 4 objets sont analysés : (1) labour et restitution des résidus, (2) labour et exportation des résidus, (3) non-labour et restitution des résidus, (4) non-labour et exportation des résidus.

L'essai a débuté en 2008 par l'implantation d'une culture de colza avec ou sans labour mais avec exportation des pailles du blé précédent pour l'entièreté de l'essai. Ensuite, en octobre 2009, novembre 2010 et octobre 2011, du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) a été implanté conformément à la description de l'essai.

En ce qui concerne le facteur « travail du sol », soit un labour à maximum 30 cm, soit un travail du sol simplifié à maximum 10 cm de profondeur est réalisé. Dans le cas du facteur « gestion des résidus de culture », soit les pailles sont hachées à la sortie de la moissonneuse et réincorporées au niveau du sol, seul le grain étant alors exporté (modalité « *résidus In* »), soit le grain et les pailles pressées sous forme de ballots sont exportés, avec comme seules restitutions au sol, les chaumes et les menues pailles (modalité « *résidus Out* »). Dans les 2 cas, 2 déchaumages au cours de l'interculture, un labour dans les modalités concernées et le semis avec un poussiculteur avant et un combiné rotative-semoir sont réalisés (Vancutsem et al., 2012) (figure 11).

La saison culturale analysée au cours de cette étude d'étend du 17 octobre 2011, date de semis de la culture de froment d'hiver, au 13 août 2012, date de récolte. Tout au long de cette période, des relevés de biomasse de la culture ont également été réalisés.

---

<sup>6</sup> Carré latin car 4 combinaisons possibles, avec les 4 objets différents dans chaque ligne et chaque colonne ; magique car 4 carrés avec les 4 objets représentés ; split plot car certaines parties sont fixes à cause de contraintes techniques.

### 3.2. Prélèvements des échantillons de sol

Les échantillons de sol utilisés dans le cadre de ce mémoire et desquels ont été extraits les résidus de culture et les racines ont été prélevés à 4 dates différentes, réparties tout au long de la saison culturale :

- Le 17 novembre 2011
- Le 4 avril 2012
- Le 8 mai 2012
- Le 8 août 2012

Ces échantillons ont été prélevés entre 0 et 30 cm de profondeur, par couches successives de 10 cm, à l'aide d'une sonde de 3 cm de diamètre. Par conséquent, 3 horizons ont pu être distingués : l'horizon A (0-10 cm), l'horizon B (10-20 cm) et l'horizon C (20-30 cm). Pour chaque parcelle, 2 prélèvements ont été réalisés : d'une part, un échantillon « ligne » constitué de 5 carottes prélevées aléatoirement dans la ligne de semis et rassemblées en un seul échantillon, et d'autre part, un échantillon « interligne », regroupement de 5 carottes prélevées aléatoirement dans l'inter-rang.

Les échantillons prélevés ont ensuite été directement placés en chambre froide à 4°C pour ralentir au maximum l'activité biologique au sein des carottes de sol.

### 3.3. Extraction des racines et résidus de culture des prélèvements de sol

Les échantillons ont été mis en solution dans de l'eau salée (4 litres d'eau et 200 g de NaCl) durant 48 heures afin de désagréger les carottes de sol. L'extraction des racines et des résidus a ensuite été réalisée grâce à un courant d'eau entraînant les éléments flottants vers le haut d'un seau au centre duquel se trouve un cylindre creux (figure 12). Les éléments flottants passent par le cylindre et sont retenus sur un filtre avec une taille de maille de 1.6 mm placé à l'extrémité basse du cylindre tandis que la terre est évacuée sous forme d'eau boueuse. Sur le filtre, en plus des résidus de culture et des racines, des vers de terre, des insectes, des cailloux et des petits agglomérats de terre peuvent être retrouvés. Un tri grossier a été effectué afin d'enlever le plus grand nombre d'éléments indésirables. Les échantillons lavés ont ensuite été mis à sécher dans une étuve à 40°C jusqu'à obtention d'un poids constant (Vancutsem et al., 2012). Par la suite, pour des raisons logistiques, après une période de stockage à température et humidité ambiante, les échantillons lavés ont été stockés en chambre froide à 4°C en attendant l'analyse par caméra hyperspectrale proche infrarouge.



Figure 12. Description du lavage des échantillons. Vue globale de l'installation d'extraction des résidus (A), Transfert d'un échantillon après 48 heures de trempage (B), Schéma du système d'extraction (C), Vue de l'entraînement des résidus de culture par le courant d'eau et chute de ces derniers dans le tube central (D), Récupération des résidus sur le filtre (E), Aperçu de ce qui est récupéré sur le filtre (F) (Vancutsem et al., 2012).

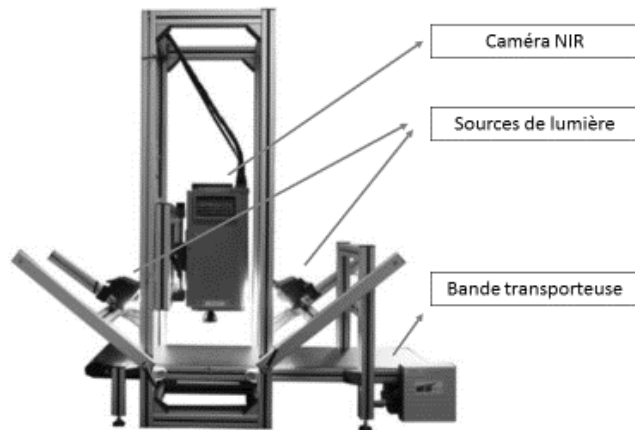


Figure 13. Photo du système d'acquisition d'image: une caméra NIR hyperspectrale combinée à une bande transporteuse (Vincke et al., 2014).

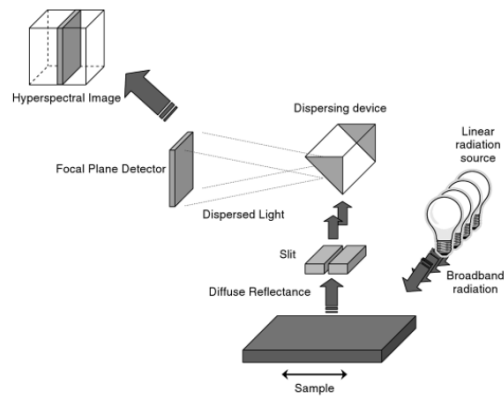


Figure 14. Description du fonctionnement de la caméra : l'échantillon est éclairé par une source lumineuse et un faisceau est ensuite réfléchi vers un détecteur bidimensionnel perpendiculaire à la surface de mesure (Grahn et al., 2007).

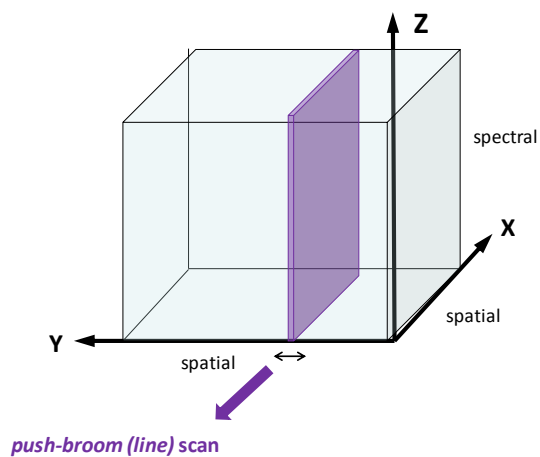


Figure 15. Mode d'acquisition des images hyperspectrales au moyen du système Line scan (CRA-W).

### 3.4. Description de la caméra hyperspectrale proche infrarouge Line scan

Les images des échantillons lavés ont été acquises grâce à une caméra hyperspectrale proche infrarouge Line scan (ou système Push-broom) positionnée au-dessus d'une bande transporteuse. Ce système a été développé par Burgermetrics SIA (Riga, Lettonie) et est constitué d'une caméra Xenics (Leuven, Belgique) et d'un spectrographe Specim Ltd (Oulu, Finlande) (Vermeulen et al., 2012 ; Fernández Pierna J.A. et al., 2014 ; Vincke et al., 2014) (figure 13). Les images hyperspectrales acquises pouvaient être ensuite analysées au moyen du logiciel HyperSee développé par BurgerMetrics SIA (Riga, Lettonie).

Cette caméra utilise un détecteur bidimensionnel perpendiculaire à la surface de l'échantillon. 2 spots de 150 watts chacun éclairent l'objet étudié et un faisceau de lumière réfléchi par l'échantillon est ensuite projeté sur une matrice plan focal bidimensionnelle (figure 14). Les images consistent en n lignes (y) de 320 pixels (x) acquises à 209 longueurs d'ondes différentes (z). En effet, pour chaque pixel, la réflectance est mesurée 32 fois à 209 longueurs d'ondes, dans une gamme allant de 1118 à 2425 nm, avec une résolution spectrale de 6.3 nm. Le spectre enregistré pour chaque pixel de l'image est calculé en faisant la moyenne des 32 mesures (Vermeulen et al., 2012 ; Fernández Pierna J.A. et al., 2014). L'image finale consiste donc en un cube hyperspectral obtenu en rassemblant chaque ligne (y) et en fixant les 2 autres dimensions (x et z) (figure 15).

En résumé, l'image hyperspectrale a donc une taille de :

$320 \text{ pixels de large (x)} * n \text{ lignes de long (y)} * 209 \text{ longueurs d'onde (z)}$
---

La largeur des échantillons analysés étant supérieure à 1 mm, le choix s'est porté vers un objectif de type microlens permettant d'acquérir des images d'une largeur maximale de 10 cm. Avec cette configuration, la résolution spatiale de la caméra est de 300  $\mu\text{m}$ .

La caméra requiert un préchauffage de 1 heure avant de pouvoir être employée. En début de journée, le système est calibré sur une image noire par fermeture de la lentille et sur une image blanche en faisant l'acquisition du spectre d'une céramique blanche. Cette calibration permet de compenser la dérive due au courant d'obscurité, à la variation de température de la source lumineuse et à l'hétérogénéité spatiale de l'éclairage (Vermeulen et al., 2012). Par ailleurs, la vitesse du tapis est réglée à chaque allumage du système à l'aide d'un « étalon vitesse » permettant d'avoir toujours des pixels carrés.

Les échantillons lavés et séchés ont été placés au centre du tapis sur une largeur maximale de 10 cm en évitant autant que possible tout chevauchement entre les éléments. Pour plus de facilité, lors de l'acquisition, l'échantillon était laissé sur le tamis sur lequel il était posé pour le séchage (figure 16). Une photo RGB (Red Green Blue) a été prise pour chaque échantillon avant l'acquisition des spectres afin de garder une trace de la disposition de l'échantillon sur la bande transporteuse.



Figure 16. Disposition de l'échantillon sur la bande transporteuse. L'échantillon est étalé sur le tamis sur lequel il avait été placé pour le séchage.

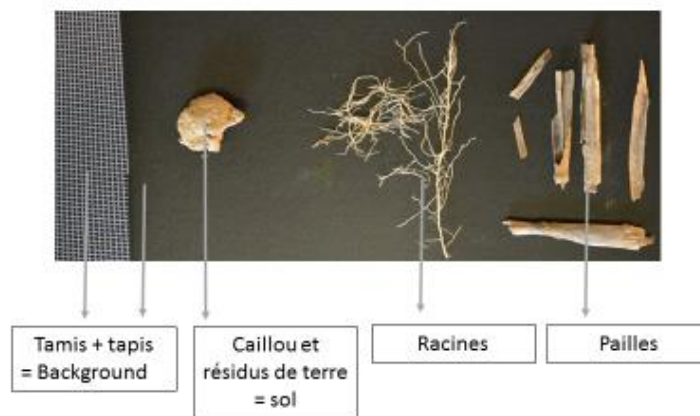


Figure 17. Illustration des 4 classes spectrales étudiées: le background (tamis et tapis), le sol (cailloux et résidus de terre), les racines de froment et les résidus de culture de froment.

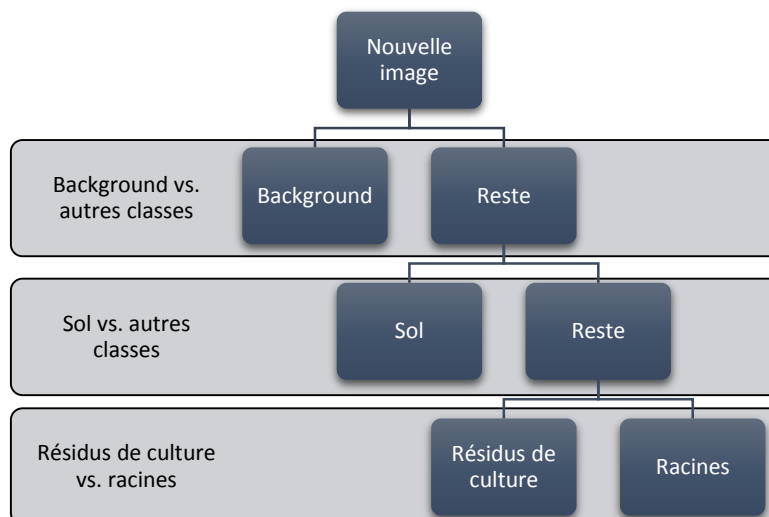


Figure 18. Arbre de classification dichotomique basé sur 3 nœuds successifs d'équations SVM

### 3.5. Le protocole de discrimination

Dans le cadre de cette étude, 4 classes spectrales ont été identifiées : le background (tapis de la bande transporteuse et tamis sur lequel sont déposés les échantillons), le sol (résidus de terre et cailloux), les résidus de culture de froment (pailles, chaumes et menues pailles) et les racines de froment. Ces 4 classes spectrales ont été utilisées pour la calibration de modèles chimiométriques (Eylenbosch et al., 2014) (figure 17).

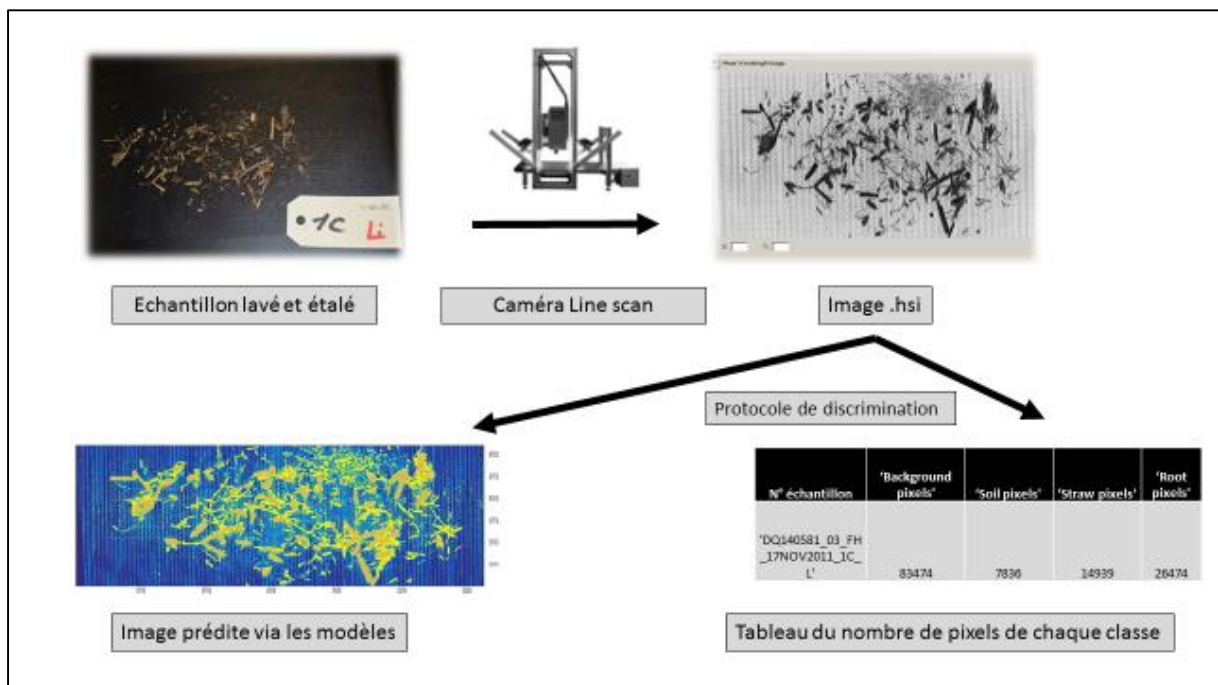
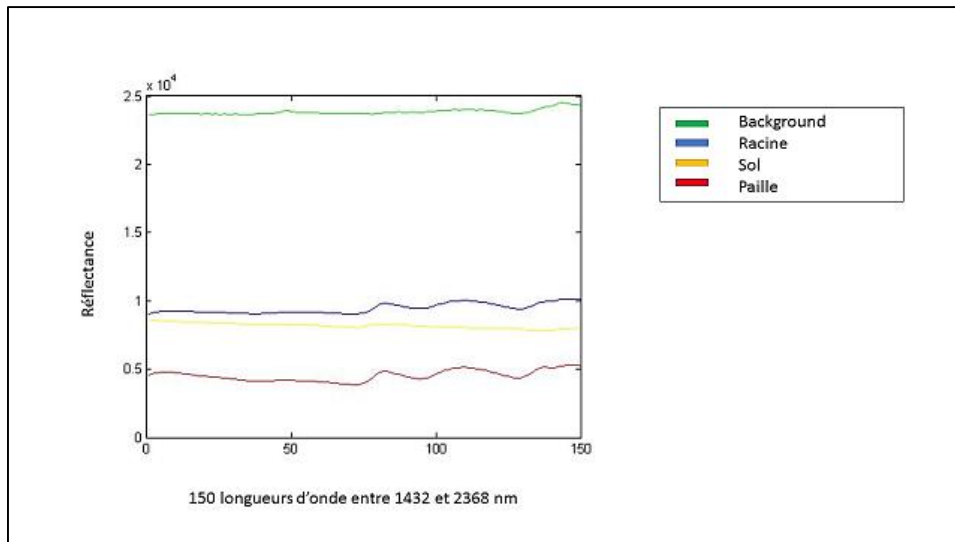
Le protocole utilisé pour prédire les échantillons analysés dans cette étude est basé sur des modèles d'analyse discriminante SVM (Support Vector Machines) (Fernández Pierna J.A. et al., 2004) comme développés par Damien Eylenbosch dans le cadre de sa thèse de doctorat<sup>7</sup>. L'analyse discriminante SVM est une méthode chimiométrique linéaire dont l'objectif est de trouver un séparateur maximisant la marge, c'est-à-dire la différence entre 2 (ou plus) groupes prédéfinis de données en minimisant les erreurs de classification (Fernández Pierna J.A. et al., 2004). Ce modèle a été sélectionné pour sa capacité à discriminer des objets sur base de spectres issus de l'imagerie proche infrarouge (Fernández Pierna J.A. et al., 2004 ; Eylenbosch et al., 2015).

Ce protocole est basé sur plusieurs analyses successives des spectres de l'image. Tout d'abord, les spectres ayant une réflectance supérieure à  $2,5 \times 10^4$  à la longueur d'onde 1740nm sont classés en tant que background. En effet, lors de l'observation des spectres, la discrimination entre les spectres du tapis et les spectres des autres classes est parfaite. Les spectres restant sont ensuite classés selon un arbre de classification dichotomique basé sur 3 nœuds successifs (figure 18). Le premier nœud est basé sur une équation SVM permettant de séparer les spectres du background restant (principalement les spectres du tamis) du reste des spectres (sol, résidus de culture et racines). Le second nœud est basé sur une équation SVM permettant de discriminer les particules de sol des matières organiques (résidus de culture et racines). Enfin, le troisième nœud s'appuie sur une équation SVM permettant de séparer les spectres des résidus de culture de ceux des racines.

L'arbre est construit sur base des modèles SVM qui utilisent dans tous les cas une fonction kernel de type « radial basis function » (RBF), avec un coût de 100 (Fernández Pierna J.A. et al., 2004).

---

<sup>7</sup> « Détection et quantification des racines et des résidus de culture présents dans le sol à l'aide de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge » encadrée par le Professeur Bernard Bodson (GxABT, ULg) et en collaboration avec Vincent Baeten et Juan Antonio Fernández Pierna (CRA-W).





Avant de construire l'arbre et afin d'éliminer les régions bruyantes aux limites de la gamme de longueurs d'ondes, seules les longueurs d'ondes entre 1432 et 2368 nm ont été exploitées dans les équations. Pour améliorer la discrimination des spectres, ceux-ci subissent un prétraitement « auto-scale ». Celui-ci consiste à centrer, pour chaque longueur d'onde, les valeurs puis à les diviser par leur écart-type. Dans le protocole, les ombres des racines ont été considérées comme faisant partie du background afin d'améliorer les prédictions. La figure 19 représente les spectres moyens des 4 classes spectrales.

Lors de l'application des modèles SVM sur un set de validation constitué de 2250 spectres NIR, 99.9% des spectres de background, 99.2% des spectres de sol, 89.5% des spectres de résidus de culture et 92.2% des spectres de racines de froment d'hiver ont été classés dans la bonne classe spectrale. En revanche, lors de l'application des modèles SVM sur des images hyperspectrales, les pourcentages moyens de pixels bien prédits pour chaque classe atteignaient 100% pour le background, 98.4% pour le sol, 79.4% pour les résidus de culture et 92.5% pour les racines de froment d'hiver (D. Eylonbosch, communication personnelle).

La version R2014b du logiciel Matlab développé par MathWorks, Inc. (Natick, MA, USA) a été utilisée pour transformer les images hyperspectrales (.hsi) en format Matlab (.mat), pour créer les modèles SVM et par la suite, pour leur application sur les images. La conception des modèles et la réalisation des prédictions ont été rendues possibles grâce à l'utilisation de la PLS Toolbox 7.8 (Eigenvector Research, Inc., Wenatchee, WA, USA).

Grâce à l'information spatiale livrée par le système hyperspectral proche infrarouge et les prédictions des classes auxquelles appartiennent chaque pixel (résultats des équations SVM), deux éléments de sortie sont générés : d'une part, les images reconstruites avec une couleur différente assignée à chaque classe et d'autre part, un tableau de sortie avec le nombre de pixels prédits comme appartenant à chaque classe spectrale (figure 20).

### 3.6. Quantification des résidus de culture et des racines de froment

Pour chaque image prédite avec les modèles SVM, les résultats obtenus sont présentés sous forme d'un tableau avec le nombre de pixels prédits comme appartenant à chaque classe spectrale. Ces nombres de pixels ont été convertis en grammes de résidus de culture ou de racines à l'aide de deux droites de régression.

Pour élaborer ces deux droites, 56 échantillons différents de pailles et 61 échantillons de racines ont été pesés et scannés. Des lots de masses différentes ont été constitués, de très faibles à élevés, afin de couvrir une gamme représentative des masses de résidus de culture et de racines couramment rencontrés dans les échantillons. Ainsi, des masses entre 0 et 2.36 g de pailles et des masses entre 0 et 0.294 g de racines ont été scannées. Le nombre de pixels prédits comme appartenant à une classe (résidu de culture ou racine) a ensuite été relié à la masse de l'élément scanné (g).

La relation entre le nombre de pixels et la masse est de type linéaire. En supposant que l'absence de pixels pour une classe entraîne l'absence de l'élément dans l'échantillon, la droite passe par l'ordonnée à l'origine (figures 21 et 22).

$$\text{Masse paille (g)} = \frac{\text{Nombre de pixels paille}}{57230} \quad (R^2=0.97)$$

$$\text{Masse racine (g)} = \frac{\text{Nombre de pixels racine}}{341627} \quad (R^2=0.98)$$

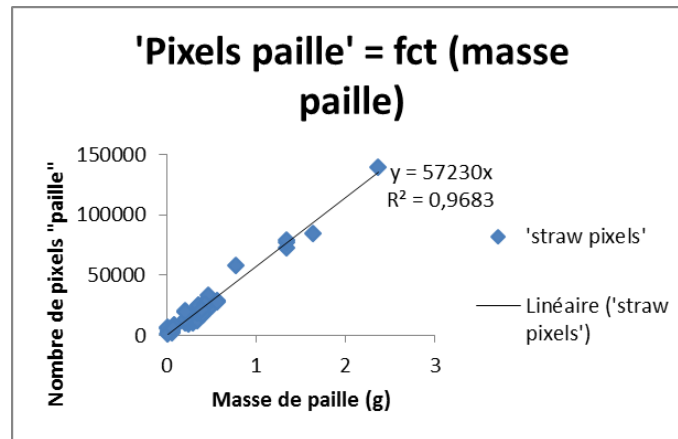


Figure 21. Relation entre la masse de résidus de culture de froment et le nombre de pixels prédits comme étant des résidus de culture sur base des images NIR.

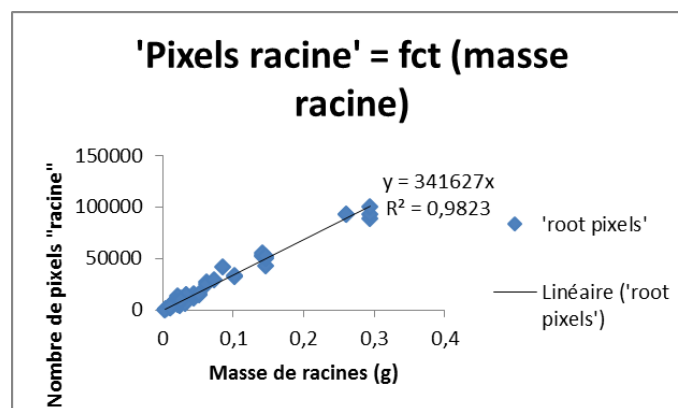


Figure 22. Relation entre la masse de racines de froment et le nombre de pixels prédits comme étant des racines sur base des images NIR.

Ces quantités de résidus de culture et de racines sont rapportées ensuite en  $\text{g}/\text{dm}^3$  de sol. Les carottes mesurant 3 cm de diamètre et 10 cm de long, le volume des 5 carottes prélevées peut être obtenu de la manière suivante :

$$\text{Volume 5 carottes} = 5 \cdot \pi r^2 h = 5 \cdot \pi \cdot 1,5^2 \cdot 10 = 353,25 \text{ cm}^3 = \mathbf{0,35325 \text{ dm}^3}$$

### 3.7. L'analyse statistique

Les analyses statistiques ont été divisées en 2 parties : d'une part, la statistique descriptive et d'autre part, l'inférence.

#### a) Statistique descriptive

Les statistiques descriptives ont été calculées à partir des moyennes des densités de résidus de culture ( $\text{g}/\text{dm}^3$ ) obtenus dans la ligne de semis et l'inter-rang et des moyennes des densités racinaires ( $\text{g}/\text{dm}^3$ ) obtenus dans la ligne de semis et l'inter-rang. Ensuite, des graphiques ont été réalisés afin de

décrire la distribution des résidus de culture et la distribution racinaire au sein du profil de sol en fonction des modalités de travail du sol (labour et non-labour) et du mode de restitution des résidus de culture (*Résidus In* et *Résidus Out*).

#### b) Inférence

L'inférence a pour but d'étendre les conclusions observées au niveau de l'échantillon à l'ensemble des individus de la population (Soyeurt, communication personnelle).

L'**objectif** de l'analyse statistique était d'analyser l'influence du travail du sol et du mode de restitution des résidus sur d'une part, la quantité de résidus de culture de froment d'hiver dans les différents horizons du profil de sol et d'autre part, sur le développement du système racinaire d'une culture de froment d'hiver.

Les **observations** étaient la densité de racines de froment d'hiver (g de racines/dm<sup>3</sup> de sol) ou de résidus de culture (g de résidus de culture/dm<sup>3</sup> de sol) obtenus grâce à la démarche développée précédemment.

Les 7 **facteurs** étaient :

- La date de prélèvement, *date* (facteur aléatoire, 4 objets)
- Le lieu de prélèvement : dans la ligne de semis ou dans l'inter-rang, *lieu* (facteur fixe, qualitatif, 2 objets)
- La modalité de travail du sol, *travsol* (facteur fixe, qualitatif, 2 objets)
- L'horizon du sol, *horizon* (facteur fixe, qualitatif, 3 objets)
- Le mode de restitution des résidus de culture, *résidu* (facteur fixe, qualitatif, 2 objets)
- Le numéro de ligne de la parcelle, *ligne* (facteur aléatoire, 4 objets)
- Le numéro de colonne de la parcelle, *col* (facteur aléatoire, 4 objets)

L'**unité expérimentale** étudiée est une parcelle. Le **dispositif expérimental** est un carré latin-magique-split ploté, raison pour laquelle la ligne et la colonne de la parcelle sont prises comme facteur aléatoire plutôt que le bloc.

#### Comparaison inter-dates

L'objectif de cette partie est d'étudier la dégradation des résidus de culture et le développement du système racinaire tout au long de la saison.

Par parcelle, un échantillon a été prélevé à quatre dates différentes. Le modèle statistique appliqué est donc un modèle mixte avec données répétées. Ce modèle présente la particularité que  $n=1$  pour l'interaction englobant les 7 facteurs (*date*, *lieu*, *travsol*, *horizon*, *résidu*, *ligne*, *col*). Par conséquent, cette interaction est reprise dans le résidu vu que  $n=1$ . Pour ce faire, la procédure Proc Mixed du logiciel SAS (SAS Institute Inc., Version 9.4) a été utilisée afin d'étudier l'influence des différents facteurs étudiés. Les différences entre facteurs ont été étudiées à partir des Least Squares Means (Moyennes au sens des moindres carrés). La signification de ces différences a été appréciée par le calcul de la p-valeur. Les différences ont été qualifiées de significatives (\*) si la p-valeur se situait entre 0.05 et 0.01, de hautement significative (\*\*) si la p-valeur se situait entre 0.01 et 0.001 et de très hautement significative (\*\*\*) si la p-valeur se situait entre 0.001 et 0.

#### Comparaison intra-dates

L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence des facteurs travail du sol, horizon, lieu, résidu, ligne et colonne sur la densité de résidus de culture et de racines au sein de chaque date.

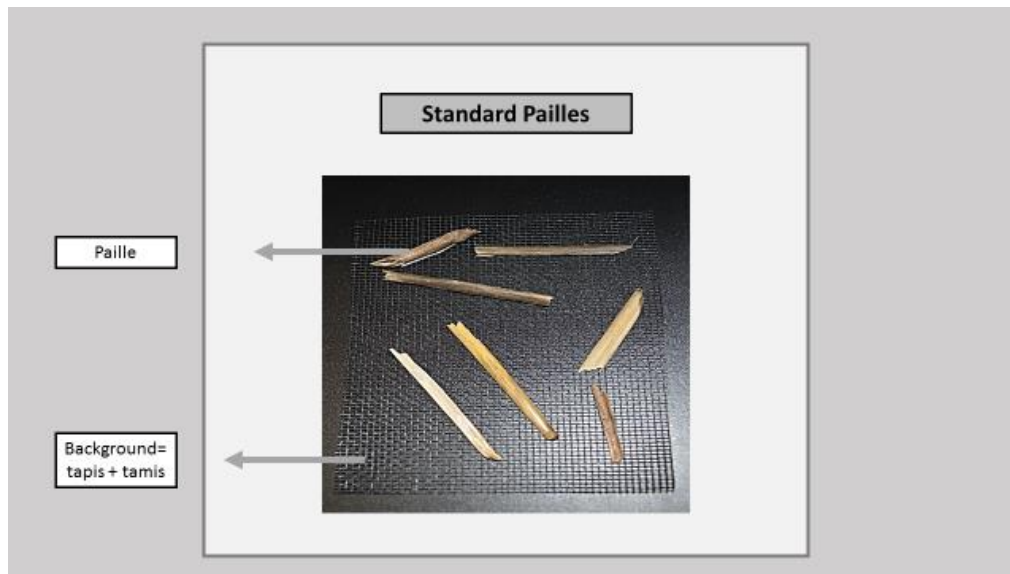


Figure 23. Schéma descriptif d'un des standards conçus lors de cette étude. Le standard paille présente 2 classes spectrales : le background (tapis de mesure et tamis) et la classe spectrale « paille »

Une décomposition en fonction du facteur « date » a été réalisée, c'est-à-dire une analyse de variance de type croisée mixte à 6 critères de classification par date. Le tout a été réalisé au moyen du logiciel RStudio, Inc. (Version R 3.2.0). Ces ANOVA 6 ont ensuite été décomposées en ANOVA à 4 ou 5 critères de classification selon différents facteurs en fonction de la signification des interactions étudiées. Des comparaisons multiples SNK (Student Newman Keuls) ont été réalisées afin de voir les différences entre les modalités d'un même facteur. Les différences ont été qualifiées de significatives (\*) si la p-valeur se situait entre 0.05 et 0.01, de hautement significative (\*\*) si la p-valeur se situait entre 0.01 et 0.001 et de très hautement significative (\*\*\*) si la p-valeur se situait entre 0.001 et 0.

#### c) Les conditions d'application

Les conditions d'application de normalité et d'égalité des variances ont été testées *a posteriori*, c'est-à-dire sur les résidus obtenus après la réalisation de la première analyse de la variance (procédure Proc Mixed). La normalité des résidus a été jugée à partir du test de Shapiro-Wilk au niveau de signification de 0.05. L'homoscédasticité des résidus a été jugée à partir du graphique des résidus en fonction des valeurs observées. Si les conditions ne sont pas respectées pour l'unité expérimentale étudiée, une transformation de variable sera appliquée. Ainsi, une transformation logarithmique en base 10 pour les résidus de culture et une transformation racine carrée pour les racines ont permis de rencontrer des conditions de normalité et d'homoscédasticité acceptables.

### 3.8. Création, analyse et suivi de standards

Un standard est un échantillon étalon qui est scanné de manière régulière afin de détecter d'éventuelles déviations ou dysfonctionnements de la caméra. Lors des prises d'images, ce standard est scanné plusieurs fois au cours de la journée d'acquisition.

Sur base du nombre de pixels obtenus pour une classe spectrale spécifique, un tableau de contrôle (ou control chart) est réalisé. Celui-ci est obtenu en reportant sur un graphique le nombre de pixels prédits pour une classe spectrale spécifique. La moyenne, la moyenne  $\pm 1$  écart-type, la moyenne  $\pm 2$  écarts-type et la moyenne  $\pm 3$  écarts-type sont calculés sur base des mesures des 60 premiers standards et reportés sur le tableau de contrôle. Le calcul de ces indicateurs permet de définir un intervalle dans lequel le nombre de pixels prédits pour une classe spectrale déterminée du standard doit se trouver. Un écart du nombre de pixels prédits par rapport à la moyenne au-delà de  $m \pm 2$  écarts-type permet de détecter une déviation significative de la caméra (limites de surveillance). Un franchissement de la limite  $m \pm 3$  écarts-type révèle un réel dysfonctionnement au niveau de la caméra (limites d'action).

Le **standard « pailles »** a été conçu au début de la période de prise d'images afin de caractériser la stabilité de la caméra durant les 3 semaines d'acquisition (figure 23). 7 pailles de froment d'hiver ont été collées sur un tamis de 11.5 cm de long sur 9 cm de large. Le choix s'est porté vers des pailles fraîches et donc bien jaunes (échantillon DQ130044-18) et des pailles ayant été enfouies dans le sol (échantillon DQ130044-14). Les faces internes et externes des fétus ont été exposées. Les standards ont été prédits avec les modèles SVM utilisés pour prédire les images hyperspectrales des échantillons. Les pourcentages paille/ (paille+racine+sol) et racine/ (paille+racine+sol) ont ensuite été calculés et reportés sur un graphique pour chaque standard.

## 4. Analyse des résultats : statistiques descriptives et inférence

Les résultats présentés sont calculés sur base de prédictions obtenues suite à l'analyse d'images hyperspectrales à l'aide de modèles d'analyses discriminantes. Les nombres de pixels prédits comme étant des résidus de culture ou des racines ont ensuite été convertis en grammes de résidus de culture ou de racines à l'aide de deux droites de régression. Cependant, une confusion spectrale existant entre ces 2 derniers éléments, les données obtenues présentent une **sous-estimation des résidus de culture et une surestimation des racines**. Dès la calibration des modèles, une certaine confusion entre ces 2 classes spectrales a été mise en évidence. Dans un premier temps, nous avons analysé les résultats en posant l'hypothèse que les classes spectrales étaient parfaitement discriminées. Une deuxième partie de ce travail a consisté à étudier cette confusion de manière plus approfondie et un ensemble de pistes d'amélioration est proposé dans les perspectives.

Pour faciliter la lecture et l'interprétation des résultats, la même échelle a été conservée pour tous les graphiques. Cela permet de comparer au cours de la saison, les densités de résidus d'une part, et les densités racinaires d'autre part.

### 4.1. Inférence : respect des conditions d'application, transformation des données de départ et modèles utilisés

Pour l'**analyse inter-dates**, le modèle sur données répétées (Procédure Proc Mixed) a été choisi à cause du fait que pour chaque parcelle, un échantillon a été prélevé à quatre dates différentes. Or, la parcelle constitue l'unité expérimentale dans notre expérimentation. Les échantillons prélevés aux différentes dates ne sont donc pas indépendants. Cette démarche a été confirmée d'une part par les coefficients de corrélation élevés entre les données des différentes dates et d'autre part, par le rejet de l'hypothèse nulle du test de sphéricité de Mauchly, aussi bien pour les résidus de culture (p-valeur < 0.0001) que pour les racines (p-valeur=0.0002). La procédure Proc Mixed a donc permis de mener une analyse de variance sur données répétées. Par ailleurs, le facteur date a un effet très hautement significatif (p-valeur résidus de culture<0.0001, p-valeur racines<0.0001) et interagit avec d'autres facteurs de manière significative. Il n'y a donc pas moyen d'isoler le facteur date. Or, un des objectifs du mémoire est de caractériser l'impact du travail du sol sur la distribution des résidus de culture et du système racinaire du froment. Par conséquent, la comparaison inter-dates est basée sur les différences entre LS Means (moyenne au sens des moindres carrés) calculées au départ de l'interaction très hautement significative date \* travail du sol \* horizon (p-valeur résidus de culture = 0.0007 ; p-valeur racines<0.0001), obtenue après application de la procédure Proc Mixed. Cette comparaison a permis de voir si au sein d'un horizon donné, pour un travail du sol donné, des différences entre les 4 dates sont observées. Pour faciliter l'interprétation, les logarithmes (densités de résidus de culture) et les racines carrées (densités de racines) ont été exprimés par rapport à la référence « 17 novembre 2011/Labour/Horizon A ».

*A posteriori*, les conditions de normalité et d'homoscédasticité des résidus ont été testées à partir du modèle à 7 critères de classification. Ces 2 conditions n'étaient pas respectées, ni pour les résidus de culture (Shapiro-Wilk : p-valeur<0.0001 et résidus répartis de manière hétérogène), ni pour les racines (Shapiro-Wilk : p-valeur<0.0001 et résidus répartis de manière hétérogène). Par conséquent, les données doivent être transformées. Une transformation logarithmique en base 10 pour les résidus de culture et une transformation racine carrée pour les racines ont permis de

rencontrer des conditions de normalité (Shapiro-Wilk : p-valeur résidus de culture = 0.20, p-valeur racines = 0.02) et d'homoscédasticité (résidus répartis de manière homogène) acceptables.

Pour l'**analyse intra-dates**, une décomposition en fonction du facteur « date » a été réalisée, c'est-à-dire une analyse de variance de type croisée mixte à 6 critères de classification par date. Ces ANOVA 6 ont ensuite été décomposées en ANOVA à 4 ou 5 critères de classification selon différents facteurs en fonction de la signification des interactions étudiées. Des comparaisons multiples SNK (Student Newman Keuls) ont été réalisées afin de voir les différences entre les modalités d'un même facteur.

## 4.2. Résidus de culture : analyse des résultats

### 4.2.1. Distribution des résidus de culture dans les 30 premiers cm du profil de sol : analyse intra-dates

- a) Analyse des densités de résidus de culture au sein de chaque date : statistiques descriptives

Plusieurs tendances peuvent être dégagées sur base de l'analyse des graphiques suivants (figures 24, 25, 26 et 27). En effet, des différences de distribution des résidus au sein du profil selon la modalité de travail du sol et des différences en termes de quantités de résidus selon la modalité de restitution sont clairement visibles sur ces graphes.

La différence entre **la restitution ou non des résidus** est surtout visible à la date du 17 novembre 2011 en non-labour, avec près de 1.3 g de résidus/dm<sup>3</sup> en plus en *Résidus In* qu'en *Résidus Out*, dans l'horizon A (figure 24). A part pour le 17 novembre 2011, en labour, pour les horizons B et C, et pour le 8 août 2012, en labour horizon C, les quantités de résidus sont toujours supérieures en Résidus In qu'en Résidus Out.

Par ailleurs, les résidus de cultures présentent une distribution tout à fait différente selon le **mode de travail du sol**. En effet, le non-labour maintient la majeure partie des résidus de culture dans les 10 premiers cm de sol, seule une petite quantité des résidus se retrouvant entre 10 et 30 cm tandis que le labour à une profondeur de 25 cm permet une redistribution de la matière organique sur les 30 cm du profil (tableau 6). Le tableau 7 permet une analyse plus quantitative de cette différence de distribution. Ainsi, le non-labour mélange 90 % des résidus de culture dans les 10 premiers cm du sol et 10 % des résidus de départ sont redistribués dans le reste du profil alors que le labour enfouit en moyenne 77 % des résidus de culture en profondeur, seuls 23 % en moyenne des résidus de départ demeurant dans les 10 premiers cm du sol. De plus, sur base du tableau 6, nous pouvons observer qu'en moyenne, sur l'ensemble du profil étudié, les densités de résidus de culture sont plus élevées en non-labour qu'en labour. Les prélèvements ont en effet été réalisés plusieurs semaines après l'enfouissement des résidus dans le sol et il y a donc déjà eu une dégradation de ceux-ci.

Tableau 6. Moyennes des densités de résidus de culture (g/dm<sup>3</sup>) au sein de chaque horizon, pour les 2 modalités de travail du sol (labour et non-labour) et de restitution des résidus de culture (RIn et ROut). Pour une même modalité de travail du sol, les densités de résidus de culture les plus élevées ont été surlignées en gris.

Date	Travail du sol	Résidus	A (0-10 cm)	B (10-20 cm)	C (20-30 cm)
17-nov-11	Labour	RIn	0,62	1,35	0,90
		ROut	0,49	1,60	0,94
	Non-labour	RIn	3,81	0,15	0,08
		ROut	2,48	0,10	0,05
04-avr-12	Labour	RIn	0,29	0,60	0,67
		ROut	0,16	0,39	0,35
	Non-labour	RIn	1,67	0,12	0,04
		ROut	1,33	0,06	0,02
08-mai-12	Labour	RIn	0,34	0,60	0,73
		ROut	0,28	0,49	0,54
	Non-labour	RIn	2,09	0,06	0,04
		ROut	1,19	0,02	0,02
08-août-12	Labour	RIn	0,09	0,08	0,08
		ROut	0,08	0,07	0,12
	Non-labour	RIn	0,23	0,03	0,01
		ROut	0,22	0,02	0,01

Tableau 7. Pourcentages de résidus de culture dans les 10 premiers cm de sol par rapport à l'ensemble du profil étudié (30 cm). La dernière colonne présente les moyennes réalisées pour les 4 objets au cours des 4 dates.

Modalité	Pourcentages de résidus de culture dans l'horizon 0-10 cm par rapport au total de résidus dans l'horizon 0-30 cm pour chaque date				Moyenne 0-10 cm
	17-11-11	04-04-12	08-05-12	08-08-12	
Labour - Résidus In	21%	19%	20%	35%	24%
Labour – Résidus Out	16%	18%	22%	31%	22%
Non-labour – Résidus In	94%	92%	96%	84%	91%
Non-labour – Résidus Out	94%	95%	97%	87%	93%

Lors de l'observation des figures 25 et 26, un nombre de pixels détectés comme étant des résidus de culture plus élevé peut être noté à la date du 8 mai 2012 par rapport au 4 avril 2012. Cette augmentation a été observée pour tous les objets sauf pour le labour et le non-labour/Résidus In/Horizon B, le non-labour/Résidus In/Horizon C et les 3 horizons de non-labour Résidus Out. Malgré cette légère augmentation, une décomposition des résidus de culture au cours de la saison est observée.

Le 8 août 2012 (figure 27), la densité de résidus de culture est quasi nulle dans tous les horizons, quels que soient le mode de travail du sol ou la modalité de restitution des résidus de culture, malgré les disparités de densités de résidus dans les différents horizons au début de la saison culturale. Cette dégradation sera mise en évidence avec les courbes d'évolution saisonnières dans la suite de ces résultats.



Les coefficients de variation observés sont assez élevés, avec de nombreuses valeurs sous 50%, une partie entre 50 et 100% et une valeur maximale de 137%. Ceci souligne une grande variabilité des données échantillonnées ou des prédictions.

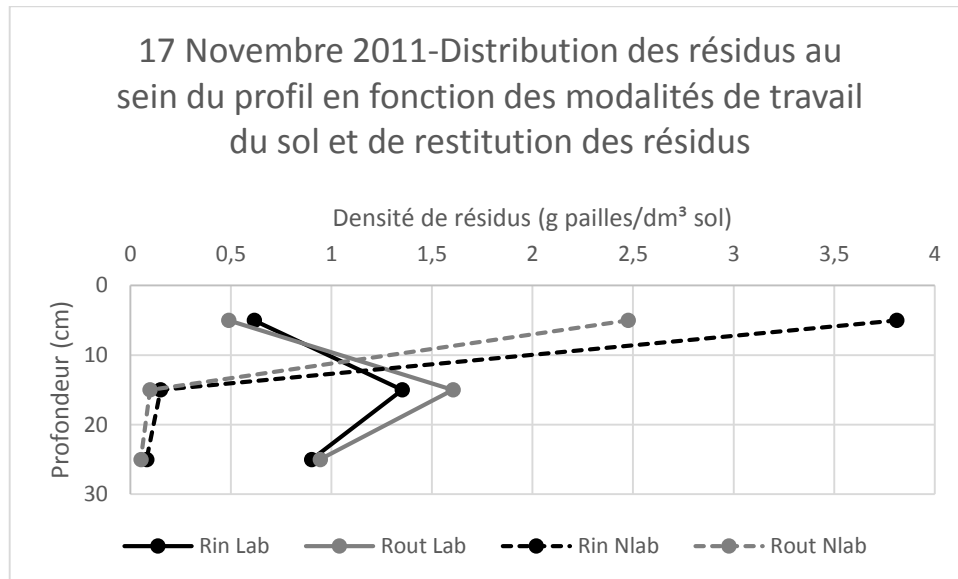


Figure 24. Distribution des résidus de culture au sein du profil en fonction des modalités de travail du sol et de restitution des résidus le 17 Novembre 2011.

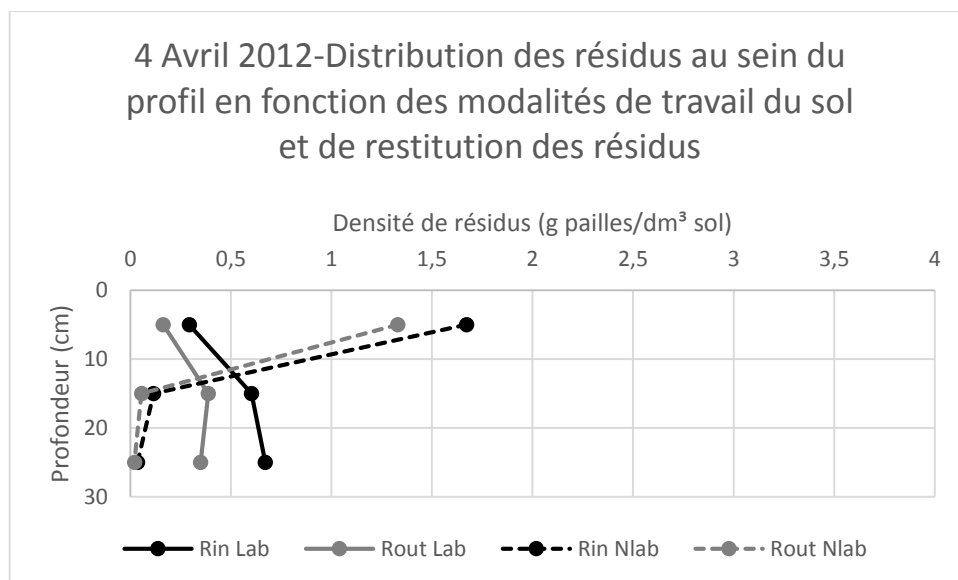


Figure 25. Distribution des résidus de culture au sein du profil en fonction des modalités de travail du sol et de restitution des résidus le 4 Avril 2012.

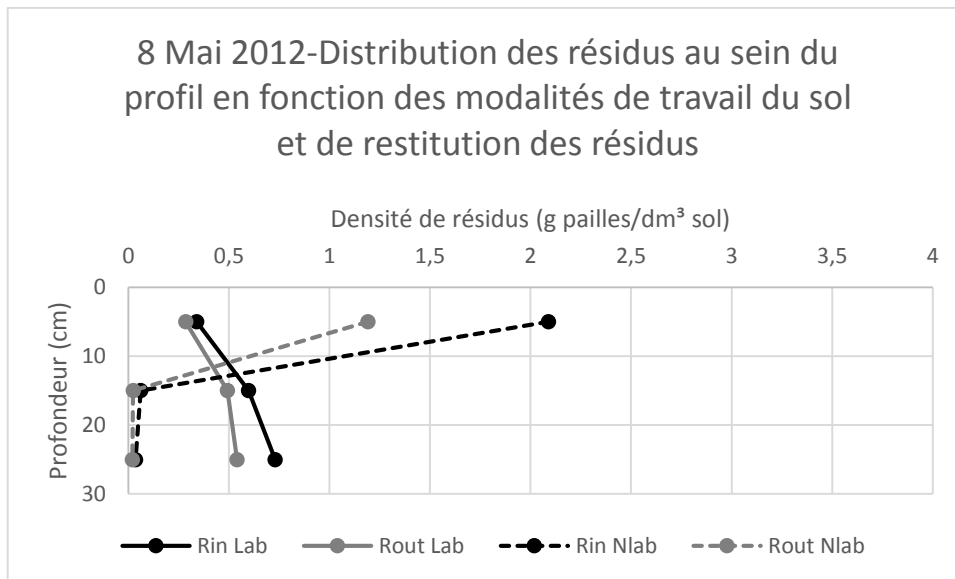


Figure 26. Distribution des résidus de culture au sein du profil en fonction des modalités de travail du sol et de restitution des résidus le 8 Mai 2012.

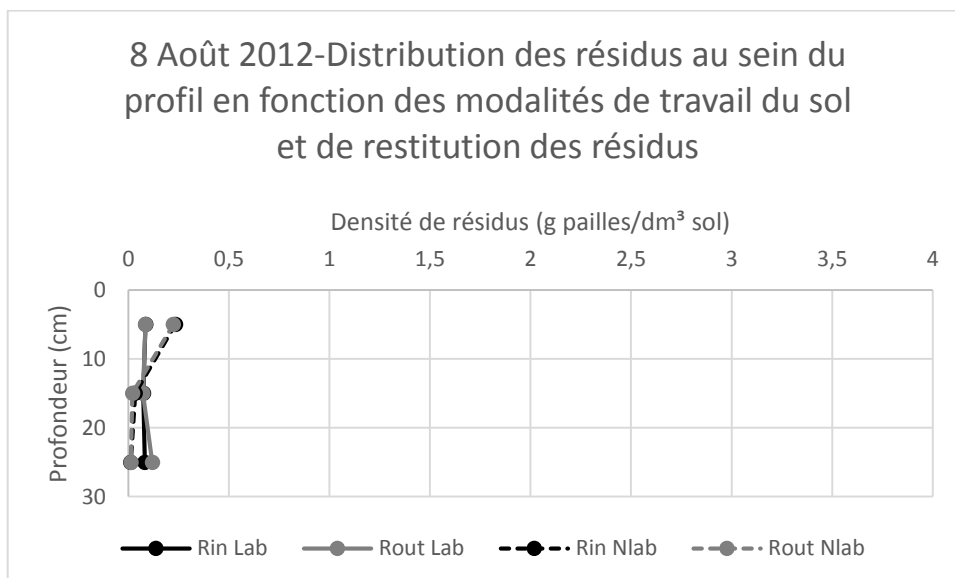


Figure 27. Distribution des résidus de culture au sein du profil en fonction des modalités de travail du sol et de restitution des résidus le 8 Août 2012.

b) Analyse des densités de résidus de culture au sein de chaque date : inférence

Pour chaque date, une interaction très hautement significative a été trouvée entre le facteur travail du sol et le facteur horizon. L'ANOVA 6 a été décomposée d'une part, en 2 ANOVA 5 en fonction du facteur travail du sol et d'autre part, en 3 ANOVA 5 en fonction du facteur horizon. Le mode de restitution des résidus a une influence significative à hautement significative le 4 avril et le 8 mai, respectivement.

Pour la décomposition selon le travail du sol, des différences très hautement significatives ont été observées entre les quantités de résidus mesurées dans les 3 horizons en non-labour. En ce qui concerne le labour, des différences hautement significatives entre les 3 horizons ont été relevées, sauf pour le 8 août 2012. De plus, la distribution des résidus de culture au sein du profil diffère entre les 2 modalités de travail du sol, avec une concentration des résidus dans les 10 premiers cm en non-labour

et une redistribution en profondeur en labour, avec significativement moins de résidus dans l'horizon A. En ce qui concerne les résidus de culture, seule une influence hautement significative a été observée le 8 mai 2012/non-labour.

La décomposition selon l'**horizon** montre des différences globalement très hautement significatives de densité de résidus de culture au sein de chaque horizon entre le labour et le non-labour. De manière significative, plus de résidus dans les 10 premiers cm en non-labour ont été retrouvés par rapport au labour. Cette tendance s'inverse en labour où toujours significativement plus de résidus sont retrouvés dans les horizons B et C. Cependant, 3 interactions entre le travail du sol et le lieu de prélèvement ont été observées, obligeant une décomposition de l'ANOVA 5 en ANOVA 4 en fonction du lieu (ligne ou inter-rang) pour le 8 mai 2012/horizon A, le 8 août 2012/horizon A et le 8 août 2012/horizon B. Des influences du travail du sol hautement significatives (8 mai 2012/horizon A/Ligne et 8 août 2012/horizon A/interligne) à très hautement significatives (8 mai 2012/horizon A/interligne) ont été trouvées. Par ailleurs, une influence significative de la modalité de restitution des résidus a été observée le 17 novembre 2012/horizon A.

#### 4.2.2. Evolution de la décomposition des résidus de culture au cours de la saison culturale dans les 30 premiers cm du profil de sol : analyse inter-dates

##### a) Analyse des densités de résidus entre chaque date : statistiques descriptives

Une décroissance des résidus de culture est bel et bien observée tout au long de la saison culturale pour aboutir le 8 août 2012 à pratiquement 0 g de résidus de culture/dm<sup>3</sup> de sol pour l'ensemble des modalités de travail du sol et de restitution des résidus (figures 28, 29 et 30). Cependant, une légère croissance de la densité de résidus de culture a été observée entre le 4 avril et le 8 mai pour l'ensemble des modalités, sauf pour les objets labour et non-labour/*Résidus In*/Horizon B et les 3 horizons de non-labour/*Résidus Out*.

Les tendances de distribution des résidus en fonction de la modalité de travail du sol sont ici également bien visibles : une concentration des résidus de culture dans le haut du profil en non-labour et une redistribution au sein des 3 horizons en labour. De plus, toujours plus de résidus en modalité de restitution que lors d'une exportation des résidus sont bel et bien observés, à part pour la modalité de labour *Résidus Out*, horizons B et C, le 17 novembre 2011 et le 8 août 2012, labour, horizon C où une légère différence, avec une densité de résidus légèrement plus élevée en *Résidus Out* qu'en *Résidus In* est présente.

Concernant la dynamique de dégradation, entre le 17 novembre 2011 et le 4 avril 2012, dans les 10 premiers cm du sol, en labour *Résidus In*, 52% des résidus ont été dégradés, 67% en labour *Résidus Out*, 56% en non-labour *Résidus In* et 46% en non-labour *Résidus Out*. En labour, la dégradation fut plus rapide en parcelles avec exportation des résidus (A=67% ; B=76% ; C=63% ; B+C=71%) qu'en parcelle avec restitution (A=52% ; B=55% ; C=26% ; B+C=43%). Entre le 17 novembre 2011 et le 8 août 2012, dans les 10 premiers cm du sol, en labour *Résidus In*, 86% des résidus ont été dégradés, 83% en labour *Résidus Out*, 94% en non-labour *Résidus In* et 91% en non-labour *Résidus Out*.

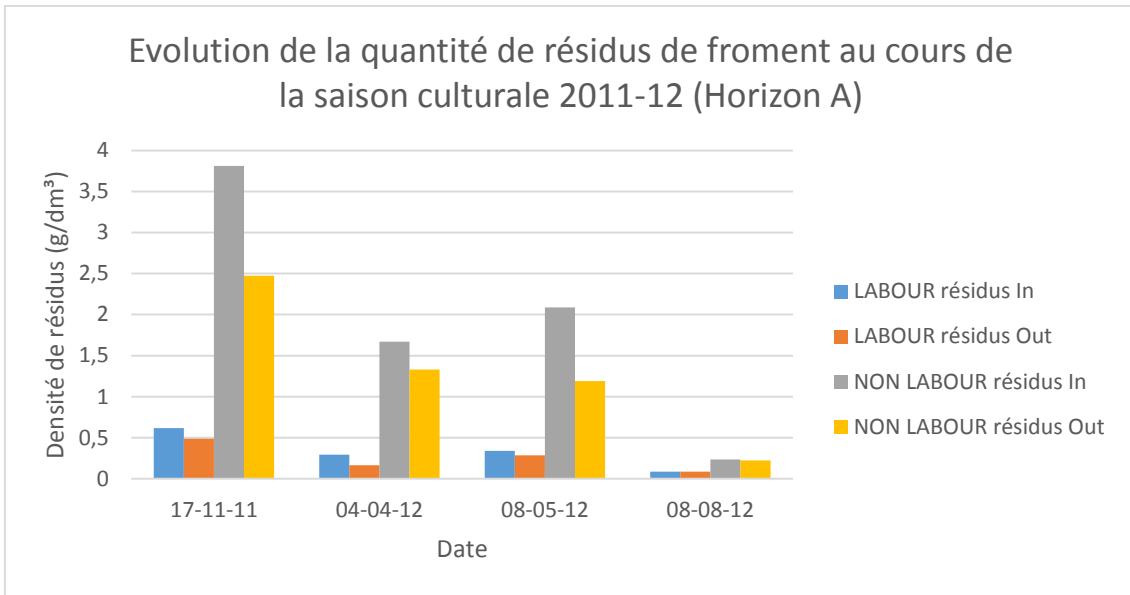


Figure 28. Evolution de la quantité de résidus de froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon A).

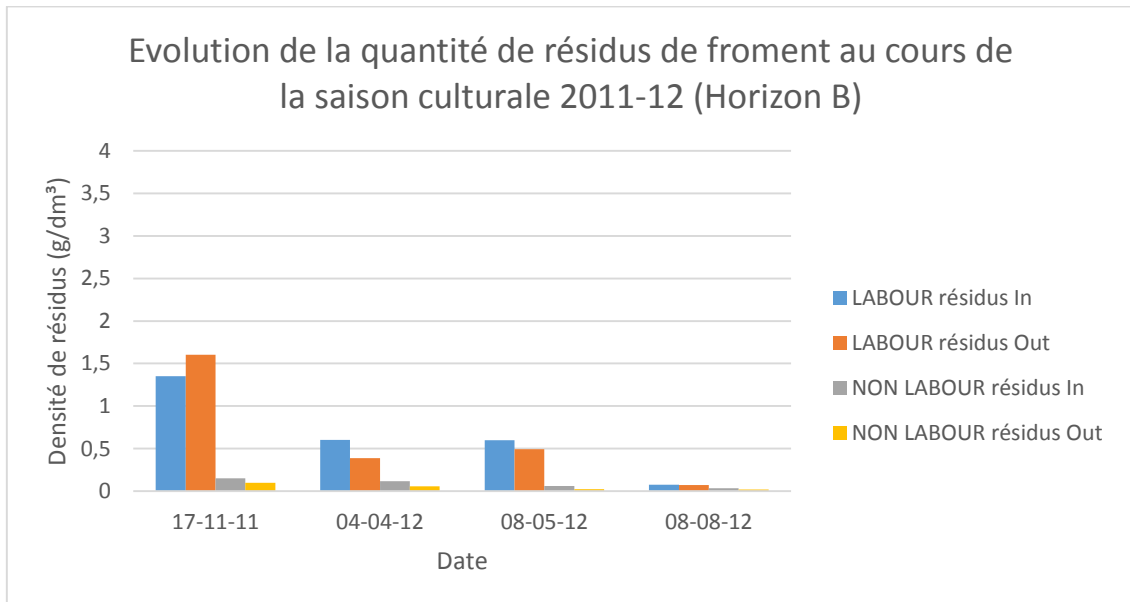


Figure 29. Evolution de la quantité de résidus de froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon B).

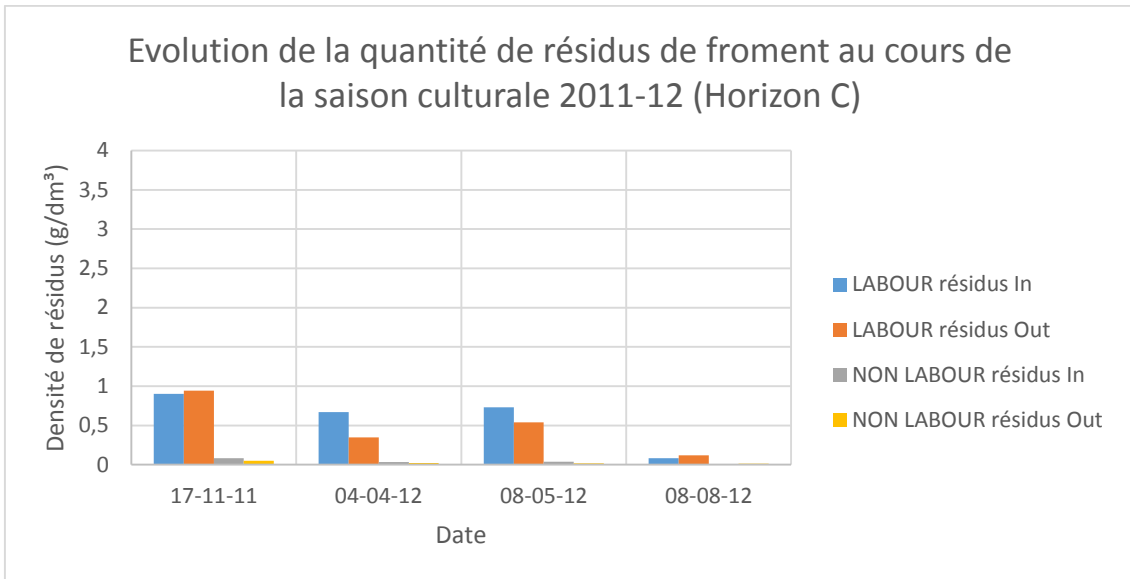


Figure 30. Evolution de la quantité de résidus de froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon C).

b) Analyse des densités de résidus entre chaque date : inférence

Une diminution significative de la quantité de résidus de culture au sein de chaque horizon au cours de la saison est observée (figures 31 et 32). Cependant, une quantité légèrement plus élevée de résidus de culture a été notée pour l'horizon A (p-valeur = 0,043) en labour. Cette quantité légèrement plus élevée n'a pas été observée en non-labour.

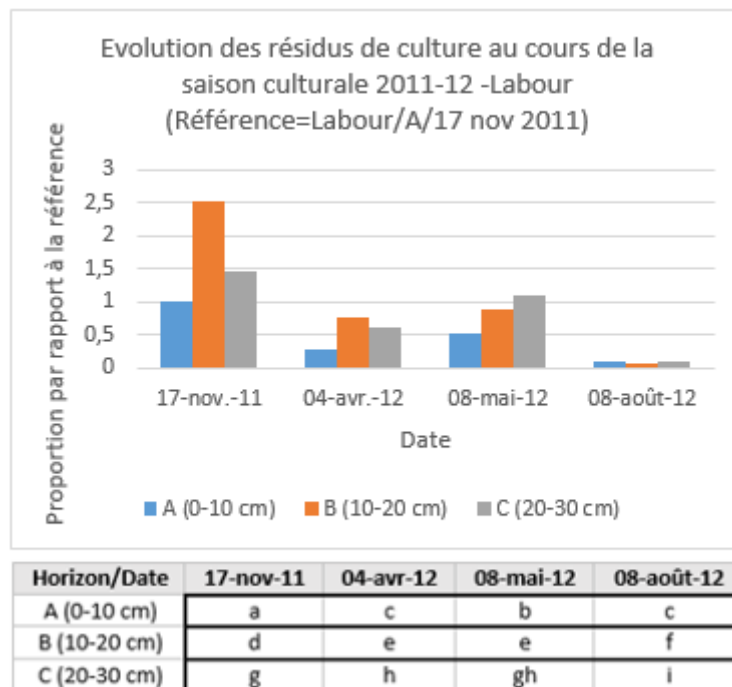


Figure 31. Evolution des résidus de culture au cours de la saison culturale 2011-12- Modalité Labour. Toutes les valeurs sont exprimées proportionnellement à l'objet Labour/Horizon A/17 Novembre 2011. Au sein de chaque horizon, des lettres différentes entre dates signifient que des différences significatives de densités de résidus existent entre ces dates.

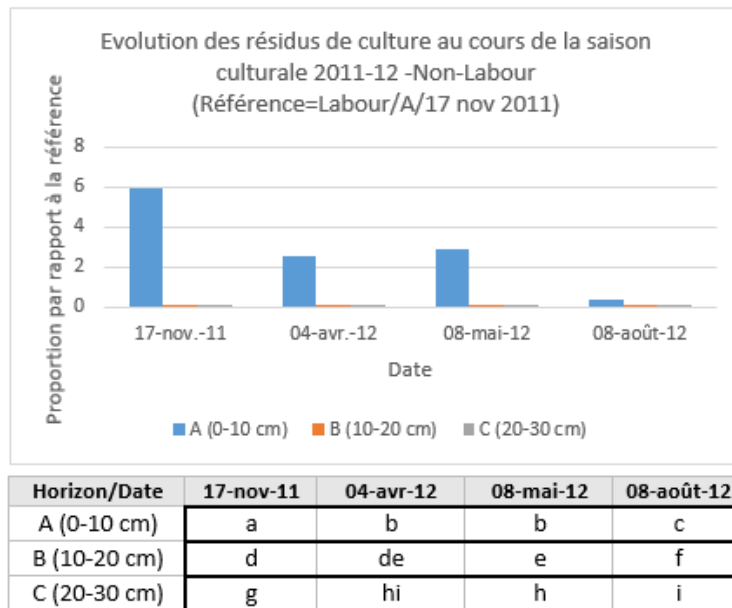


Figure 32. Evolution des résidus de culture au cours de la saison culturale 2011-12- Modalité Non-Labour. Toutes les valeurs sont exprimées proportionnellement à l'objet Labour/Horizon A/17 Novembre 2011. Au sein de chaque horizon, des lettres différentes entre dates signifient que des différences significatives existent entre ces dates.

### 4.3. Racines : analyse des résultats

#### 4.3.1. Distribution racinaire au sein des 30 premiers cm du profil de sol : analyse intra-dates

##### a) Analyse des densités de racines au sein de chaque date : statistiques descriptives

Le système racinaire présente une distribution différente au sein du profil selon la modalité de travail du sol (figures 33, 34, 35 et 36). En effet, une plante de froment cultivée en non-labour concentre le développement de son système racinaire dans les 10 premiers cm du sol. A contrario, le labour semble permettre un meilleur développement du système racinaire en profondeur, avec une densité racinaire plus élevée entre 10 et 30 cm comparativement au non-labour (tableau 8). Une analyse comparative a de nouveau été réalisée (tableau 9) en calculant la proportion de système racinaire présent dans les 10 premiers cm du sol, par rapport aux 30 cm de sol étudiés. Ce tableau met en évidence que le système racinaire d'une plante cultivée en terre labourée présentera un développement plus rapide en profondeur qu'une plante cultivée en non-labour où la plante développera son système racinaire profond plus tard. Ceci est souligné par les différences en termes de proportion de densités de racines dans l'horizon 0-10 cm entre les 2 modalités de travail du sol (tableau 9). Par ailleurs, les densités racinaires totales sommées sur l'ensemble du profil sont légèrement plus élevées en labour le 17 novembre 2011 et le 8 mai 2012, mais légèrement inférieures le 4 avril 2012 et le 8 août 2012, comparativement au non-labour (tableau 8).

Tableau 8. Densités racinaires moyennes (g/dm<sup>3</sup>) selon la modalité de travail du sol. Les données surlignées en gris clair sont les données les plus élevées au cours d'une date donnée, pour un horizon donné. Ceci permet une comparaison des données entre les 2 modalités de travail du sol (Labour et Non-labour).

Date	Travail du sol	A (0-10 cm)	B (10-20 cm)	C (20-30 cm)
17-nov-11	Labour	0,155	0,239	0,206
	Non-labour	0,389	0,073	0,064
04-avr-12	Labour	0,187	0,229	0,220
	Non-labour	0,409	0,161	0,080
08-mai-12	Labour	0,650	0,479	0,429
	Non-labour	0,848	0,396	0,238
08-août-12	Labour	0,239	0,124	0,126
	Non-labour	0,276	0,141	0,106

Tableau 9. Pourcentages du système racinaire présent dans l'horizon 0-10 cm par rapport à l'ensemble du profil étudié pour chaque date et pour les 4 objets.

Modalité	Pourcentages du système racinaire présent dans l'horizon 0-10 cm par rapport à l'horizon 0-30 cm pour chaque date			
	17-11-11	04-04-12	08-05-12	08-08-12
Labour – Résidus In	32%	31%	43%	51%
Labour – Résidus Out	20%	27%	40%	46%
Non-labour – Résidus In	75%	61%	56%	48%
Non-labour – Résidus Out	72%	64%	58%	57%

Concernant l'influence de la modalité de restitution des résidus de culture, aucune tendance ou relation ne peut être déduite sur base de nos mesures. En effet, parfois, le système racinaire se développe mieux avec restitution des résidus, d'autres fois, c'est le contraire qui est observé. Ceci varie également selon les horizons et les différentes modalités de travail du sol sans que de tendance claire puisse être déduite. C'est pour cette raison que les moyennes du tableau 8 ont été calculées en regroupant les données de RIn et ROut.

Une légère diminution de la densité de racines entre le 17 novembre 2012 et le 4 avril 2012 a été notée pour les modalités non-labour Résidus In/horizon A ( $\Delta = 0.08 \text{ g/dm}^3$ ) et Labour Résidus Out/horizons B ( $\Delta = 0.05 \text{ g/dm}^3$ ) et C ( $\Delta = 0.04 \text{ g/dm}^3$ ). Cependant, sur base des figures 33 et 34, une stagnation de la croissance du système racinaire entre novembre et avril 2012 puis une augmentation importante de la densité racinaire entre avril et mai 2012 (figures 34 et 35) peuvent déjà être observées. Ensuite, une forte décroissance est observée entre le 8 mai et le 8 août 2012 (figures 35 et 36). Cette évolution sera également mise en évidence avec les courbes de croissance saisonnières dans la suite de ces résultats.

Une variabilité assez élevée a été observée entre les différents échantillons d'une même modalité, avec des coefficients de variation le plus souvent sous 40% mais avec un maximum de 84% le 8 août 2012/Labour/Horizon C/Résidus In.

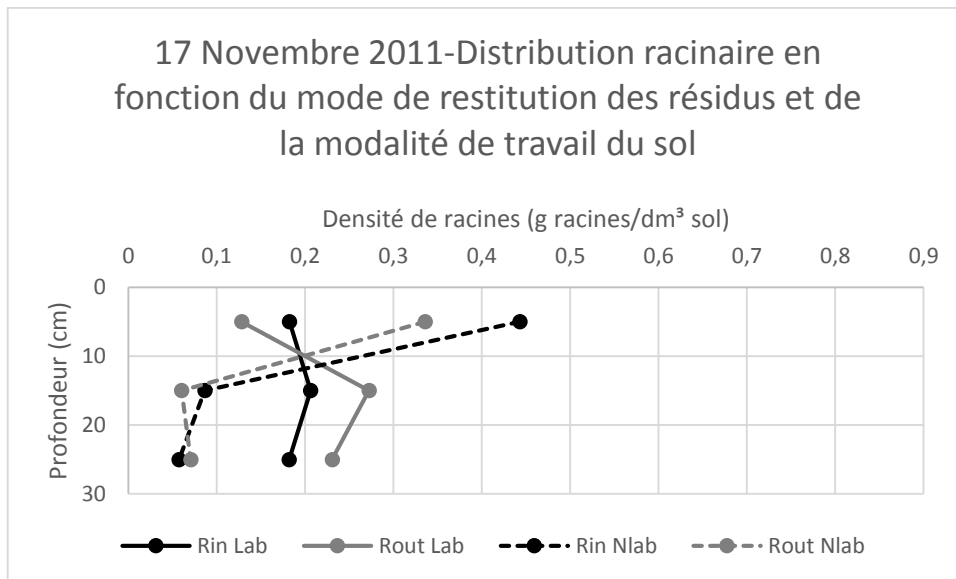


Figure 33. Distribution racinaire en fonction du mode de restitution des résidus et de la modalité de travail du sol le 17 Novembre 2011.

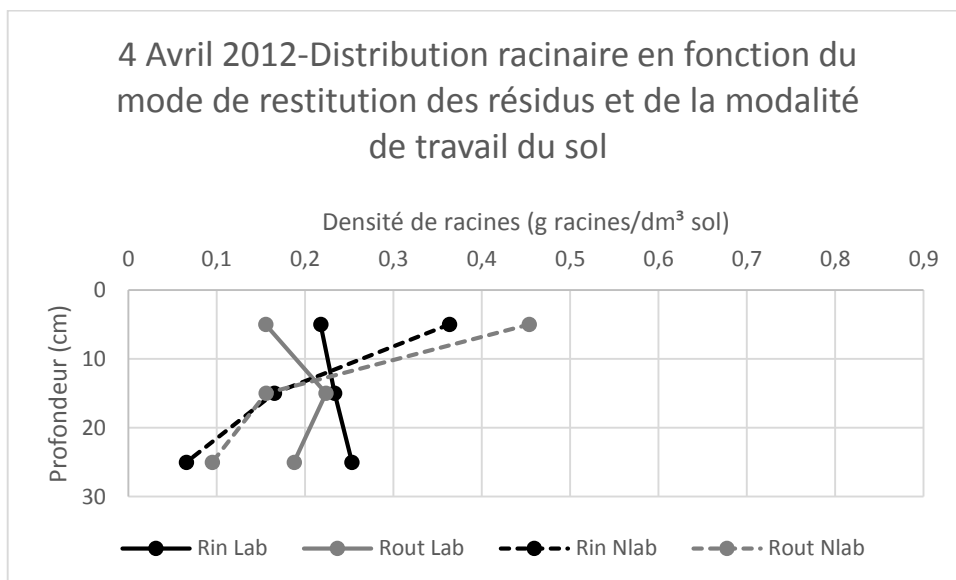


Figure 34. Distribution racinaire en fonction du mode de restitution des résidus et de la modalité de travail du sol le 4 Avril 2012.



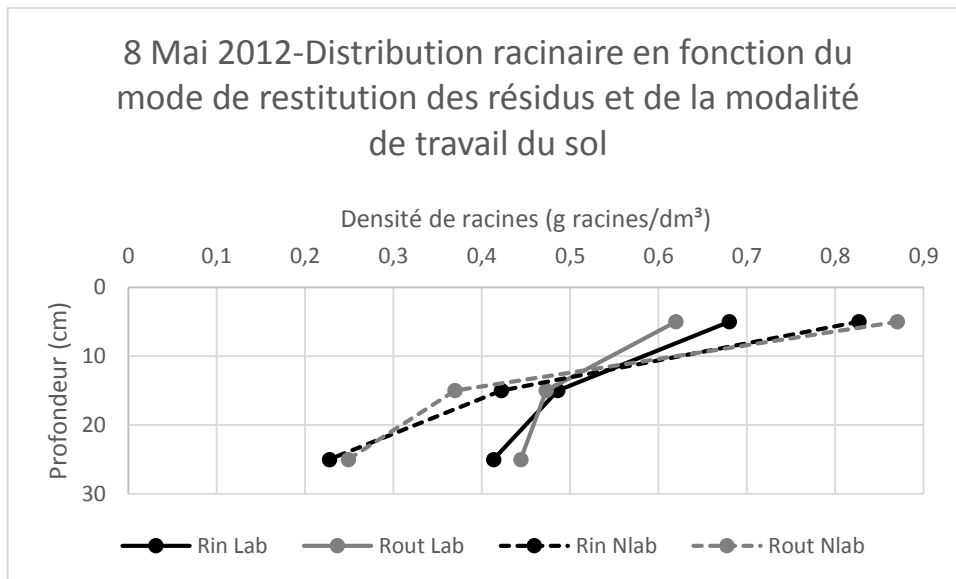


Figure 35. Distribution racinaire en fonction du mode de restitution des résidus et de la modalité de travail du sol le 8 Mai 2012.

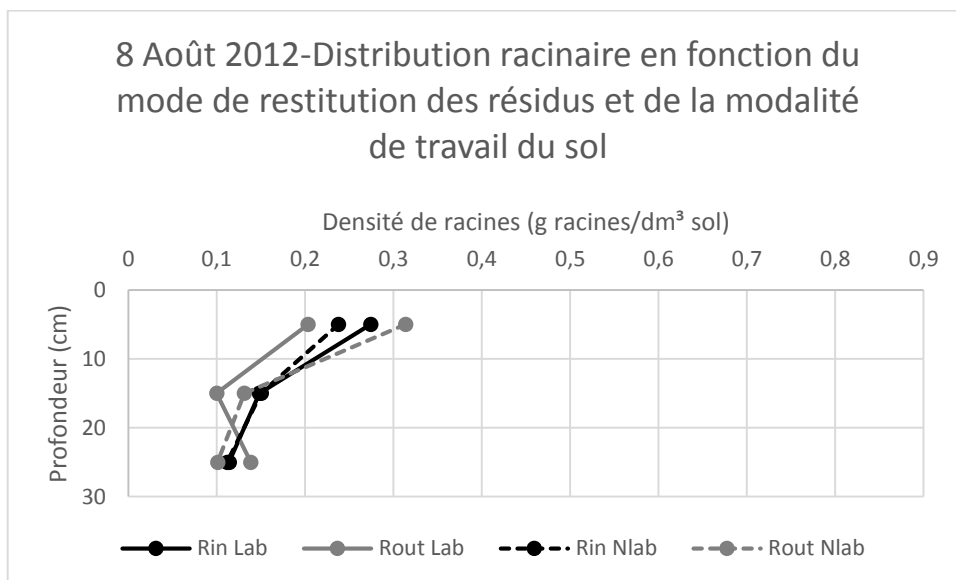


Figure 36. Distribution racinaire en fonction du mode de restitution des résidus et de la modalité de travail du sol le 8 Août 2012.

b) Analyse des densités de racines au sein de chaque date : inférence

Lors de l'examen des résultats de l'ANOVA 6, des interactions très hautement significatives entre l'horizon et le travail du sol ont été constatées dans les 3 premières dates. Le 8 août, seule une interaction entre le facteur horizon et le facteur lieu a été observée. Une décomposition en 3 ANOVA 5 en fonction de l'horizon et en 2 ANOVA 5 en fonction du mode de travail du sol ont ensuite été réalisées. En outre, concernant la modalité de restitution des résidus, aucune influence significative n'a été observée pour le 8 mai et le 8 août 2012. Pour les 2 autres dates, la modalité de restitution des résidus était en interaction avec le facteur horizon (17 novembre 2011) ou travail du sol (4 avril 2012).

Pour la décomposition des ANOVA 6 en ANOVA 5 en fonction du **travail du sol**, des différences significatives de densités racinaires pour les 3 premières dates existent entre les différents horizons,

en non-labour. Une diminution significative de la densité racinaire au fur et à mesure que l'on descend en profondeur dans le profil a ainsi pu être observée, avec une plus grande densité de racines retrouvée dans les 10 premiers cm du sol. Par ailleurs, une tendance inverse a été observée en labour, avec une distribution plus homogène du système racinaire dans le profil le 17 novembre 2011 (p-valeur facteur horizon=0.01) et le 4 avril 2012 (p-valeur facteur horizon=0.5) puis ensuite une densité de racines significativement plus élevée dans les 10 premiers cm du sol le 8 mai 2012 (p-valeur facteur horizon <0.001) et le 8 août 2012 (p-valeur facteur horizon=0.01). Le 8 août 2012, en non-labour, une interaction significative entre la modalité de restitution des résidus, l'horizon et le lieu de prélèvement a mené à une décomposition de l'ANOVA 5 en ANOVA 3 en fonction du mode de restitution des résidus et du lieu de prélèvement. Des différences significatives à hautement significatives entre les 3 horizons ont été trouvées sauf pour l'objet 8 août 2012 non-labour/Ligne/Résidus In. Concernant l'influence des résidus de culture, une influence à peine significative (p-valeur = 0.047) a été trouvée le 4 avril 2012/labour.

Pour la décomposition des ANOVA 6 en ANOVA 5 en fonction de l'**horizon**, excepté le 8 août 2012, des différences significatives à très hautement significatives de densités racinaires entre le labour et le non-labour au sein de chaque horizon sont observées. Pour les 3 premières dates, une densité racinaire toujours significativement plus élevée dans les 10 premiers cm en non-labour qu'en labour est observée alors que cette tendance s'inverse pour les 2 autres horizons. Le 8 août 2012, plus aucune différence n'est observée entre les modalités labour et non-labour. 3 interactions ont cependant été relevées : entre travail du sol et restitution des résidus le 4 avril 2012/ horizon A, le 8 mai 2012/horizon B entre les facteurs travail du sol, horizon et lieu de prélèvement et le 8 août 2012/horizon B entre les facteurs lieu de prélèvement et mode de restitution des résidus. La décomposition en ANOVA 4 en fonction du mode de restitution des résidus le 4 avril 2012 montre une influence significative (*Résidus In*) à hautement significative (*Résidus Out*) du travail du sol sur la densité racinaire. D'autre part, la décomposition en ANOVA 3 du 8 mai 2012/horizon B en fonction du mode de restitution des résidus et du lieu de prélèvement montre une différence significative en termes de densité racinaire entre le labour et le non-labour seulement pour le 8 mai 2012/horizon B/Résidus Out/Interligne. Des différences de densités racinaires à peine significatives (p-valeur = 0.045) le 8 août 2012/horizon B/ligne et significatives le 17 novembre 2012/horizon A ont été notées entre les 2 modalités de restitution des résidus de culture.

#### 4.3.2. Courbes de croissance du système racinaire du froment d'hiver au cours de la saison dans les 30 premiers cm du profil de sol : analyse inter-dates

##### a) Analyse des densités de racines entre chaque date : statistiques descriptives

Comme signalé précédemment dans la comparaison intra-dates, la stagnation du système racinaire entre le 17 novembre 2011 et le 4 avril 2012 est ici clairement visible, horizon par horizon (figures 37, 38 et 39). Par la suite, le système racinaire croît de manière importante entre le 4 avril et le 8 mai. Ensuite, la densité racinaire diminue fortement entre le 8 mai et le 8 août pour retrouver une densité racinaire semblable à celle observée aux mois de novembre et d'avril. Ajoutons également que la densité de racines au mois d'août est semblable au sein de chaque horizon entre les différentes modalités de travail du sol et de restitution des résidus de culture.

En ce qui concerne la relation entre la restitution ou non des résidus de culture et la densité racinaire, aucune tendance claire ne peut être déduite des résultats obtenus. Cependant, en labour/*Résidus In*/Horizon A, la densité de racines est toujours supérieure dans la modalité avec restitution des résidus de culture.

Les mêmes tendances que celles développées précédemment lors de l'analyse intra-dates peuvent être dégagées sur base de ces graphiques. En effet, par rapport aux plantes cultivées en terre labourée, les plantes cultivées en non-labour développent davantage de racines dans l'horizon A et développent moins de racines en profondeur. Par conséquent, une plus grande densité racinaire est retrouvée dans l'horizon A en non-labour qu'en labour mais par contre, cette tendance s'inverse pour les horizons B et C.

La comparaison des graphiques 37, 38 et 39 permet de voir que, quel que soit le mode de travail du sol ou la modalité de restitution des résidus de culture, le 8 mai 2012, une large partie du système racinaire est proportionnellement retrouvée dans les 10 premiers cm du profil. En effet, le tableau 9 permet de voir qu'en labour, le 8 mai 2012, environ 40% du système racinaire des 3 horizons supérieurs se trouvent dans les 10 premiers cm du profil, environ 57% en non-labour. Par conséquent, le 8 mai 2012, les différences entre labour et non-labour en termes de distribution du système racinaire sont donc moins marquées qu'en début de saison.

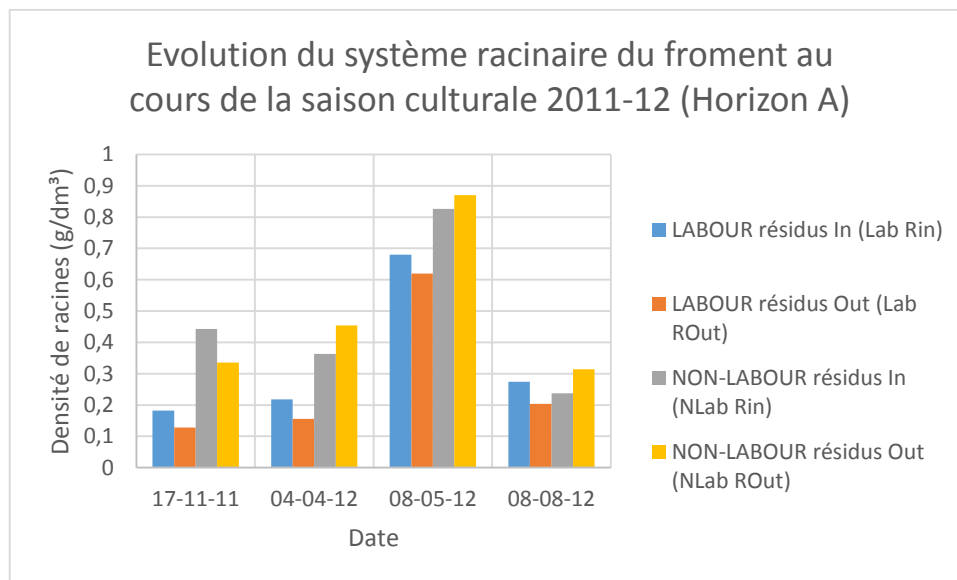


Figure 37. Evolution du système racinaire du froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon A).

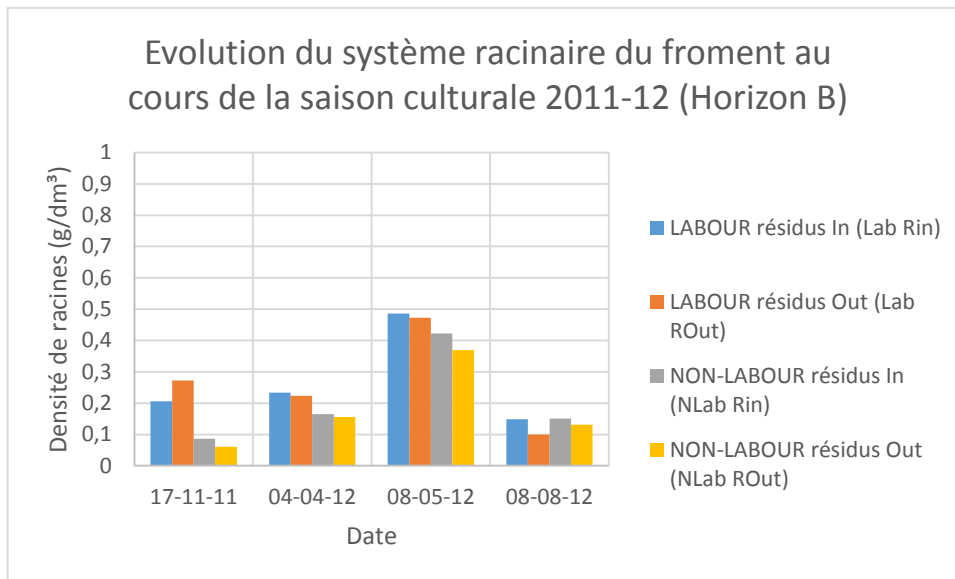


Figure 38. Evolution du système racinaire du froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon B).

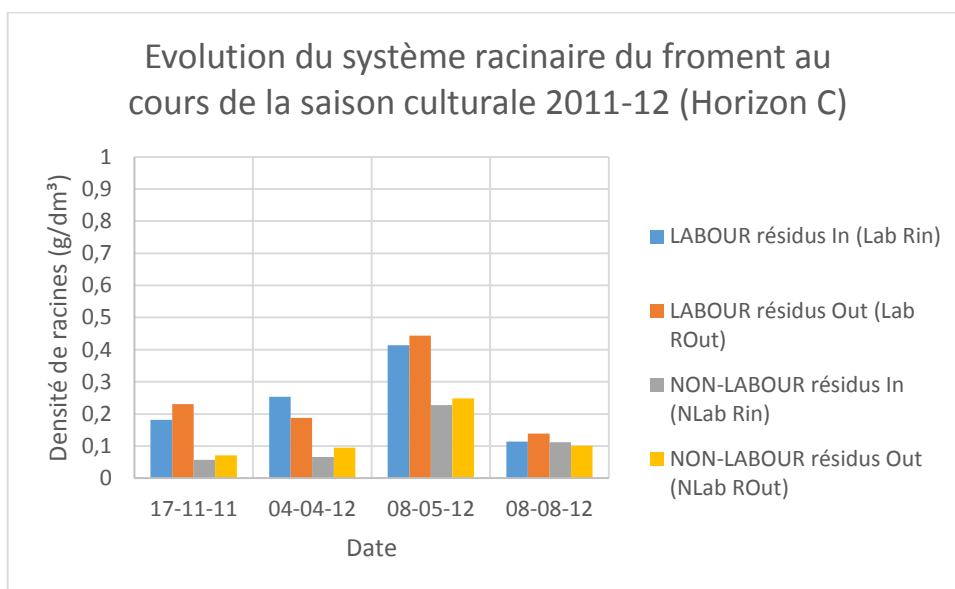


Figure 39. Evolution du système racinaire du froment au cours de la saison culturale 2011-12 (Horizon C).

#### b) Analyse des densités de racines entre chaque date : inférence

Une croissance significative du système racinaire jusqu'au 8 mai 2012 puis une décroissance significative sont observées (figures 40 et 41). En effet, du 17 novembre 2011 au 4 avril 2012, le système racinaire ne croît pas, à part pour l'horizon B en non-labour où une différence significative de densité de racines entre les 2 dates a été observée. Ensuite, le système racinaire croît de manière importante jusqu'au 8 mai 2012. A partir de ce moment-là, une décroissance de la densité racinaire est observée pour revenir le 8 août 2012 à des densités racinaires similaires à celles rencontrées en début de saison. Cependant, les densités racinaires étaient significativement plus faibles le 8 août qu'en début de saison dans les horizons B et C en situation de labour et dans l'horizon A en situation de non-labour.

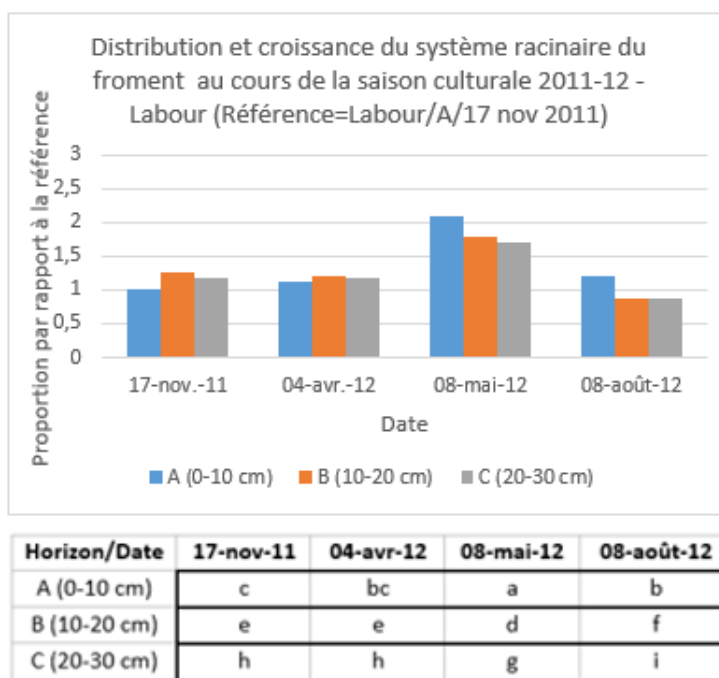


Figure 40. Evolution du système racinaire au cours de la saison culturale 2011-12- Modalité Labour. Toutes les valeurs sont exprimées proportionnellement à l'objet Labour/Horizon A/17 Novembre 2011. Au sein de chaque horizon, des lettres différentes entre dates signifient que des différences significatives de densités racinaires existent entre ces dates.

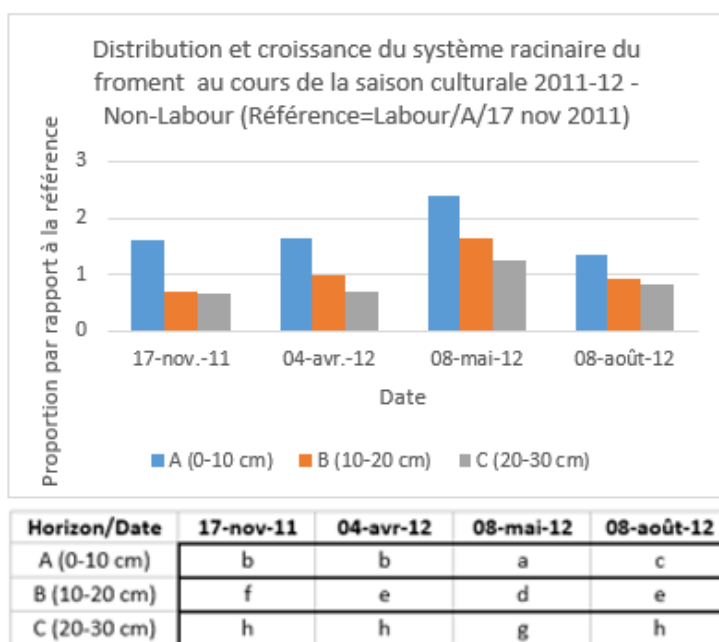


Figure 41. Evolution du système racinaire au cours de la saison culturale 2011-12- Modalité Non-Labour. Toutes les valeurs sont exprimées proportionnellement à l'objet Labour/Horizon A/17 Novembre 2011. Au sein de chaque horizon, des lettres différentes entre dates signifient que des différences significatives de densités racinaires existent entre ces dates.

## 5. Interprétation des résultats

### 5.1. Inférence : pourquoi les conditions d'application n'étaient-elles pas respectées ?

Nos données de densités de résidus de culture et de densités de racines ne respectaient pas les hypothèses de normalité et d'égalité des variances. L'absence de normalité peut être expliquée par 3 éléments :

- Des propriétés intrinsèques aux données. En effet, Zhang et al. (2012) affirment que dans les études en champs, l'hétérogénéité du sol et plus précisément la résistance mécanique du sol, perturbent souvent la normalité de la distribution des RLD (Root Length Density). D'autres études relatent la transformation des données racinaires mesurées avant analyse statistique (Qin et al., 2004 ; Plaza-Bonilla et al., 2013) ;
- Un nombre d'échantillons trop faible ;
- Des prédictions non-aléatoires dues à la méthode de quantification en elle-même. En effet, une variabilité des données acquises grâce à la caméra hyperspectrale proche infrarouge a été observée au cours du temps.

L'absence d'égalité des variances peut être expliquée par le fait qu'une grande partie des données présentent une valeur faible. Quelques données seulement sont très élevées.

### 5.2. Distribution et évolution de la quantité de résidus de culture au cours du temps dans l'horizon 0-30 cm

#### 5.2.1. Distribution des résidus de culture dans l'horizon 0-30 cm en lien avec le travail du sol

Une **forte influence du travail du sol** a été observée, d'une part lors de l'analyse statistique descriptive et d'autre part, lors de l'inférence. En effet, sur base de nos données, nous observons un mélange des résidus de culture dans les 10 premiers centimètres du profil en non-labour. Ce sont près de 90 % des résidus totaux qui sont concentrés dans cet horizon. En revanche, en modalité de labour, 76 % (Labour-Résidus In) à 78 % (Labour-Résidus Out) des résidus de culture se retrouvent enfouis entre 10 et 30 cm de profondeur. Ces résultats sont logiques puisque le travail du sol a été réalisé à 25-30 cm en ce qui concerne le labour, mais jamais sous 10 cm en non-labour.

L'inférence ultérieure a révélé les mêmes tendances, avec une interaction très hautement significative entre les facteurs « travail du sol » et « horizon », ce qui signifie bien que ces 2 facteurs sont fortement liés. De plus, lors de la décomposition de l'ANOVA 6, des influences toujours significatives à très hautement significatives ont été trouvées pour ces 2 facteurs, permettant de valider les tendances que nous avons déduites des graphiques lors de l'analyse statistique descriptive.

Ces résultats concordent avec ceux de Vancutsem et al. (2012) obtenus sur le même essai. Concernant l'impact du travail du sol, les auteurs ont trouvé les mêmes tendances de distribution des résidus de culture, avec des pourcentages de résidus de froment enfouis présents dans la couche 10-30 cm en labour variant de 77 à 85 % durant la saison culturale 2010-2011. Nos résultats concordent également avec ceux de Staricka et al. (1991, cité par Guérif et al., 2001) qui ont étudié la distribution de résidus d'avoine en fonction du travail du sol. Les auteurs ont trouvé que le labour incorporait au moins 75 % des résidus sous 15 cm lorsque la profondeur de travail de l'outil était de 27-30 cm. Par contre, le chisel incorpore rarement les résidus de culture sous 10 cm et pénètre rarement sous 15 cm.

Selon Allmaras et al. (1988), au moins 85 % de la matière organique incorporée se trouve au-dessus de 10 cm après un travail du sol au chisel contrairement au labour où plus de 45 % de cette matière organique était retrouvée sous 10 cm. Selon Allmaras et al. (1996, cités par Guérif et al., 2001), tous les outils de travail du sol distribueraient les résidus de culture de manière hétérogène, avec une distribution très groupée des résidus. Conséquemment, des zones seraient dépourvues de résidus de culture, en fonction de la quantité de résidus incorporés.

Sur base de ces résultats, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une telle différence de quantité de résidus entre les différents horizons en labour et non-labour a des répercussions sur les propriétés du sol dans ces 2 modalités, notamment sur la **teneur en carbone organique**. Cette hypothèse devra être confrontée à l'avenir avec des analyses de teneur en carbone dans les différents horizons en fonction du mode de travail du sol. Cependant, de nombreux articles font déjà état du sujet. En effet, selon Dolan et al. (2006), le travail du sol et la gestion des résidus de culture ont un impact non négligeable sur la séquestration du carbone. Wander et al. (1998, cités par Dolan et al., 2006) et Deen et Kataki (2003, cités par Dolan et al., 2006) ont tous 2 démontré que certes, les teneurs en carbone organique du sol sont plus élevées dans la partie supérieure du sol en no-tillage, mais qu'en général, moins de carbone organique est présent dans les parties plus profondes du profil comparé au travail du sol conventionnel. Sur un essai de plus de 20 années avec une rotation maïs-soja aux USA, Dolan et al. (2006) ont comparé les systèmes de no-tillage, d'utilisation du chisel et d'utilisation de la charrue. Ils ont pu démontrer que les traitements no-tillage et utilisation d'un chisel présentent des teneurs plus élevées en carbone organique du sol et en azote dans la partie supérieure du profil que dans les systèmes utilisant le labour. En revanche, sous 20 cm, les parcelles en labour présentent des teneurs plus élevées en carbone organique du sol et en azote. Baker et al. (2007) affirment que les pratiques de conservation ne montrent pas de grandes accumulations de carbone organique dans le sol mais juste une différence de distribution de ce carbone dans le profil.

De manière plus globale, le travail du sol aura des effets directs et indirects d'une part, sur l'établissement de la culture et d'autre part sur la décomposition des résidus de culture. En effet, le travail du sol influencera directement la fragmentation des résidus et leur distribution ainsi que le placement de la semence dans le lit de semence. Outre cela, le travail du sol affectera indirectement les conditions environnementales, avec des répercussions ensuite sur la décomposition des résidus, la germination de la semence et l'émergence de la plantule (Guérif et al., 2001).

Par ailleurs, lors de l'analyse statistique descriptive, sur l'ensemble du profil étudié, des quantités plus importantes de résidus de culture ont été retrouvées en non-labour qu'en labour. Plusieurs éléments peuvent être à l'origine de cette différence :

- L'échantillonnage au champ : en non-labour, la quasi-totalité des résidus sont concentrés dans les 10 premiers cm, tandis qu'ils sont dilués dans 30 cm en labour. Nous avons donc plus de chances de tomber sur un résidu en non-labour qu'en labour ;
- Une quantité de résidus issus de la culture précédente différente au départ ;
- Une variabilité de distribution dans le sol due aux passages de l'outil de déchaumage lors de l'enfouissement des résidus de culture dans le sol ;
- Une différence en termes de décomposition des résidus entre les 2 systèmes. Ce point sera discuté ultérieurement, lors de l'analyse de la décomposition des résidus de culture.

### 5.2.2. Quantité de résidus mesurée en fonction du mode de restitution des résidus de culture

Lors de l'analyse des graphiques, une quantité toujours plus élevée de résidus de culture est observée en modalité avec restitution, à part pour le 17 novembre 2011, en labour, pour les horizons B et C et le 8 août 2012, labour, horizon C. Lors de l'inférence, une influence significative à hautement significative du mode de restitution des résidus le 4 avril et le 8 mai, respectivement, est observée. Cependant, la différence entre les 2 modalités de gestion des résidus est assez ténue. Ceci

diffère des résultats trouvés par Vancutsem et al. (2012). En effet, ces derniers ont montré une forte différence entre les quantités totales de résidus présentes dans les 30 premiers cm, entre septembre 2009 et août 2011, avec 2 groupes clairement distincts : d'une part, labour-résidus In et non-labour-résidus In et d'autre part, labour-résidus Out et non-labour-résidus Out. Cette tendance n'a pas été observée dans le cas de nos mesures. Or, Degruné et al. (2015) avaient mesuré après la moisson de 2012 8.3 t/ha de résidus de culture en parcelles avec restitution et 4.5 t/ha de résidus de culture en parcelles avec exportation des résidus. Ces mesures montrent que la différence en termes de quantités restituées au  $\text{dm}^2$  est assez grande puisque cela correspond à 8,3  $\text{g}/\text{dm}^2$  et 4,5  $\text{g}/\text{dm}^2$ . Deux causes peuvent être à l'origine de cette faible différence :

- Les problèmes de variabilité et de confusion rencontrés durant l'analyse des spectres à l'aide des modèles d'analyse discriminante, rendant la quantification des résidus imprécise ;
- Par ailleurs, la moisson avait été réalisée le 20 août 2011 et le premier prélèvement le 17 novembre 2011. Entre les 2 dates se sont écoulés 3 mois, période durant laquelle 2 déchaumages et un labour dans les parcelles concernées ont été réalisés. Une dégradation des résidus a donc déjà eu lieu, ce qui expliquerait le peu de différences entre les 2 modalités de restitution des résidus de culture.

Cependant, au total, toujours plus de résidus sont observés en modalité de restitution que lors d'une exportation des résidus, à part pour les modalités de labour-résidus Out, horizon C et labour-résidus Out, horizon B, le 17 novembre 2011 et le 8 août, labour, horizon C où une légère différence est observée, avec une densité de résidus légèrement plus élevée en Résidus Out qu'en Résidus In.

L'amélioration des modèles d'analyse discriminante SVM devrait permettre à l'avenir une discrimination et une quantification plus précises des éléments.

### 5.2.3. Dégradation des résidus de culture de froment au cours de la saison culturale 2011-2012

Une tendance globalement décroissante des densités de résidus de culture au cours de la saison 2011-2012 est observée, pour aboutir le 8 août 2012 à quasiment 0 g de résidus de culture/ $\text{dm}^3$  de sol, révélant une dégradation quasi complète. Ces résultats sont similaires à ceux présentés par Vancutsem et al. (2012). Ces derniers avaient trouvé des densités de résidus (en  $\text{g}/\text{kg}$  de sol) aux alentours de 1 $\text{g}/\text{kg}$  de sol dans l'horizon A en non-labour et de 0.47  $\text{g}/\text{kg}$  de sol sec sur les 3 horizons en labour, en août 2011.

Par ailleurs, des densités de résidus de culture légèrement plus élevées le 8 mai 2012 par rapport au 4 avril 2012 ont été observées pour l'ensemble des modalités, sauf pour les objets labour et non-labour/Résidus In/Horizon B, non-labour/Résidus In/Horizon C et les 3 horizons de non-labour/Résidus Out. Ceci a été observé dans 57 échantillons sur 96. Après analyse statistique sur base des LS Means, seule une différence significative entre avril et mai existe en labour, horizon A. Ceci pourrait être dû à la mort des tiges mais si tel était le cas, l'augmentation de quantité de résidus n'aurait alors eu lieu que dans le premier horizon. Cette différence est probablement due à une confusion des modèles entre les pailles et les racines, davantage de racines étant présentes à cette date. L'analyse d'un standard « racines » au cours du temps et une meilleure calibration des modèles permettront une quantification plus précise. D'autre part, ces valeurs plus élevées peuvent être expliquées par le caractère aléatoire des prélèvements et la répartition non homogène des résidus de culture.



Une décroissance entre le 17 novembre et le 4 avril de l'ordre de 43% en labour, résidus In et de 71% en labour, résidus Out dans la couche 10-30 cm a été observée. En non-labour, résidus In, une décroissance de 56% et en non-labour résidus Out, une décroissance de 46% ont été observées dans l'horizon 0-10 cm. Ces chiffres sont similaires à ceux observés par Vancutsem et al. (2012). En effet, lors de la saison culturale 2009-2010, ils avaient observé une décroissance des résidus de l'ordre de 58% en labour *résidus In* (horizon 10-30 cm) et de 50% en non-labour *résidus In*, horizon 0-10 cm entre novembre 2009 et juin 2010. Comparer des dégradations d'années en années n'est pas aussi aisé qu'on pourrait le penser. En effet, de multiples facteurs tels la météo, la disponibilité en nutriments pour les micro-organismes décomposeurs ou la quantité de résidus de départ influencent la quantité de résidus finale.

Par ailleurs, les résultats de décomposition des résidus de culture au cours de la saison sont assez similaires en labour et non-labour, montrant que la décomposition des résidus de culture est peu liée à la profondeur d'enfouissement, comme l'ont montré précédemment Vancutsem et al. (2012).

La **décomposition** en labour avec exportation des résidus a été plus forte qu'en labour avec restitution des résidus, entre le 17 novembre et le 4 avril. La tendance inverse a été observée en non-labour. Les résultats observés en labour pourraient être expliqués par les observations de Degrune et al. (2015) qui, sur le même site d'essai, ont observé une plus grande richesse fongique en modalité avec exportation des résidus qu'avec restitution des résidus. Cette observation pourrait être expliquée par 2 éléments :

- Le fait qu'un groupe microbien soit favorisé par rapport aux autres lors de la restitution des résidus de culture. En effet, Killham et al. (1984, cités par Cookson et al., 1997) ont découvert des populations plus élevées de champignons cellulolytiques là où les résidus étaient réincorporés que là où ils étaient retirés. Ils ont ainsi conclu que l'incorporation répétée des résidus de culture favorise le développement d'une communauté microbienne adaptée au substrat qui augmente la vitesse de décomposition des pailles (Killham et al., 1984, cités par Cookson et al., 1997). Ceci entraînerait le fait que la population cellulolytique soit surreprésentée.
- Les fongicides appliqués sur les céréales auraient peut-être un impact sur la microflore du sol. La réincorporation de plus de résidus en modalité de restitution impacterait alors de manière plus importante la microflore (Destain, communication personnelle).

Cependant, la tendance observée en labour est assez surprenante. En effet, Cookson et al. (1997, étude néo-zélandaise) ont démontré que la restitution des résidus de culture stimule la vie microbienne du sol et induit donc une vitesse plus élevée de dégradation. Ces derniers avaient comparé 3 traitements : la restitution des résidus, leur exportation ou leur brûlage. Dans les parcelles dans lesquelles les résidus étaient restitués au sol, une perte de masse 33% plus grande que lors d'un brûlage ou d'une exportation avait été observée. Ceci concordait avec l'activité microbiologique qui était 30% plus élevée sur les pailles des parcelles où il y avait eu restitution que dans les 2 autres modalités. Par leurs recherches, ils avaient pu démontrer que l'incorporation répétée des résidus de culture au niveau du sol pouvait induire un changement dans l'activité des microorganismes décomposeurs. Ceci pourrait expliquer d'une part, la dégradation plus élevée en Résidus In qu'en Résidus Out observée entre le 17 novembre 2011 et le 8 août 2012 et d'autre part, la plus forte décomposition en non-labour (en moyenne 92.5% des résidus dégradés entre les 2 dates) qu'en labour (en moyenne 84.5% des résidus dégradés entre les 2 dates), dans les 10 premiers cm du sol. Par conséquent, le type de gestion des résidus de culture appliqué peut constituer un facteur important dans la nature et l'importance de la dynamique de la matière organique et du cycle des nutriments dans les sols cultivés (Doran, 1980, Holland et Coleman, 1987, Beare, 1997, cités par Cookson et al.,

1997). La composition chimique des résidus végétaux est un facteur important régulant la vitesse de décomposition des résidus (Swift et al., 1979, cité par Cookson et al., 1997). En effet, en combinaison avec les conditions microclimatiques et la disponibilité en nutriments, (Meentemeyer, 1978, Melillo et al., 1982, cités par Cookson et al., 1997), la qualité des résidus influence la composition et l'activité des communautés de décomposeurs qui finalement déterminent la vitesse de décomposition des résidus et la libération de nutriments (Beare et al., 1989, Neely et al., 1991, cités par Cookson et al., 1997).

### 5.3. Distribution et développement du système racinaire au cours de la saison

#### 5.3.1. Analyse de l'influence du travail du sol sur le développement du système racinaire dans les 30 premiers cm du profil de sol

Les densités racinaires totales sommées sur l'ensemble du profil sont légèrement plus élevées en labour le 17 novembre 2011 et le 8 mai 2012, mais légèrement inférieures le 4 avril 2012 et le 8 août 2012, comparativement au non-labour. En ce qui concerne le 17 novembre, ces informations peuvent illustrer un meilleur développement du système racinaire en labour, par rapport au non-labour, en début de saison. Qin et al. (2004) ont observé globalement un RLD plus élevé en travail du sol conventionnel qu'en no-tillage. *A contrario*, Huang et al. (2012) ont observé une densité de poids sec racinaire plus élevée en non-labour par rapport au labour. Ceci peut être dû aux conditions différentes de culture. En effet, selon une revue de la littérature réalisée par Chirinda et al. (2014), les variations de biomasses racinaires entre études peuvent être dues à plusieurs facteurs tels des différences physiologiques entre cultivars, le type et les quantités d'engrais apportées, les pratiques de travail du sol, les conditions climatiques, les propriétés du sol ainsi que des différences de méthodologie d'échantillonnage et de mesure racinaire. Par ailleurs, gardons toujours en tête que les résultats présentés sont calculés sur base de prédictions obtenues suite à l'analyse d'images hyperspectrales à l'aide de modèles d'analyses discriminantes.

Les informations les plus intéressantes se trouvent au niveau de la distribution du système racinaire au sein du profil 0-30 cm en fonction du **travail du sol**. En effet, sur base de l'analyse statistique descriptive, une concentration du système racinaire dans les 10 premiers cm en non-labour est observée contrairement au labour qui permet un développement plus homogène du système au sein du profil. De cette manière, en labour, des densités racinaires plus élevées sont observées dans l'horizon 10-30 cm, comparé au non-labour. Par ailleurs, le système racinaire d'une plante cultivée en terre labourée présentera un développement plus rapide en profondeur qu'une plante cultivée en non-labour où la plante développera son système racinaire profond plus tard. Ces résultats ont été également observés lors de l'inférence. Des densités racinaires significativement plus élevées sont retrouvées dans l'horizon 0-10 cm en non-labour pour les prélèvements des 17 novembre 2011, 4 avril 2012 et 8 mai 2012 par rapport au labour. Cependant, la tendance inverse est observée pour les 2 autres horizons. Les mêmes observations ont été réalisées par Huang et al. (2012) : au stade premier nœud, ces derniers ont observé une densité de poids sec racinaire significativement plus faible dans les 10 premiers cm du sol en travail du sol conventionnel par rapport au no-tillage mais significativement plus élevée dans l'horizon 10-20 cm. Ceci pourrait être expliqué par l'impact du travail du sol sur le développement racinaire. En effet, en non-labour, seul l'horizon 0-10 cm est

Tableau 10. Teneurs en eau du sol (en %) pour les différentes modalités de travail du sol, dans les horizons A (0-10 cm), B (10-20 cm) et C (20-30 cm) mesurées à 4 dates différentes au cours de la saison culturale 2011-2012.

% H <sub>2</sub> O du sol	17-nov-11	04-avr-12	08-mai-12	08-août-12
Moyenne Labour / Horizon A	16,0%	16,2%	24,6%	21,0%
Moyenne Non-Labour / Horizon A	17,2%	15,6%	25,9%	33,8%
Moyenne Labour / Horizon B	17,4%	19,1%	23,9%	21,1%
Moyenne Non-Labour / Horizon B	17,7%	18,3%	22,4%	20,1%
Moyenne Labour / Horizon C	17,1%	19,5%	23,2%	21,6%
Moyenne Non-Labour / Horizon C	17,3%	19,3%	22,0%	20,1%

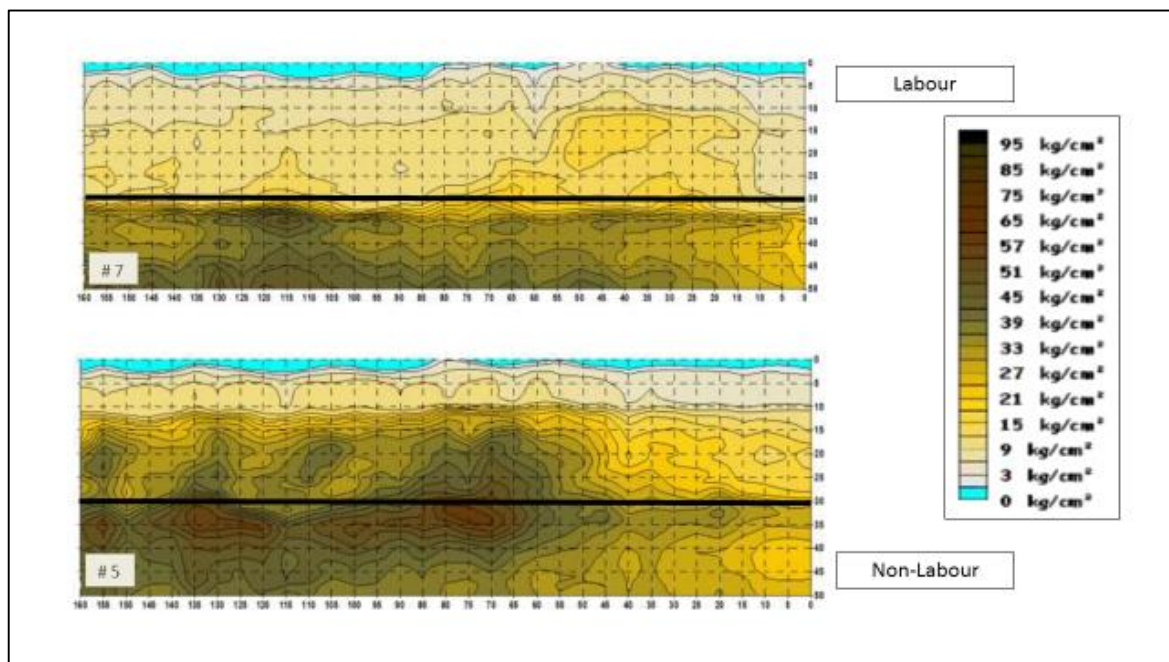


Figure 42. Cartes pénétrométriques réalisées par le CRA-W (Claire Olivier, 2012) sur les parcelles n°7 (Labour-Résidus In) et n°5 (Non-Labour-Résidus In) en 2012. Une ligne noire a été tracée à la profondeur 30 cm, délimitant la zone étudiée dans le cadre de ce mémoire. La légende relie la couleur à la résistance à la pénétration (RP) correspondante exprimée en kg/cm<sup>2</sup>. Les couleurs jaune pâle correspondent à de faibles RP, les couleurs plus foncées correspondent à des RP élevées.

travaillé tandis qu'en labour, l'horizon 0-30 cm est travaillé. Le labour décompacte ainsi l'horizon 0-30 cm, permettant un meilleur développement racinaire par une diminution de la densité apparente. La profondeur de travail des outils a donc un impact sur les caractéristiques structurales du sol. Dolan et al. (2006, étude américaine) ont pu démontrer que les densités apparentes du sol étaient plus élevées dans les 30 premiers cm du sol en no-tillage qu'en travail du sol conventionnel. La tendance s'inverse sous 30 cm, ce qui reflète l'action de rupture du travail du sol à proximité de la surface et l'action de compaction et de cisaillement des outils de travail du sol sous la profondeur travaillée (Dolan et al., 2006). Or, selon Chirinda et al. (2014), une densité apparente du sol plus élevée constitue potentiellement un obstacle à la croissance du système racinaire. Huang et al. (2012) expliquent les différences de croissance racinaire entre les 2 modalités de travail du sol par 2 éléments : d'une part, par le contenu en eau et d'autre part, par les différences de densité apparente entre les différentes modalités de travail du sol. Le meilleur développement du système racinaire en no-tillage dans l'horizon 0-10 cm peut être expliqué par les **plus grandes concentrations en eau dans l'horizon 0-10 cm** dans ce système tandis que le meilleur développement dans l'horizon 10-30 cm en labour peut être expliqué par le décompactage réalisé par ce type de travail du sol dans la zone travaillée, **diminuant ainsi la densité apparente** (Huang et al., 2012).

Ces 2 affirmations ont été vérifiées dans le cadre de notre expérimentation. En effet, dans **l'horizon A, une humidité du sol plus élevée en non-labour qu'en labour** a été observée le 17 novembre 2011, le 4 avril 2012 et le 8 août 2012 (tableau 10). Cependant, la donnée du 8 août 2012, non-labour, Horizon A est surestimée à cause d'une donnée extrême. Concernant l'horizon 10-30 cm, une humidité plus élevée du sol a été mesurée le 4 avril 2012, le 8 mai 2012 et le 8 août 2012 en labour par rapport au non-labour. Ces différences de tendance entre l'horizon A et les horizons B et C peuvent être expliquées par une meilleure infiltration d'eau en labour.

Par ailleurs, des mesures de compaction du sol ont été réalisées par le CRA-W en 2011-2012 sur le projet SOLRESIDUS (CRA-W, rapport interne). La *résistance à la pénétration* (RP, exprimée en  $\text{kg/cm}^2$ ) a été mesurée au moyen d'un pénétromètre. Une influence très hautement significative du travail du sol sur la résistance à la pénétration avait été observée, avec **une RP moyenne sur l'horizon 6-49 cm plus élevée en non-labour (29.34  $\text{kg/cm}^2$ ) qu'en labour (18.05  $\text{kg/cm}^2$ )**. La figure 42 montre que les résistances à la pénétration mesurées sur l'horizon 10-30 cm sont plus faibles en labour (jaune plus pâle) qu'en non-labour (couleur plus foncée). Les quantifications racinaires réalisées grâce à la méthode d'imagerie hyperspectrale proche infrarouge permettent de valider les hypothèses préalablement émises lors des mesures pénétrométriques en 2012 concernant la relation entre le travail du sol et le développement du système racinaire. Le travail du sol réduit peut en effet induire des compactations au niveau de la couche 10-30 cm et par conséquent, pénaliser l'exploration racinaire.

### 5.3.2. Analyse de l'influence du mode de restitution des résidus de culture sur les quantités de racines prérites

Les densités racinaires observées en modalités de restitution des résidus et d'exportation des résidus de culture sont assez semblables. L'inférence ultérieure n'a montré aucune influence significative de la modalité de restitution des résidus pour le 8 mai et le 8 août 2012. Pour les 2 autres dates, la modalité de restitution des résidus était en interaction avec le facteur horizon (17 novembre 2011) ou travail du sol (4 avril 2012). Cependant, il eût été probable de trouver davantage de racines en modalité avec restitution. En effet, comme développé par Guérif et al. (2001), les résidus de culture incorporés par travail du sol diminuent la densité apparente du sol par le maintien de vides entre les agrégats et les mottes de terre. Le volume de pores généré lors de l'enfouissement des résidus excède en général le volume des résidus enfouis (Guérif et al., 2001). Un meilleur développement racinaire dans les parcelles avec restitution des résidus de culture aurait pu être observé.

### 5.3.3. Développement du système racinaire au cours de la saison: discussion de la courbe de croissance

Dans les 30 premiers cm du sol, une stagnation du système racinaire entre le 17 novembre 2011 et le 4 avril 2012 a été observée. Ensuite, une croissance importante a été observée jusqu'au 8 mai 2012 puis une décroissance jusqu'au 8 août 2012.

La présence de racines le 17 novembre 2011 n'est pas étonnante puisqu'une croissance a déjà eu lieu. En effet, entre le 17 octobre 2011, date de semis, et le 17 novembre 2011, date du premier prélèvement, le froment a reçu 303 degrés jours cette année-là (CRA-W, données internes). Selon Paillard et al. (1992, cité par Gate, 1995), soit la zone est labourée et favorable à l'enracinement, ce qui permet des vitesses d'enracinement du froment d'hiver de 16 cm/100 degrés-jours, soit la couche de surface est compactée et la vitesse moyenne d'enracinement vaut alors 6 cm/100 degrés-jours. Des vitesses similaires ont été proposées par Barraclough et al. (1984, cités par Kirkegaard et Lilley, 2007), avec un ordre de grandeur de 1.8 mm/degré jour. Cela démontre que les racines que nous retrouvons sont bien des racines du froment implanté en 2011 et non des racines de la saison culturale précédente. Par conséquent, le froment étudié aurait un système racinaire de maximum 48 cm de profondeur, et au minimum de 18 cm de profondeur. L'idéal eût été de faire un prélèvement au semis afin de voir la quantité de racines de la culture précédente. De plus, les valeurs observées sont probablement surestimées, une grande quantité de résidus étant présente à cette date, induisant une surestimation du nombre de pixels prédits comme étant des racines. Lors d'une étude ultérieure, afin de s'assurer que les racines que l'on quantifie proviennent bien de la culture en place, une discrimination entre racines mortes ou vivantes pourrait également être implémentée (Nakaji, 2008 ; Picon-Cochard et al., 2008).

Le 4 avril 2012, la culture de froment se trouve au **stade fin tallage**. Cependant, bien que nous ayons observé une stabilisation de croissance du système racinaire dans les 30 premiers cm, le système croît en profondeur (Gregory et al., 1978). En 2012, le stade de redressement du froment était atteint le 19 avril. Or, au stade épi à 1 cm, la profondeur d'enracinement peut atteindre 1 m voire plus si le sol le permet et correspond en semis précoces à plus ou moins 90% de la profondeur maximale observée lors de la floraison (Gate, 1995).

C'est par la suite que la croissance du système racinaire va devenir plus importante. En effet, entre le 4 avril 2012 (**Stade de la culture : fin tallage**) et le 8 mai 2012 (**Stade de la culture : 2<sup>ème</sup> nœud**), nous observons une croissance importante du système racinaire dans les 30 premiers centimètres du sol. Ceci a été précisé par Gate (1995), selon lequel la montaison correspond à la phase durant laquelle le nombre de racines adventives croît le plus. Cette croissance s'arrête ensuite à l'anthèse. C'est la raison pour laquelle il eût été intéressant d'échantillonner plus souvent afin d'avoir une courbe reflétant clairement la croissance. En effet, entre le 8 mai 2012 et le 8 août 2012, plus aucun prélèvement n'avait été réalisé, ce qui empêche de voir clairement le pic de croissance du système racinaire à l'anthèse et par après, la décroissance du système racinaire dans les 30 premiers cm. A l'avenir, il serait intéressant d'échantillonner plus fréquemment durant la saison culturale, aux stades clés de la culture.

Entre le 8 mai 2012 et le 8 août 2012 (**Stade de la culture : maturité**), nous pouvons observer une décroissance du système racinaire du froment pour retomber à des densités de racines (en g/dm<sup>3</sup>) similaires à celles retrouvées le 17 novembre 2011 ou le 4 avril 2012 dans les 30 premiers cm. Cette décroissance a été décrite par différents auteurs. En effet, Biscoe et al. (1975, étude anglaise) ont observé une diminution de masse de racines d'une culture d'orge de près de 27% entre le 7 juin (249 g/m<sup>2</sup>), date d'anthèse et le 19 juillet (181 g/m<sup>2</sup>). Ces observations concordent avec celles de Huang et al. (2012) qui ont également observé une mort des racines au stade de floraison et ensuite une dégradation graduelle dues à une humidité du sol plus faible et à une température du sol plus élevée dans les 30 premiers cm. Cependant, selon les mêmes auteurs, une croissance persiste sous 30 cm, afin d'atteindre l'eau et les nutriments dont la plante a besoin. Selon Andersson et al. (2005, cités par Munoz-Romero et al., 2010), les racines croissant après l'anthèse peuvent entrer en compétition avec le grain pour le carbone et l'azote ou jouer un rôle majeur dans les translocations d'azote vers le grain. Gregory et al. (1978) ont montré qu'après l'anthèse, bien que le poids sec du système racinaire demeure constant ou baisse légèrement, la croissance racinaire sous 50 cm ne cesse pas.

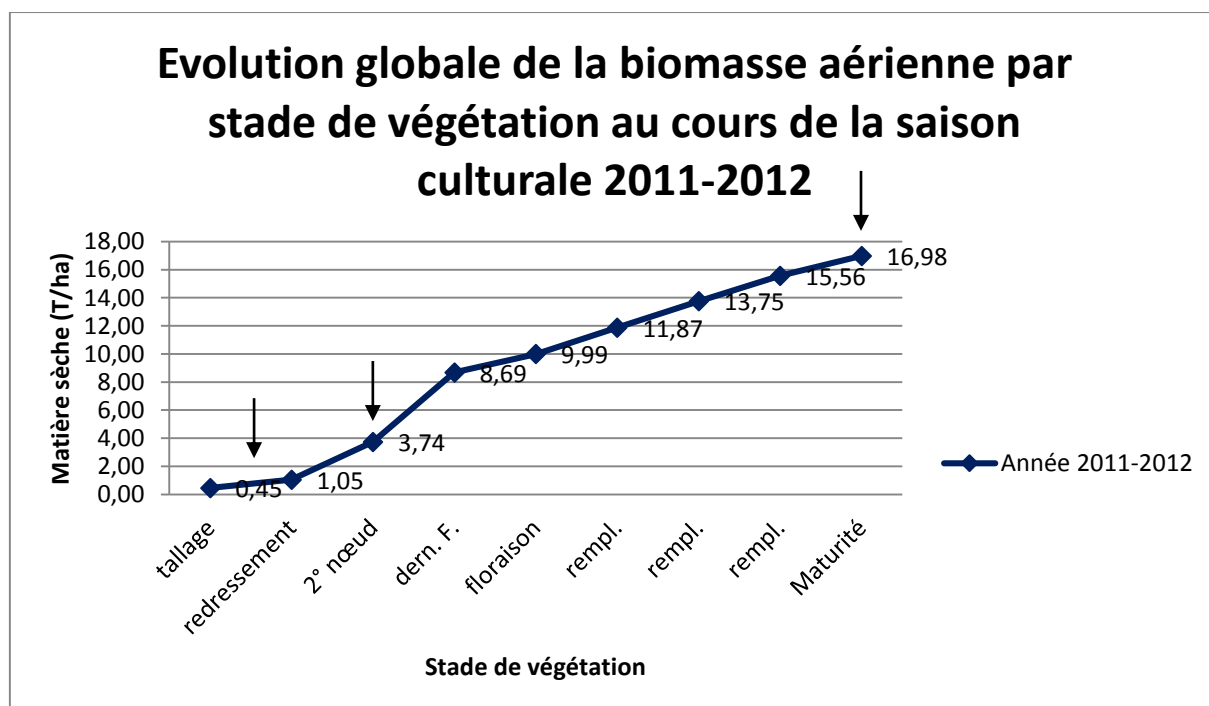


Figure 43. Evolution de la biomasse aérienne du froment d'hiver par stade de végétation au cours de l'année 2011-2012. Les 3 flèches situent les 3 dernières dates de prélèvement : le 4 avril 2012, le 8 mai 2012 et le 8 août 2012.

La croissance racinaire pourrait être mise en relation avec la croissance du système caulino-foliaire. Une courbe d'évolution de la biomasse racinaire pourrait être intégrée dans un graphique de biomasse tel celui présenté en figure 43. Cependant, une croissance post-anthèse existant, il serait plus judicieux d'échantillonner en-deçà de 30 cm afin de pouvoir quantifier la totalité de la biomasse racinaire. En comparant les courbes de croissance du système caulino-foliaire et du système racinaire, Gregory et al. (1978) ont pu montrer que la phase linéaire de croissance du système racinaire du froment d'hiver débutait avant celle des parties aériennes, mais cessait plus tôt.

#### 5.3.4. Quantifications racinaires réalisées et comparaisons avec la littérature

Le système racinaire a pu être quantifié en grammes de racines/dm<sup>3</sup> de sol. Cette quantification est basée sur la relation linéaire établie entre le poids de l'échantillon et le nombre de pixels prédits. Or, ces prédictions présentent certains problèmes qui ont été brièvement décrits au début du chapitre de résultats et qui seront détaillés plus loin.

Tout d'abord sur base des densités racinaires de froment d'hiver (g/dm<sup>3</sup>), une extrapolation a été réalisée afin d'obtenir la biomasse racinaire à l'hectare sur les 30 premiers cm. Sachant qu'il y a 3000 m<sup>3</sup> de sol par hectare sur la couche 0-30 cm, c'est-à-dire 3 000 000 dm<sup>3</sup>, et que la somme des densités racinaires sur les 3 premiers horizons le 8 mai 2012 vaut en moyenne 1.5 g/3 dm<sup>3</sup> pour les 4 objets étudiés, **1500 kg de racines sont présentes dans les 30 premiers cm de sol sur un hectare au stade 2<sup>ème</sup> nœud.** La valeur la plus élevée s'élevant à 1579 kg/ha a été mesurée dans les 30 premiers centimètres de sol de la modalité labour-*Résidus In* et la valeur la plus faible, 1476 kg/ha, a été mesurée dans la modalité non-labour-*Résidus In*. Or, après le mois d'avril, 65% du poids sec racinaire se trouvent dans les 30 premiers cm (Gregory et al., 1978, cités par White et al., 2015). Ces chiffres sont plausibles et différents auteurs ont trouvé des valeurs semblables ou plus faibles. Plaza-Bonilla et al. (2013) ont mesuré 68, 91 g/m<sup>2</sup> (= 680 kg/ha) de racines en travail du sol conventionnel et 136.07 g/m<sup>2</sup> (= 1360,7 kg/ha) en travail du sol réduit dans l'horizon 0-30 cm à l'anthèse. Dans une étude comparant 8 modèles de croissance des cultures dans différents sites en Europe, Palosuo et al. (2011) ont observé une biomasse racinaire à Foulum (Danemark) de 2250 kg/ha à l'anthèse. Par ailleurs, Porter et al. (1986) ont simulé le développement racinaire du froment grâce au modèle WHTRoot et ont rapporté une matière sèche racinaire de 136,5 g/m<sup>2</sup> (1365 kg/ha). Chirinda et al. (2014) rapportent des biomasses racinaires de 1200 kg de matière sèche/ha en bas de pente et de 900 kg de matière sèche en haut de pente au Danemark. Gregory et al. (1978) ont quant à eux rapporté un poids sec racinaire de 105 g/m<sup>2</sup> (1050 kg/ha) à l'anthèse sur base d'une étude réalisée au Royaume-Uni en travail du sol conventionnel.

Cependant, le 8 mai 2012, correspondant à la date la plus proche de l'anthèse dans cette expérimentation, nous observons globalement légèrement plus de racines en labour (0.52 g/dm<sup>3</sup> en moyenne) qu'en non-labour (0.49 g/dm<sup>3</sup> en moyenne). Ces résultats diffèrent de Plaza-Bonilla et al. qui avaient mesuré une densité racinaire double en travail du sol réduit par rapport au travail du sol conventionnel. Cependant, cette étude a été réalisée en Espagne, en conditions méditerranéennes.

Concernant les moyennes de densités racinaires mesurées selon le travail du sol, nous avons confronté nos données du 8 mai 2012 (stade 2<sup>ème</sup> nœud) à celles de Huang et al. (2012, étude chinoise réalisée en 2006-2007). Huang et al. n'ayant pas mesuré les densités racinaires au stade 2<sup>ème</sup> nœud,

nous avons confronté nos données à celles obtenues au premier nœud et à l'épiaison. Nous pouvons voir que nos données sont systématiquement surestimées par rapport à celles de Huang et al. (2012) (tableau 11). 2 éléments peuvent expliquer ces différences : d'une part, le fait que les données de densités racinaires acquises lors de ce mémoire sont surestimées à cause des problèmes liés à l'utilisation combinée des données acquises par la caméra hyperspectrale proche infrarouge et de modèles d'analyse discriminante ne discriminant pas parfaitement les différentes classes spectrales et d'autre part, les variations de biomasses racinaires entre études peuvent être dues à plusieurs facteurs tels des différences physiologiques entre cultivars, le type et les quantités d'engrais apportées, les pratiques de travail du sol, les conditions climatiques et les propriétés du sol (Chirinda et al., 2014).

Tableau 11. Comparaison des moyennes de densités racinaires ( $g/dm^3$ ) obtenues lors du prélèvement le 8 mai 2012, après prédiction des images hyperspectrales proche infrarouge et des moyennes de densités racinaires ( $g/dm^3$ ) obtenues par Huang et al. (2012) par pesées. Les données les plus élevées entre labour/non-labour ont été surlignées en gris clair.

Date	Travail du sol	A (0-10 cm)	B (10-20 cm)	C (20-30 cm)
<b>08-mai-12</b> <b>2<sup>ème</sup> nœud</b>	Labour	0,650	0,479	0,429
	Non-labour	0,848	0,396	0,238
<b>1<sup>er</sup> nœud (Huang et al., 2012)</b>	Labour	0.459	0.224	0.118
	Non-labour	0.565	0.177	0.1
<b>Epiaison (Huang et al., 2012)</b>	Labour	0.574	0.226	0.127
	Non-labour	0.774	0.197	0.121



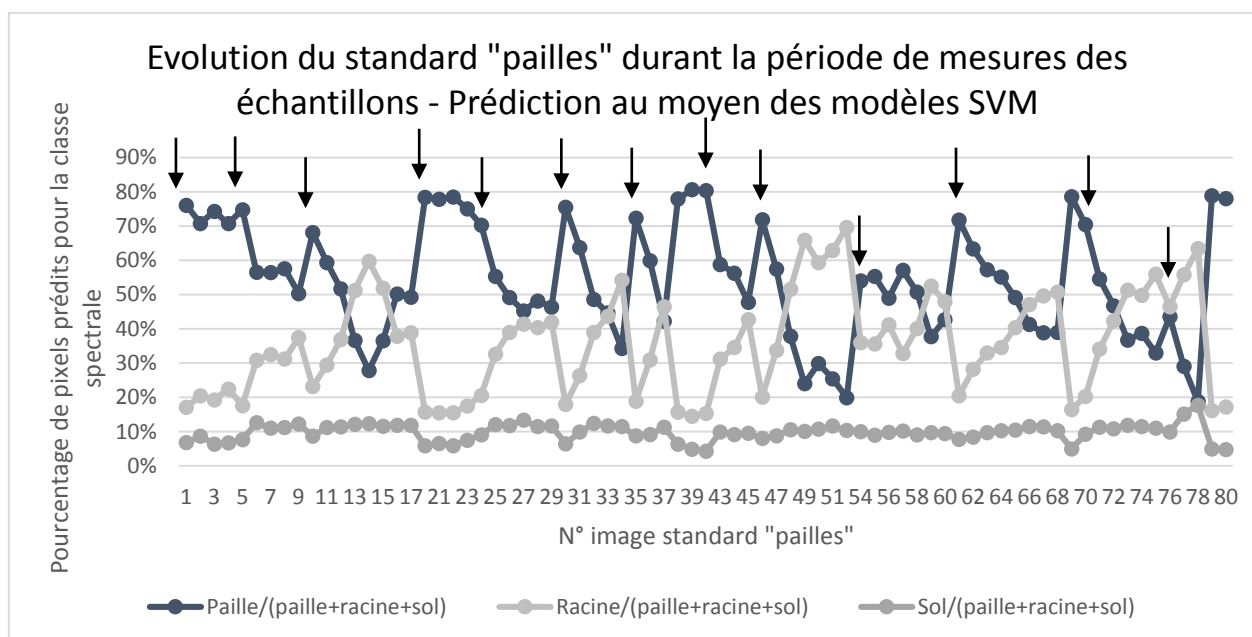


Figure 44. Evolution du standard "pailles" durant la période de mesures des échantillons - Prédiction au moyen du protocole de discrimination basé sur des modèles SVM. Les flèches représentent une nouvelle journée d'acquisition.

Tableau 12. Teneurs (en kg/100 kg de matière sèche) en cellulose, hémicellulose et lignine dans les pailles de froment d'hiver (Godin et al., 2010) et les racines de froment d'hiver (Redin et al., 2013).

Teneurs en kg/100 kg MS	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine
<b>Pailles de froment</b>	36.6 ± 5.7	29.8 ± 7.7	16.9 ± 4.7
<b>Racines de froment</b>	37.1 ± 0.38	29.1 ± 0.34	14.2 ± 0.97

## 5.4. Utilisation de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge dans les études relatives aux systèmes racinaires et à l'évolution des résidus de culture au sein du sol : perspectives

A la suite des mesures réalisées dans le cadre de ce mémoire, il est apparu que des améliorations pouvaient être apportées à la méthode de quantification. Sur base de la variabilité observée, des pistes d'amélioration ont été proposées, testées et appliquées sur certaines données.

### 5.4.1. Variabilité des mesures acquises au moyen de la caméra hyperspectrale proche infrarouge au cours du temps

Le standard « pailles » a été prédit au moyen du protocole de discrimination basé sur les 3 modèles SVM.

Ces prédictions et le report sur graphique des pourcentages [pixels prédits comme des pailles/ (pixels prédits comme des pailles + racines + sol)] et [pixels prédits comme des racines/ (pixels prédits comme des pailles + racines + sol)] ont mis en évidence plusieurs éléments (figure 44) :

- Une variabilité de la caméra au sein des journées d'acquisition, avec une décroissance du nombre de pixels prédits comme des pailles et une croissance du nombre de pixels prédits comme des racines au cours de la journée (**variabilité intra-jour**). En début de journée, juste après une calibration<sup>8</sup> de la caméra hyperspectrale, les images sont quasi systématiquement mieux prédites, avec plus de 68% de pixels prédits comme des pailles, puis une dégradation de la discrimination des spectres de pailles et de racines est observée. Parfois, une amélioration est observée en cours de journée. Celle-ci est liée à une nouvelle calibration de la caméra à la mi-journée suite à l'observation d'un nombre trop élevé de mauvais pixels<sup>9</sup> sur les images ;
- Une variabilité est également observée entre les différents jours d'acquisition, avec des nombres de pixels prédits comme appartenant à la classe spectrale paille inégaux entre les différents jours d'acquisition (**variabilité inter-jour**) ;
- D'autre part, cette relation inverse entre le nombre de pixels prédits comme des pailles et le nombre de pixels prédits comme des racines souligne une certaine **confusion entre ces 2 classes spectrales**, ce qui est sans doute dû à une composition chimique semblable entre ces 2 éléments d'une part (tableau 12), et à une interaction physique entre la lumière et l'échantillon d'autre part. L'origine de cette confusion semble donc physico-chimique ;
- Un pourcentage parfois assez élevé de pixels est prédit comme étant des racines (jusqu'à 70% des pixels prédits comme des racines) ou comme du sol (jusqu'à 18% des pixels prédits comme du sol) alors que ces 2 classes spectrales sont absentes de ce standard.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette variabilité des mesures acquises au moyen de la caméra hyperspectrale proche infrarouge au cours du temps comme :

- Une variation du standard au cours du temps. Le passage répété du standard sous la caméra pourrait avoir une influence sur sa teneur en eau ;
- Une variation des conditions ambiantes autour de la caméra ;

---

<sup>8</sup> La caméra est calibrée par rapport à une référence blanche et une référence noire.

<sup>9</sup> Les mauvais pixels sont des pixels pour lesquels, en réflectance, une saturation du signal est observée à un pixel donné, ou à une absence de signal à un pixel donné, en absorbance.

- **Une variation de l'intensité lumineuse des spots.**

C'est cette dernière hypothèse qui semble le mieux expliquer les variations des caractéristiques spectrales du standard étant donné qu'une nouvelle calibration sur un blanc et sur un noir améliore fortement les prédictions.

#### 5.4.2. Pistes d'amélioration avancées lors de ce mémoire

Sur base de l'analyse de la figure 44, deux problèmes majeurs peuvent être mis en évidence :

- Une confusion des spectres de racines et de résidus de culture ;
- Une variabilité des données acquises grâce à la caméra.

Plusieurs solutions sont envisageables afin d'y remédier :

- Tout d'abord, le **set de calibration** utilisé pour construire les modèles devrait être augmenté afin d'inclure 2 sources de variation : d'une part, la variabilité des éléments échantillonnés en prenant des spectres provenant de racines et résidus de culture échantillonnés dans les différents horizons de sol et aux différentes dates de prélèvement et d'autre part, la variabilité de la caméra hyperspectrale proche infrarouge en tenant compte de la variabilité des spectres proches infrarouges selon la date d'acquisition. En effet, comme suggéré par Lebot (2012), le set de calibration doit inclure des plantes de différentes variétés récoltées au cours de différentes saisons culturales dans le but de prendre en compte un maximum de variabilité. Par conséquent, un modèle robuste devrait inclure des centaines d'échantillons pour représenter la diversité que le modèle pourrait rencontrer (Lebot, 2012). D'autre part, la variabilité de la caméra devrait être introduite dans les modèles. Une solution envisageable serait, par exemple, d'inclure les spectres d'un quart des images du standard « pailles » acquis au cours des 3 semaines d'acquisition dans les modèles en sélectionnant les spectres du standard selon un pas régulier. Une autre solution serait d'inclure dans le set de calibration des spectres de pailles et de racines acquis lors de différents jours de mesures et à plusieurs moments de la journée.
- Une autre piste d'amélioration réside dans la combinaison de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge à un **logiciel de détection de formes**. Prenons l'exemple de Dowdy et al. (1998) qui ont développé un système de discrimination des racines vivantes des résidus de culture s'appuyant sur des techniques d'imagerie considérant que le ratio longueur : largeur des racines diffère significativement de celui des débris organiques ;
- Enfin, l'origine de cette dégradation du signal sera sans doute élucidée en se penchant sur les **spectres** des standards acquis au cours d'une journée. Une variation spectrale des pailles du standard tout au long de la journée a en effet été détectée. Cette constatation doit encore être approfondie.

#### 5.4.3. Résultats obtenus sur base d'un élargissement du set de calibration des modèles : comparaison des modèles « 2014 » et « 2015 »

Suite à l'identification des problèmes cités précédemment, les modèles SVM ont été améliorés en augmentant le set de calibration grâce à l'ajout dans le protocole de discrimination « 2015 » de :

- Spectres infrarouges provenant de pailles et de racines scannées durant la période d'acquisition des spectres des 384 échantillons (spectres sélectionnés sur les images du

standard « pailles » et sur les images des échantillons utilisés pour calibrer les droites de régression) ;

- Spectres infrarouges des zones d'ombre de pailles. Les spectres des zones d'ombres de racines étaient déjà pris en compte dans le protocole de discrimination de 2014.

Par conséquent, les nouveaux modèles développés présentent un set de calibration plus large que ceux développés en 2014, ce qui permet de prendre en compte 2 types de variabilités :

- La variabilité liée aux éléments étudiés ;
- La variabilité liée à la caméra hyperspectrale proche infrarouge.

Le prétraitement utilisé est toujours l'autoscale (donnée centrée réduite) et le protocole est toujours basé sur un arbre dichotomique composé de 3 modèles SVM. Lors d'une validation sur 67 images d'échantillons constitués uniquement de pailles, 80.2% des pixels sont prédits comme des pailles (coefficient de variation=8.4%) et lors d'une validation sur 47 images d'échantillons de racines, 91.7% des pixels sont prédits comme des racines (coefficient de variation=4.3%). Une comparaison entre les modèles « 2014 » et « 2015 » est présentée au tableau 13.

Tableau 13. Comparaison des modèles "2014" et "2015". Le modèle "2015" est caractérisé par un élargissement du set de calibration du modèle "2014".

	Protocole 2014	Protocole 2015
Prétraitement	Autoscale	Autoscale
Modèles	SVM	SVM
Validation sur images pailles	65.1%-69 images	80.2%-67 images
Validation sur images racines	93.42%-73 images	91.7%-47 images

Par ailleurs, la différence de prédictions des images hyperspectrales à l'aide de l'ancien et du nouveau protocole est flagrante. En effet, les pailles sont beaucoup mieux prédites au moyen des nouveaux modèles (figure 45). Cependant, la figure 45 montre une racine quasiment prédite entièrement comme de l'arrière-plan.

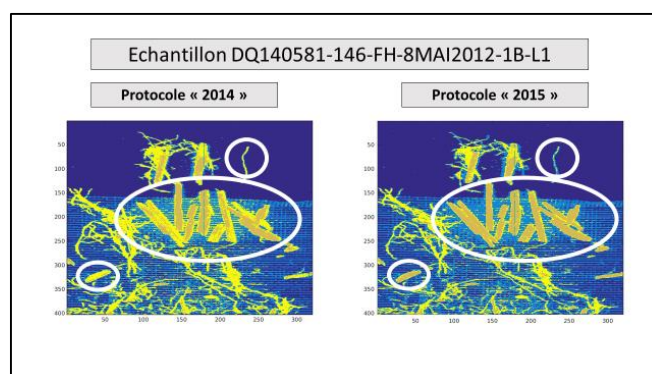


Figure 45. Comparaison de 2 images prédites au moyen des anciens (modèles « 2014 ») et des nouveaux (modèles « 2015 ») modèles SVM. Echantillon DQ140581-146-8MAI2012-1B-L1.

En outre, par manque de temps, le protocole de discrimination SVM « 2015 » n'a pu être appliqué que sur une partie des échantillons étudiés. Ainsi, une **comparaison des 2 modalités de travail du sol en Résidus In, le 8 Mai 2012** a été menée avec le nouveau protocole de discrimination. La comparaison des résultats obtenus au moyen des protocoles « 2015 » et « 2014 » présente une augmentation variable du nombre de pixels prédits comme des pailles et une diminution variable du nombre de pixels

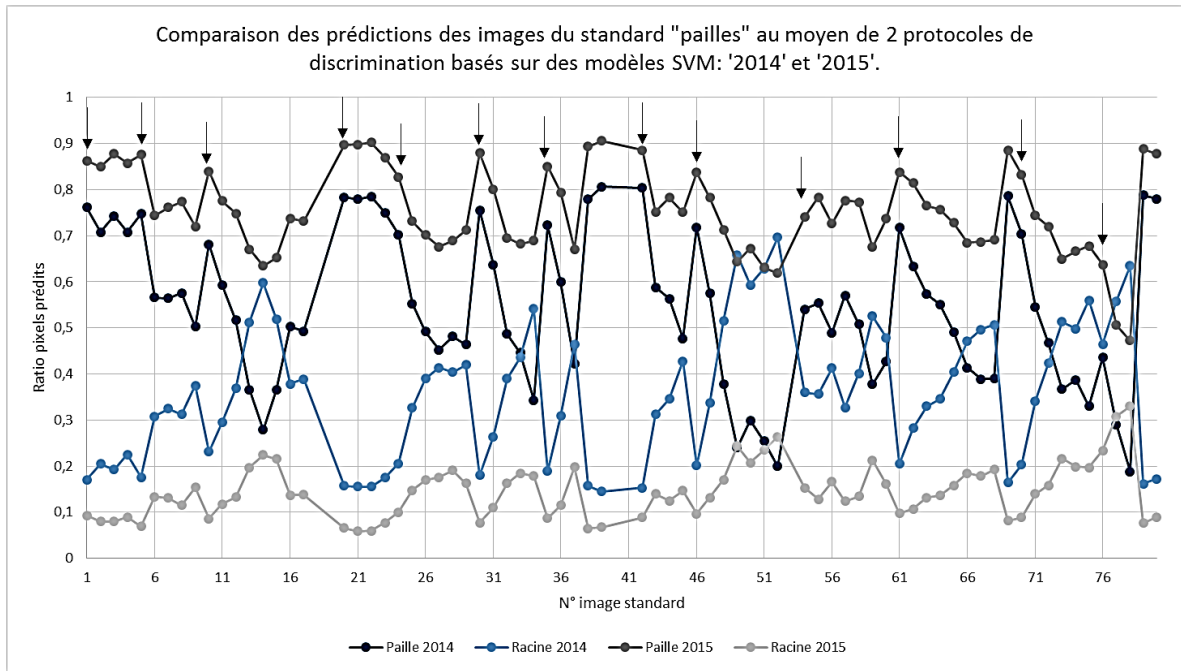


Figure 46. Comparaison des prédictions des images du standard "pailles" au moyen de 2 protocoles de discrimination basés sur des modèles SVM: "2014" et "2015". Les flèches correspondent au début d'une nouvelle journée d'acquisition.

prédits comme des racines, ce qui souligne une diminution de la confusion entre ces 2 classes spectrales.

Enfin, les protocoles de discrimination « 2015 » et « 2014 » ont été appliqués sur **75 standards**.

Le développement d'un nouveau protocole de discrimination a permis une amélioration considérable des prédictions du standard « pailles ». En effet,

- La moyenne des pixels prédits comme étant des pailles s'élève à 76% avec le protocole de discrimination « 2015 » alors qu'elle était de 54% avec le protocole de discrimination « 2014 ». Par ailleurs, la moyenne des pixels prédits comme étant des racines a diminué, passant de 36% (protocole « 2014 ») à 15% (protocole « 2015 ») ;
- La variabilité des prédictions est également plus faible, avec des écarts-types pour les pixels prédits comme étant des pailles ou des racines 2 fois plus faibles avec le protocole de discrimination « 2015 », passant de 0.17 à 0.09 pour les pixels prédits comme étant des pailles et de 0.15 à 0.06 pour les pixels prédits comme étant des racines.

Un enrichissement du set de calibration au cours du temps devrait en toute logique améliorer continuellement ces prédictions.

#### 5.4.4. Intérêts de la spectroscopie proche infrarouge par rapport aux autres méthodes de quantification racinaire

Le principal avantage du NIR par rapport aux autres méthodes de quantification réside dans la possibilité de pouvoir **discriminer des éléments sur base de leur spectre infrarouge**. De cette manière, différents éléments pourraient être discriminés comme, par exemple, les racines d'espèces différentes (Lei et Bauhus, 2010 ; Roumet et al., 2006), les racines mortes ou vivantes (Nakaji, 2008 ; Picon-Cochard et al., 2008), ou encore les racines des résidus de culture (Eylenbosch et al., 2015). Rewald et al. (2012) affirment que la spectroscopie infrarouge, en combinaison avec les minirhizotrons est la méthode la plus prometteuse à l'avenir pour une identification et une quantification non-destructives des racines provenant de différentes espèces. D'autres avantages peuvent également être cités comme sa rapidité en comparaison aux techniques de quantification manuelles par pesée, son caractère non destructif, sa simplicité, le fait qu'elle ne requiert pas de préparation onéreuse et chronophage des échantillons ou l'utilisation de réactifs nocifs pour l'environnement et son adaptabilité potentielle pour des applications en champ (Dale et al., 2012 ; Viscarra Rossel et al., 2006).

Le principal désavantage de cette méthode de quantification semble être la **calibration** qui est nécessaire pour pouvoir ensuite prédire les éléments. En effet, la composition chimique des racines peut changer au cours du développement de la plante ou dans différentes conditions biotiques ou abiotiques (Rewald et al., 2012). D'autres inconvénients peuvent être cités :

- Les problèmes de confusion entre les pailles et les racines;
- L'utilisation de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge demeure actuellement une technique utilisée en laboratoire pour la quantification racinaire. Les racines ne peuvent être quantifiées directement au champ ;
- Le coût d'achat élevé de la caméra hyperspectrale proche infrarouge ;
- Le temps d'acquisition (6 échantillons/heure), de prédiction et de traitement des données. Cependant, ceci s'avère plus rapide que le tri et la pesée manuels (45 minutes/échantillon, Eylenbosch, communication personnelle) ;

- Un lavage des échantillons semble encore nécessaire. Les essais de quantification directement sur carotte de sol réalisés au cours de ce mémoire ne se sont pas révélés concluants (éléments masqués par la terre, présence d'eau et volume des échantillons important entraînant des images de grandes tailles et donc de grandes quantités de données à analyser) ;
- La sensibilité à l'eau masquant la réponse spectrale des éléments.

Le tableau 14 situe la technologie infrarouge par rapport à cinq autres méthodes de quantification racinaire. Nous pouvons voir que la spectroscopie infrarouge présente des avantages indéniables par rapport aux autres méthodes mais, comme toutes les autres méthodes de quantification racinaire présentées dans la revue bibliographique de ce mémoire, possède des inconvénients inhérents à la technologie elle-même. A l'heure actuelle, aucune méthode de quantification racinaire ne permet de visualiser et de quantifier précisément le système racinaire d'une plante cultivée en conditions naturelles. Les différentes méthodes de quantification des systèmes racinaires doivent donc être intégrées afin d'une part, d'extraire le maximum d'informations et d'autre part, de comparer les mesures réalisées. Ceci signifie que les données acquises par différents laboratoires de recherches au moyen de différentes techniques (minirhizotron, core-break method, capacité électrique, etc.) doivent être mises en commun et discutées afin d'obtenir des mesures précises des systèmes racinaires, toutes les techniques étant complémentaires.

Tableau 14. Avantages de la spectroscopie infrarouge par rapport aux autres méthodes dans les études relatives aux systèmes racinaires.

<b>Autres méthodes de quantification racinaire</b>	<b>Avantages de la spectroscopie IR par rapport aux autres méthodes de quantification racinaire</b>
Extraction et mesure manuelle	Plus rapide
Minirhizotron	Pas de biais lié au placement du tube et possibilité de discriminer différentes espèces
qPCR	Facilité d'emploi et non destructif
Capacité électrique	Mesure directe de la biomasse racinaire et pas de biais lié au placement de l'électrode sur la tige
Imagerie par résistivité électrique	Résolution spatiale plus élevée

A l'avenir, la spectroscopie appliquée aux systèmes racinaires pourra être combinée avec d'autres techniques de quantification racinaire tels les minirhizotrons (Rewald et al., 2012). Une autre opportunité réside dans la combinaison de l'analyse d'images à la spectroscopie. L'application d'un logiciel de détection de formes pourrait permettre une quantification encore plus précise des éléments. Dans le cadre de la discrimination et quantification des racines et résidus de culture, ce projet semble tout à fait concevable vu la grande différence de taille entre les 2 éléments. Prenons l'exemple de Dowdy et al. (1998) qui ont développé un système de discrimination des racines vivantes des résidus de culture s'appuyant sur des techniques d'imagerie considérant que le ratio longueur : largeur des racines diffère significativement de celui des débris organiques (Dowdy et al., 1998).

Par ailleurs, une autre avancée considérable serait la possibilité de pouvoir quantifier les systèmes racinaires directement au sein des carottes de sol ou directement au champ.

## 6. Conclusion

Au cours de ce mémoire, la technologie basée sur l'utilisation combinée de l'imagerie hyperspectrale proche infrarouge et des outils de la chimiométrie a été appliquée afin d'étudier l'impact du travail du sol et de la restitution des résidus de culture sur le développement du système racinaire d'une culture de froment d'hiver et l'évolution des résidus dans le profil de sol compris entre 0 et 30 cm. Plusieurs conclusions ont pu être tirées :

- Sur base des données prédites, un mélange de 90% des résidus totaux dans les 10 premiers centimètres du profil en non-labour est observé. En revanche, en modalité de labour, 77 % en moyenne des résidus de culture se retrouvent enfouis entre 10 et 30 cm de profondeur ;
- Une tendance globalement décroissante des densités de résidus de culture a été observée au cours de la saison 2011-2012, pour aboutir le 8 août 2012 à quasiment 0 g de résidus de culture/dm<sup>3</sup> de sol, révélant une dégradation quasi complète ;
- La décomposition des résidus de culture est peu liée à la profondeur d'enfouissement ;
- Dans les 30 premiers cm du sol, une stagnation du système racinaire entre le 17 novembre 2011 et le 4 avril 2012 a été observée. Ensuite, une croissance importante a été mesurée jusqu'au 8 mai 2012 puis une décroissance au 8 août 2012 ;
- Une concentration du système racinaire dans les 10 premiers cm du profil en non-labour est observée contrairement au labour qui semble permettre un développement plus homogène du système au sein du profil, avec des densités racinaires plus élevées dans l'horizon 10-30 cm. Cette différence a été mise en relation avec les teneurs en eau dans l'horizon 0-10 cm plus élevées en non-labour et avec les compactations du sol dans l'horizon 10-30 cm, en non-labour.

Ce mémoire a permis de valider l'utilisation de la technologie NIR-HSI comme nouvelle méthode de quantification racinaire en recherche agronomique. A la suite des mesures, il est apparu que des améliorations pouvaient être apportées. Des pistes d'amélioration ont été proposées et une nouvelle calibration des modèles a pu être réalisée, menant à une nette amélioration des prédictions.

Cette méthode présente l'avantage majeur de pouvoir **discriminer les éléments sur base de leur spectre infrarouge**, permettant de distinguer des racines mortes ou vivantes, des racines de différentes espèces ou encore de discriminer les racines et les résidus de culture du froment d'hiver. A l'avenir, un perpétuel enrichissement du set de calibration, une connaissance fine de l'évolution de la composition chimique des éléments au cours de la saison et la combinaison de la technologie NIR à d'autres méthodes telles l'analyse d'images ou aux minirhizotrons feront de la spectroscopie un outil encore plus pertinent dans les recherches liées aux systèmes racinaires.

Sur base de cela, ce mémoire laisse entrevoir trois perspectives pouvant être explorées à l'avenir :

- L'application de la technologie NIR-HSI dans le cadre de l'étude de la distribution et de l'évolution des résidus de culture au sein du sol en fonction du mode de travail du sol ;
- L'application de la technologie NIR-HSI dans des études de quantification de biomasse racinaire. Des applications potentielles seraient la comparaison de variétés, la réponse du système racinaire à l'application d'engrais ou de régulateurs de croissance, des études sur le travail du sol, l'étude des cultures associées ou des applications à d'autres cultures ;
- L'utilisation des données acquises lors de ce mémoire dans des études plus larges sur l'impact des pratiques culturales.



## 7. Références bibliographiques

- Allmaras, R. R., Pikul, J. L., Wilkins, D. E., & Kraft, J. M. (1988). A Method for Measuring Incorporated Crop Residue and Associated Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 1128.
- Amato, M., Basso, B., Celano, G., Bitella, G., Morelli, G., & Rossi, R. (2008). In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. *Tree Physiology*, 28, 1441–1448.
- Amato, M., Bitella, G., Rossi, R., Gómez, J. A., Lovelli, S., & Gomes, J. J. F. (2009). Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone. *European Journal of Agronomy*, 31, 213–222.
- Amato, M., Lapenna, V., Rossi, R., & Bitella, G. (2012). Multi-electrode Resistivity Imaging. In S. Mancuso (Ed.), *Measuring Roots. An updated approach* (pp. 189–211). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Andersson, A., Johansson, E., & Oscarson, P. (2005). Nitrogen redistribution from the roots in post-anthesis plants of spring wheat. *Plant and Soil*, 269, 321–332.
- Asseng, S., L.A.G., A., MacFall, J. S., Hopmans, J. W., & Gregory, P. J. (2000). Computer-Assisted Tomography and Magnetic Resonance Imaging. In Smit A. L. et al. (Ed.), *Root Methods, A Handbook* (pp. 343–363). Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.
- Aulen, M., & Shipley, B. (2012). Non-destructive estimation of root mass using electrical capacitance on ten herbaceous species. *Plant and Soil*, 355, 41–49.
- Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., & Griffis, T. J. (2007). Tillage and soil carbon sequestration-What do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 1–5.
- Bellon-Maurel, V., & McBratney, A. (2011). Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(7), 1398–1410.
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59–68.
- Biscoe, P. V., Scott, R. K., & Monteith, J. L. (1975). Barley and its environment. III. Carbon budget of the stand. *Journal of Applied Ecology*, 12, 269–293.
- Boddupalli, M., Prasanna, Jose L. Araus, Jose Crossa, Jill E. Cairns, N., & Palacios, B. D. (2013). High-Throughput and Precision Phenotyping for Cereal Breeding Programs. In P. K. Gupta and R. K. Varshney (Ed.), *Cereal Genomics II* (pp. 341–374). Springer Science+Business Media Dordrecht 2013.

- Böhm, W. (1979). *Methods of Studying Root Systems* (p. 188). Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg.
- Brostaux, Y. (2002). *Introduction à l'environnement de programmation statistique R, Notes de statistiques et d'informatique*. (pp. 1–22).
- Bucksch, A., Burrige, J., York, L. M., Das, A., Nord, E., Weitz, J. S., & Lynch, J. P. (2014). Image-based high-throughput field phenotyping of crop roots. *Plant Physiology*, *166*(October 2014), 470–486.
- C.R.A.Gx, F. U. S. A. Gx. (1990). *Le froment d'hiver-Conduite de sa culture*. Gembloux: Les Presses Agronomiques de Gembloux.
- Campbell, C. A., Cameron, D. R., Nicholaichuk, W., & Davidson, H. R. (1977). Effects of Fertilizer N and Soil Moisture on Growth, N Content, and Moisture Use by Spring Wheat. *Can. J. Soil Sci.*, *57*, 289–310.
- Chirinda, N., Roncossek, S. D., Heckrath, G., Elsgaard, L., Thomsen, I. K., & Olesen, J. E. (2014). Root and soil carbon distribution at shoulderslope and footslope positions of temperate toposequences cropped to winter wheat. *Catena*, *123*, 99–105.
- Chloupek, O. (1972). The relationship between electric capacitance and some other parameters of plant roots. *Biologia Plantarum*, *14*(3), 227–230.
- Christopher, J., Christopher, M., Jennings, R., Jones, S., Fletcher, S., Borrell, A., Hammer, G. (2013). QTL for root angle and number in a population developed from bread wheats (*Triticum aestivum*) with contrasting adaptation to water-limited environments. *Theoretical and Applied Genetics*, *126*, 1563–1574.
- Colombi, T., Kirchgessner, N., Andrée, C., Marié, L., York, L. M., Lynch, J. P., & Hund, A. (2015). Next generation shovelomics : set up a tent and REST. *Springer International Publishing Switzerland 2015*, (388), 1–20.
- Cookson, W. R., Beare, M. H., & Wilson, P. E. (1998). Effects of prior crop residue management on microbial properties and crop residue decomposition. *Applied Soil Ecology*, *7*, 179–188. doi:10.1016/S0929-1393(97)00032-2
- Costa, C., Dwyer, L. M., & Smith, D. L. (2000). A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis. *Agronomy Journal*, *92*(4), 621.
- Dale, L., Thewis, A., Rotar, I., Fernández Pierna, J. A., Boudry, C., Vidican, R. M., & Baeten, V. (2012). Chemometric Tools for NIRS and NIR Hyperspectral Imaging. *Bulletin UASVM Agriculture*, *69*(1), 70–76.
- Dalton, F. N. (1995). In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods. *Plant and Soil*, *173*(1953), 157–165.
- De Dorlodot, S., Forster, B., Pagès, L., Price, A., Tuberosa, R., & Draye, X. (2007). Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends in Plant Science*, *12*(10), 474–481.

- Degrune, F., Dufrêne, M., Colinet, G., Massart, S., Taminiau, B., Bodson, B., Hiel, M., Daube, G., Nezer, C., Vandebol, M. (2015). A novel sub-phylum method discriminates better the impact of crop management on soil microbial community. *Agronomy for Sustainable Development*.
- Dietrich, R. C., Bengough, A. G., Jones, H. G., & White, P. J. (2013). Can root electrical capacitance be used to predict root mass in soil? *Annals of Botany*, 112, 457–464.
- Dolan, M. S., Clapp, C. E., Allmaras, R. R., Baker, J. M., & Molina, J. a E. (2006). Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management. *Soil and Tillage Research*, 89, 221–231.
- Dowdy, R. H., Smucker, A. J. M., Dolan, M. S., & Ferguson, J. C. (1998). Automated image analyses for separating plant roots from soil debris elutriated from soil cores. *Plant and Soil*, 200, 91–94.
- Ellis, F. B., & Barnes, B. T. (1980). Growth and development of root systems of winter cereals grown after different tillage methods including direct drilling. *Plant and Soil*, 55, 283–295.
- Eylenbosch, D., Fernández-Pierna J.A., Baeten, V., & Bodson, B. (2014). Detection of wheat root and straw in soil by use of Near Infrared hyperspectral imaging system and Partial Least Square discriminant analysis. In *9th EARSeL SIG Imaging Spectroscopy workshop*.
- Eylenbosch, D., Pierna, Fernández-Pierna J.A., Baeten, V., & Bodson, B. (2015). Use of NIR-HIS and dichotomist classification tree based on SVMDA models in order to discriminate roots and crop residues of winter wheat, 237–238. In *13th Congress of the European Society for Agronomy*.
- Fernández Pierna, J. A., Baeten, V., Renier, A. M., Cogdill, R. P., & Dardenne, P. (2004). Combination of support vector machines (SVM) and near-infrared (NIR) imaging spectroscopy for the detection of meat and bone meal (MBM) in compound feeds. *Journal of Chemometrics*, 18(December), 341–349.
- Fernández Pierna, J. A., Vincke, D., Dardenne, P., Yang, Z., Han, L., & Baeten, V. (2014). Line scan hyperspectral imaging spectroscopy for the early detection of melamine and cyanuric acid in feed. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 22(May), 103.
- Garrigues, E., Doussan, C., & Pierret, A. (2006). Water uptake by plant roots: I - Formation and propagation of a water extraction front in mature root systems as evidenced by 2D light transmission imaging. *Plant and Soil*, 283, 83–98.
- Gate, P. (1995). *Ecophysiologie du blé*. Lavoisier, p. 429. Paris.
- Godin, B., Ghysel, F., Agneessens, R., Schmit, T., Gofflot, S., Lamaudière, S., Delcarte, J. (2010). Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de

- deuxième génération. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 14, 549–560.
- Gowen, A. A., O'Donnell, C. P., Cullen, P. J., Downey, G., & Frias, J. M. (2007). Hyperspectral imaging - an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science and Technology*, 18, 590–598.
- Grahn, H. F., Geladi, P., & Burger, J. E. (2007). Multivariate Images, Hyperspectral Imaging : Background and equipment. In *Techniques and Applications of Hyperspectral Image Analysis* (Wiley). England.
- Gregory, P. J., McGowan, M., Biscoe, P. V., & Hunter, B. (1978). Water relations of winter wheat: 1. Growth of the root system. In *The Journal of Agricultural Science* (pp 91–102).
- Gregory, P. J., Bengough, A. G., Grinev, D., Schmidt, S., Thomas, W. T. B., Wojciechowski, T., & Young, I. M. (2009). Root phenomics of crops: Opportunities and challenges. *Functional Plant Biology*, 36, 922–929.
- Guérif, J., Richard, G., Dürr, C., Machet, J. ., Recous, S., & Roger-Estrade, J. (2001). A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil and Tillage Research*, 61, 13–32.
- Haling, R. E., Simpson, R. J., McKay, A. C., Hartley, D., Lambers, H., Ophel-Keller, K., Richardson, A. E. (2011). Direct measurement of roots in soil for single and mixed species using a quantitative DNA-based method. *Plant and Soil*, 348, 123–137.
- Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B., & Gallais, A. (2007). The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: Towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany*, 58(9), 2369–2387.
- Hoad, S. P., Russell, G., Kettlewell, P. S., & Belshaw, M. (2004). Root system management in winter wheat: practices to increase water and nitrogen use. *HGCA Project Report*.
- Huang, B., B.A., & M.S. (1991). *Wheat root morphology, root anatomy, and hydraulic conductivity as affected by temperature*. Texas Tech University.
- Huang, C. Y., Kuchel, H., Edwards, J., Hall, S., Parent, B., Eckermann, P., McKay, A.C. (2013). A DNA-based method for studying root responses to drought in field-grown wheat genotypes. *Scientific Reports*, 1–7.
- Huang, G., Chai, Q., Feng, F., & Yu, A. (2012). Effects of Different Tillage Systems on Soil Properties, Root Growth, Grain Yield, and Water Use Efficiency of Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Arid Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(8), 1286–1296.
- Jahnke, S., Menzel, M. I., Van Dusschoten, D., Roeb, G. W., Bühler, J., Minwuyelet, S., Schurr, U. (2009). Combined MRI-PET dissects dynamic changes in plant structures and functions. *Plant Journal*, 59, 634–644.

- Jones, H., & Bentley, S. (2015). Getting to the root of the matter with DNA technology. *Landmark*, (21), 17–18.
- Kirkegaard, J. A., & Lilley, J. M. (2007). Root penetration rate - A benchmark to identify soil and plant limitations to rooting depth in wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 47, 590–602.
- Kusumo, B. H., Hedley, M. J., Hedley, C. B., Arnold, G. C., & Tuohy, M. P. (2010). Predicting pasture root density from soil spectral reflectance: Field measurement. *European Journal of Soil Science*, 61(February), 1–13.
- Kusumo, B. H., Hedley, M. J., Hedley, C. B., Hueni, a., Arnold, G. C., & Tuohy, M. P. (2009). The use of Vis-NIR spectral reflectance for determining root density: Evaluation of ryegrass roots in a glasshouse trial. *European Journal of Soil Science*, 60(February), 22–32.
- Kusumo, B. H., Hedley, M. J., Hedley, C. B., & Tuohy, M. P. (2011). Measuring carbon dynamics in field soils using soil spectral reflectance: Prediction of maize root density, soil organic carbon and nitrogen content. *Plant and Soil*, 338, 233–245.
- Lebot, V. (2012). Near Infrared Spectroscopy for Quality Evaluation of Root Crops: Practical Constraints, Preliminary Studies and Future Prospects. *Journal of Root Crops*, 38(1), 3–14.
- Le Gouis, J., Béghin, D., Heumez, E., & Pluchard, P. (2000). Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 12, 163–173.
- Lei, P., & Bauhus, J. (2010). Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict species composition in tree fine-root mixtures. *Plant and Soil*, 333, 93–103.
- Lobet, G., & Draye, X. (2013). Novel scanning procedure enabling the vectorization of entire rhizotron-grown root systems. *Plant Methods*, 9, 1.
- Lobet, G., Draye, X., & Périlleux, C. (2013). An online database for plant image analysis software tools. *Plant Methods*, 9, 1–7.
- Lobet, G., Pagès, L., & Draye, X. (2011). A novel image-analysis toolbox enabling quantitative analysis of root system architecture. *Plant Physiology*, 157(September), 29–39.
- Mairhofer, S., Zappala, S., Tracy, S. R., Sturrock, C., Bennett, M., Mooney, S. J., & Pridmore, T. (2012). RooTrak: Automated Recovery of Three-Dimensional Plant Root Architecture in Soil from X-Ray Microcomputed Tomography Images Using Visual Tracking. *Plant Physiology*, 158(February), 561–569.
- Majdi, H. (1996). Root sampling methods - Applications and limitations of the minirhizotron technique. *Plant and Soil*, 185, 255–258.

- Manschadi, A. M., Hammer, G. L., Christopher, J. T., & DeVoil, P. (2008). Genotypic variation in seedling root architectural traits and implications for drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil*, 303, 115–129.
- Manschadi, A. M., Manske, G. G. B., & Vlek, P. L. G. (2013). Wheat as a Model Plant. Chapitre 22. In T. Eshel, A. & Beeckman, ed. *Plant Roots: The Hidden Half, 4th Edition*. CRC Press, New York, USA.
- Manske, G. G. B., Ortiz-Monasterio, J. I., & Vlek, P. L. G. (2001). Techniques for Measuring Genetic Diversity. Chapitre 18. In Roots. In M. P. Reynolds, J. I. Ortiz-Monasterio, & and A. McNab (Eds.), *Application of Physiology in Wheat Breeding*. (pp. 208–218). CIMMYT Mexico.
- Manske, G. G. B., & Vlek, P. L. G. (2002). Root Architecture-Wheat as a Model Plant. In Waisel, Y., Eshel, A., Kafkafi, U., ed, *Plant Roots: The Hidden Half, 3rd Edition*. CRC Press, New York, USA.
- Miller, a. J., & Cramer, M. D. (2005). *Root nitrogen acquisition and assimilation*. *Plant and Soil* (Vol. 274, pp. 1–36).
- Mommer, L., Wagemaker, C. A M., De Kroon, H., & Ouborg, N. J. (2008). Unravelling below-ground plant distributions: A real-time polymerase chain reaction method for quantifying species proportions in mixed root samples. *Molecular Ecology Resources*, 8, 947–953.
- Moule, C. (1971). *Phytotechnie spéciale II : Céréales*. La Maison Rustique. Paris.
- Muñoz-Romero, V., Benítez-Vega, J., López-Bellido, L., & López-Bellido, R. J. (2010). Monitoring wheat root development in a rainfed vertisol: Tillage effect. *European Journal of Agronomy*, 33, 182–187.
- Nakaji, T., Noguchi, K., & Oguma, H. (2008). Classification of rhizosphere components using visible-near infrared spectral images. *Plant and Soil*, 310, 245–261.
- Nakhforoosh, A., Grausgruber, H., Kaul, H. P., & Bodner, G. (2014). Wheat root diversity and root functional characterization. *Plant and Soil*, 380, 211–229.
- Naumann, A., Heine, G., & Rauber, R. (2010). Efficient discrimination of oat and pea roots by cluster analysis of Fourier transform infrared (FTIR) spectra. *Field Crops Research*, 119, 78–84.
- Oliveira, M. do R. G., van Noordwijk, M., Gaze, S. R., Brouwer, G., Bona, S., Mosca, G., & Hairiah, K. (2000). Auger Sampling, Ingrowth Cores and Pinboard Methods. In Smit A. L. et al. (Ed.), *Root Methods, A Handbook* (pp. 175–210). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Olivier, C. (2012). *Projet SOLRESIDUS : Evaluation multidisciplinaire des conséquences agronomiques et environnementales des modalités de gestion des résidus de culture*.

- Ortiz-Monasterio, J. I., Manske, G. G. B., & van Ginkel, M. (2001). Nitrogen and Phosphorus Use Efficiency. Chapitre 17. In M. P. Reynolds, J. I. Ortiz-Monasterio, & A. McNab (Eds.), *Application of Physiology in Wheat Breeding* (pp. 200–207). CIMMYT Mexico.
- Oyanagi, A. (1994). Gravitropic response growth angle and vertical distribution of roots of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil*, *165*, 323–326.
- Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J. E., Rötter, R. (2011). Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy*, *35*, 103–114.
- Perret, J. S., Al-Belushi, M. E., & Deadman, M. (2007). Non-destructive visualization and quantification of roots using computed tomography. *Soil Biology and Biochemistry*, *39*, 391–399.
- Picon-Cochard, C., Pilon, R., Revaillet, S., Jestin, M., & Dawson, L. (2009). Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict the percentage of dead versus living grass roots. *Plant and Soil*, *317*, 309–320.
- Pierret, A., Capowiez, Y., Moran, C. J., & Kretschmar, A. (1999). X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distribution. *Geoderma*, (90), 307–326.
- Pierret, A., Doussan, C., Guarrigues, E., & Mc Kirby, J. (2003). Observing plant roots in their environment: current imaging options and specific contribution of two-dimensional approaches. *Agronomie, EDP Sciences*, *23* (5-6), 471–479.
- Pietola, L. M. (2005). Root growth dynamics of spring cereals with discontinuation of mouldboard ploughing. *Soil and Tillage Research*, *80*, 103–114.
- Plaza-Bonilla, D., Álvaro-Fuentes, J., Hansen, N. C., Lampurlanés, J., & Cantero-Martínez, C. (2014). Winter cereal root growth and aboveground-belowground biomass ratios as affected by site and tillage system in dryland Mediterranean conditions. *Plant and Soil*, *374*, 925–939.
- Porter, J. R., Klepper, B., & Belford, R. K. (1986). A model (WHTROOT) which synchronizes root growth and development with shoot development for winter wheat. *Plant and Soil*, *92*, 133–145.
- Qin, R., Stamp, P., & Richner, W. (2004). Impact of tillage on root systems of winter wheat. *Agronomy Journal*, *96*, 1523–1530.
- Redin, M., Guénon, R., Recous, S., Schmatz, R., de Freitas, L. L., Aita, C., & Giacomini, S. J. (2014). Carbon mineralization in soil of roots from twenty crop species, as affected by their chemical composition and botanical family. *Plant and Soil*, 1–10.
- Repo, T., Cao, Y., Silvennoinen, R., & Ozier-Lafontaine, H. (2012). Electrical Impedance Spectroscopy and Roots. In S. Mancuso (Ed.), *Measuring Roots* (pp. 25–49). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Rewald, B., & Ephrath, J. E. (2013). Minirhizotron techniques. Chapitre 42. In T. Eshel, A. & Beeckman, ed. *Plant roots: The hidden half. 4th edition*. CRC Press, New York, USA.
- Rewald, B., Meinen, C., Trockenbrodt, M., Ephrath, J. E., & Rachmilevitch, S. (2012). Root taxa identification in plant mixtures - current techniques and future challenges. *Plant and Soil*, 359, 165–182.
- Rich, S. M., & Watt, M. (2013). Soil conditions and cereal root system architecture: Review and considerations for linking Darwin and Weaver. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1193–1208.
- Richards, R. A., Rebetzke, G. J., Watt, M., Condon, A. G., Spielmeyer, W., & Dolferus, R. (2010). Breeding for improved water productivity in temperate cereals: Phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Functional Plant Biology*, 37, 85–97.
- Richner, W., Liedgens, M., Bürgi, H., Soldati, A., & Stamp, P. (2000). Root Image Analysis and Interpretation. In Smit A. L. et al. (Ed.), *Root Methods, A Handbook* (pp. 305–341). Springer-Verlag Berlin-Heidelberg.
- Rogers, E. D., & Benfey, P. N. (2015). Regulation of plant root system architecture: implications for crop advancement. *Current Opinion in Biotechnology*, 32, 93–98.
- Rossi, R., Amato, M., Bitella, G., Bochicchio, R., Ferreira Gomes, J. J., Lovelli, S., Favale, P. (2011). Electrical resistivity tomography as a non-destructive method for mapping root biomass in an orchard. *European Journal of Soil Science*, 62(April), 206–215.
- Roumet, C., Picon-cochard, C., Dawson, L. a, Joffre, R., Mayes, R., Blanchard, A., ... Brewer, J. (2006). Quantifying species composition in root mixtures using two methods : near-infrared reflectance spectroscopy and plant wax markers. *New Phytologist*, 170, 631–638.
- Smit, A. L., George, E., & Groenwold, J. (2000). Root Observations and Measurements at (Transparent) Interfaces with Soil. In Smit A.L. et al. (Ed.), *Root Methods, A Handbook* (pp. 235–304). Springer-Verlag Berlin-Heidelberg.
- Smith, S., & De Smet, I. (2012). Root system architecture: insights from Arabidopsis and cereal crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(April), 1441–1452.
- Suqin Fang, Randy Clark, and H. L. (2012). 3D Quantification of Plant Root Architecture In Situ. In S. Mancuso (Ed.), *Measuring Roots* (pp. 135–148). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Taylor, H. M., Upchurch, D. R., & Mcmichael, B. L. (1991). Applications and limitations of rhizotrons and minirhizotrons for root studies. *Plant and Soil*, 129, 29–35.
- Trachsel, S., Kaeppler, S. M., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2011). Shovelomics: High throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. *Plant and Soil*, 341, 75–87.



- Trachsel, S., Kaeppler, S. M., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2013). Maize root growth angles become steeper under low N conditions. *Field Crops Research*, *140*, 18–31.
- Tracy, S. R., Roberts, J. A., Black, C. R., McNeill, A., Davidson, R., & Mooney, S. J. (2010). The X-factor: Visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. *Journal of Experimental Botany*, *61*, 311–313.
- Van den Putte, A., Govers, G., Diels, J., Gillijns, K., & Demuzere, M. (2010). Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy*, *33*(3), 231–241.
- Van Noordwijk, M., Brouwer, G., Meijboom, F., Oliveira, do Rosario. M.G., & Bengough, A. G. (2000). Trench Profile Techniques and Core Break Methods. In Smit A. L. et al. (Ed.), *Root Methods, A Handbook* (pp. 212–233). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Vancutsem, F., & Pierreux, J. (2012). Dynamique de dégradation des résidus de culture dans le sol en fonction de la profondeur d'enfouissement et de la quantité enfouie . Impacts sur le développement des cultures en place. In *11èmes journées d'étude des sols, AgroParisTech*.
- Vermeulen, P., Fernández Pierna, J. A. , Van Egmond, H. P., Dardenne, P., & Baeten, V. (2012). Online detection and quantification of ergot bodies in cereals using near infrared hyperspectral imaging. *Food Additives & Contaminants: Part A*, *29*(February), 232–240.
- Vincke, D., Eylebosch, D., Fernández Pierna, J., Baeten, V., & Bodson, B. (2014). Sorting of Crop Residues and Fossil Bones From Soil By Nir Hyperspectral Imaging. In E. Tuia D. and Schaepman M., eds. *Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evovution in Remote Sensing*. Workshop program, 24-27 june 2014. Lausanne, Switzerland.
- Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J., & Skjemstad, J. O. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, *131*, 59–75.
- Waines, J. G., & Ehdaie, B. (2007). Domestication and crop physiology: Roots of green-revolution wheat. *Annals of Botany*, *100*, 991–998.
- Wasson, A. P., Rebetzke, G. J., Kirkegaard, J. A., Christopher, J., Richards, R. A., & Watt, M. (2014). Soil coring at multiple field environments can directly quantify variation in deep root traits to select wheat genotypes for breeding. *Journal of Experimental Botany*.
- Wasson, A. P., Richards, R. A., Chatrath, R., Misra, S. C., Prasad, S. V. S., Rebetzke, G. J., ... Watt, M. (2012). Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, *63*(9), 3485–3498.
- Watt, M., Magee, L. J., & McCully, M. E. (2008). Types, structure and potential for axial water flow in the deepest roots of field-grown cereals. *New Phytologist*, *178*, 135–146.

- Watt, M., McCully, M. E., & Kirkegaard, J. A. (2003). Soil strength and rate of root elongation alter the accumulation of *Pseudomonas* spp. and other bacteria in the rhizosphere of wheat. *Functional Plant Biology*, *30*, 483–491.
- Wells, D. M., French, A. P., Naeem, A., Ishaq, O., Traini, R., Hijazi, H. I., ... Pridmore, T. P. (2012). Recovering the dynamics of root growth and development using novel image acquisition and analysis methods. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *367*, 1517–24.
- White, C. A., Sylvester-Bradley, R., & Berry, P. M. (2015). Root length densities of UK wheat and oilseed rape crops with implications for water capture and yield. *Journal of Experimental Botany*.
- White, R. G., & Kirkegaard, J. A. (2010). The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil - Implications for water uptake. *Plant, Cell and Environment*, *33*, 133–148.
- Zhu, J., Ingram, P. a., Benfey, P. N., & Elich, T. (2011). From lab to field, new approaches to phenotyping root system architecture. *Current Opinion in Plant Biology*, *14*(3), 310–317.

Site Web consultés

<http://mycorrhizas.info/vam.html>, consulté le 6 juin. Mycorrhizal Associations : The Web Resource. Section 4. Arbuscular Mycorrhizas.

<http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJmL/Spectrpy/InfraRed/infrared.htm>, consulté le 20 juin 2015. IOCD. Infrared Spectroscopy.

<http://www.rstudio.com/>, consulté le 9 mai 2015. RStudio.

## 8. Annexes

### Annexe 1 : la méthode commune du monolithe (Böhm, 1979)



### Annexe 2 : extraction d'un monolithe de sol pour l'étude de l'horizon supérieur du sol (Böhm, 1979)



Annexe 3 : la méthode de la boîte (Böhm, 1979)



Annexe 4 : la méthode de la planche à aiguilles



## Annexe 5 : Revue bibliographique de l'utilisation de la spectroscopie infrarouge dans l'étude des systèmes racinaires

Auteur-Année	Quantification	Technique	Prétraitement	Algorithme de calibration	Résultats
Naumann et al. (2010)	Discrimination racines pois/avoine	FT-MIR-ATR	Dérivée première	Cluster analysis	100 % des racines bien classées
Nakaji et al. (2007)	Discrimination racines mortes/vivantes	Combinaison VIS-NIR-HSI	/	Classification supervisée- Méthode du maximum de vraisemblance	Précision globale $\geq 87.8\%$
Picon-Cochard et al. (2008)	Discrimination racines mortes/vivantes	NIRS	Dérivée première et SNV	Modified Partial least squares (MPLS)	Erreur de prédiction=15%
Lei et Bauhus (2010)	Discrimination de racines d'espèces différentes	FT-NIRS	Différents prétraitements testés : VN, vector normalization; MSC, Multiplicative scattering correction; SLS, straight line subtraction	Partial least squares regression	RMSECV/RMSEP <6.5% et $r^2 > 0.93$
Kusumo et al. (2009)	Quantification densité racines de ray-grass cultivé en serres	Spectroscopie Vis-NIR	Dérivée première	Partial least squares regression (PLSR)	En enlevant les outliers, $r^2$ cross-validation=0.85
Kusumo et al. (2010)	Quantification densité racinaire de graminées en prairie	Spectroscopie Vis-NIR	Dérivée première	Partial least squares regression (PLSR)	Allophanic soil : $r^2=0.83$ , Fluvial soil : $r^2= 0.75$
Kusumo et al. (2011)	Quantification densité racines de maïs	Spectroscopie Vis-NIR	Dérivée première	Partial least squares regression (PLSR)	$r^2=0.75$
Roumet et al. (2006)	Quantification racinaire dans des mélanges de différentes espèces	NIRS	/	2 analyses : Partial least squares regression et Markov chain Monte Carlo (MCMC)	Coefficient de corrélation entre valeurs prédites et réelles entre 0.97 et 0.99
Vincke et al. (2014) ; Eylenbosch et al. (2015)	Quantification des racines et résidus de culture de froment d'hiver	NIR-HSI	Autoscale	SVM (Support Vector Machine)	97.7 % des spectres de racines et 79.4 % des spectres de résidus de culture bien prédits

Annexe 6 : Les systèmes de phénotypage et de quantification racinaire applicables sur des plantes cultivées au champ –

Tableau de synthèse

	Technique	In/Ex situ	Avantages	Inconvénients	Applications	Sources
<b>L A B O R A T O I R E</b>	Tomographie à rayons X assistée par ordinateur (X-ray CT)	Ex situ	-Tridimensionnel -Non destructif -Réalizable dans du sol -Résolution spatiale élevée	-Onéreux -Coefficient d'atténuation racine ≈ matière organique -Sensibilité à un contenu élevé en eau -Non portatif	-Etude tridimensionnelle des systèmes racinaires -Quantification racinaire	Mairhofer et al., 2012 Tracy et al., 2010 Perret et al., 2007 Pierret et al., 1999
	Spectroscopie infrarouge	Ex situ	-Possibilité de discriminer les racines mortes/vivantes et les racines d'espèces différentes -Pas de tri résidus de culture/racines à réaliser -Rapide -Non destructif	-Calibration nécessaire -Sensibilité à l'eau	-Quantification racinaire -Discrimination racinaire	Rewald et al., 2012 Kusumo et al., 2011 Kusumo et al., 2010 Lei et Bauhus, 2010 Naumann et al., 2010 Nakaji et al., 2008 Picon-Cochard et al., 2008 Roumet et al., 2006 Vincke et al., 2014
	Méthode moléculaire (qPCR)	Ex situ	-Espèce-spécifique -Possibilité de quantifier seulement les racines vivantes	-Proportion de cellules racinaires vivantes variable -Influence des acides humiques et de composés chimiques -Calibration nécessaire	-Quantification de biomasse racinaire (échantillons avec une ou plusieurs espèces)	Huang et al., 2013 Mommer et al., 2008 Haling et al., 2011 Jones et Bentley, 2015

<b>D I R E C T E M E N T</b>	Excavation du système racinaire entier	In situ	-Possibilité d'observer le système racinaire global	-Chronophage -Demande élevée en main d'œuvre	-Etude tridimensionnelle des systèmes racinaires -Quantification racinaire	Böhm, 1979
	Méthode du monolithe	In situ	-Possibilité d'observer le système racinaire en tout ou en partie	-Chronophage -Demande élevée en main d'œuvre	-Etude des systèmes racinaires -Quantification racinaire	Böhm, 1979
	Echantillonnage à la tarière	In/Ex situ	-Méthode rapide -Méthode simple	-Destructif -Coefficient de variation élevé	-Quantification racinaire	Oliveira et al., 2000 Böhm, 1979
	Ingrowth core	In situ	-Méthode simple	-Biais (conditions de sol perturbées)	-Quantification de la croissance racinaire et de la production de racines fines -Effet d'un ou de plusieurs éléments sur la croissance racinaire	Oliveira et al., 2000 Majdi, 1996
	Core-break method	In/Ex situ	-Pas d'étape de nettoyage -Simple -Rapide -Nombre élevé d'échantillons possible	-Comptage compliqué quand beaucoup de racines -Description morphologique impossible -Sources d'erreurs inhérentes à la méthode	-Quantification racinaire	Oliveira et al., 2000 Van Noordwijk et al., 2000 Böhm, 1979
	Shovelomics	In situ	-Phénotypage haut débit -Rapide (10 minutes maximum/plante)	-Demande en main d'œuvre	-Etude de l'architecture racinaire	Trachsel et al., 2013 Trachsel et al., 2011

<b>A U C H A M P</b>			-Simple -Coût raisonnable	-Demande en temps d'occupation de la parcelle et en superficie		
	Minirhizotrons	In situ	-Non destructif -Relativement rapide -Suivi de l'évolution temporelle	-Invasif -Coûteux -Délai de stabilisation après installation à respecter -Biais -Analyse ultérieure chronophage	-Biomasse et distribution racinaire -Suivi temporel -Etudes morphologiques -Etude des interactions biologiques	Rewald et Ephrath, 2013 Fang et al., 2012 Zhu et al., 2011 Taylor et al., 1990
	Capacité électrique	In situ	-Rapide -Abordable -Non invasif et non destructif	-Pas une mesure directe de la biomasse racinaire -Influence du placement de l'électrode sur la tige -Influence du contenu en eau du sol	-Quantification de biomasse racinaire	Ellis et al., 2013 Aulen et Shipley, 2012 Dietrich et al., 2012 Repo et al., 2012 Chloupek et al., 1999 Dalton, 1995
	Imagerie par résistivité électrique	In Situ	-Non destructif et non invasif -Informations sur d'autres propriétés du milieu	-Faible résolution spatiale -Bruit du background (eau, pierres, texture) -Influence de la température	-Quantification et cartographie racinaire	Amato et al., 2012 Rossi et al., 2011 Amato et al., 2009 Amato et al., 2008



Annexe 7 : Dispositif expérimental du projet SOLRESIDUS

SOLRESIDUS

