

Faculté des bioingénieurs

Étude du développement racinaire de cultures maraichères post-conversion de prairie selon différentes modalités de culture.

Approche via modélisation

Auteur : Nicolas Heinrich-Thuet

Promoteur : Pr. Guillaume Lobet (UCL/ELI/ELIA)

Lecteur(s) : Pr. Pierre Bertin (UCL/ELI/ELIA)

Pr. Valentin Couvreur (UCL/ELI/ELIA)

Année académique : 2022 -2023

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un diplôme de bioingénieur : Master bioingénieur, sciences agronomiques

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été rendu possible grâce à de nombreuses personnes que je souhaite remercier sincèrement.

Je voudrais premièrement remercier de tout cœur mon promoteur Guillaume Lobet pour l'encadrement et le suivi qu'il m'a accordés. Merci pour ta sympathie, ta bonne humeur, ton humour et de m'avoir fait senti comme un membre à part entière du laboratoire PEPA. Merci également pour ton implication dans les expériences réalisées.

Un énorme merci à tous les membres du laboratoire PEPA et tout particulièrement à Thomas Dagbert pour m'avoir autant aidé dans la réalisation de mes expériences en serre. Merci pour le partage de tes connaissances, tes conseils ainsi que le prêt de tout le matériel. Merci également à Marc Migon pour son aide dans les serres de Louvain-la-Neuve. Je remercie également Pierre Bertin pour m'avoir permis de travailler sur son essai.

Je souhaite également remercier toutes les personnes de la ferme de Lauzelle pour leur aide ainsi que leur confiance. Merci à Hugues Falys, responsable opérationnel des fermes universitaires de Louvain et Rémi Desmet, responsable des projets des fermes universitaires.

Merci à tous les collègues bioingénieurs qui m'ont accompagnées durant ces six années d'étude à Louvain-la-Neuve avec qui j'ai passé des moments formidables. Merci particulièrement à Thomas, Sébastien, Nicolas, Alexis.

Enfin, merci à ma famille pour son soutien sans faille durant toutes ces années. Et merci évidemment à toi loulou, pour tous tes encouragements et ton soutien.

Table des matières

Table des figures	V
Liste des tableaux	VII
Liste des équations	VIII
Liste des abréviations	IX
Introduction	1
État de l'art	2
1. Prairies permanentes	2
1.1. Définition	2
1.2. Conversion de prairies	3
1.2.1. Généralités	3
1.2.2. Législation	3
1.2.3. Techniques de conversion.....	4
2. Maraichage	4
2.1. Importance.....	4
2.2. Maraichage après conversion de prairie.....	5
3. Les modèles racinaires	6
3.1. Généralités.....	6
3.2. Le modèle ArchiSimple	6
3.3. Paramètres du modèle ArchiSimple	8
Objectifs	11
Matériels et méthodes	12
1. Caractéristiques des essais	12
1.1. Caractéristiques du champ expérimental	12
1.2. Caractéristiques des rhizotrons	13
2. Disposition des essais	13
2.1. Plan expérimental	13
2.2. Chronologie.....	14
2.2.1. Périodes de conversion	14
2.2.2. Semis des cultures.....	14
2.3. Traitements.....	15
2.3.1. Labour	15
2.3.2. Bâche.....	15
2.3.3. Occultations organiques.....	15
3. Méthode d'échantillonnage	15
4. Mesures	16
4.1. Expériences en champ expérimental	16
4.1.1. Récolte des échantillons.....	16
4.1.2. Témoins.....	17
4.1.3. Scan des systèmes racinaires	18
4.1.4. Mesure de la masse sèche	18

4.1.5.	Traitement des scans racinaires.....	19
4.1.6.	Analyse des systèmes racinaires	20
4.2.	Expériences en rhizotrons.....	20
4.2.1.	Intérêts.....	20
4.2.2.	Méthode.....	21
4.2.3.	Scans des rhizotrons.....	22
4.2.4.	Traitement des scans de rhizotrons	22
4.2.5.	Analyse des rhizotrons	22
4.3.	Modélisation	23
4.3.1.	Méthode.....	23
4.3.2.	Simulations.....	23
5.	Analyses statistiques	24
5.1.	Moyenne, écarts-type et erreur standard	24
5.2.	Modèle linéaire.....	24
5.3.	Analyse de la variance.....	25
5.3.1.	Principe de l'analyse de la variance	25
5.3.2.	Hypothèses de l'analyse de la variance.....	25
5.3.3.	ANOVA I (à un critère de classification)	25
5.3.4.	Test de Tukey	26
5.4.	Boxplots	26
6.	Présentation de l'étude pédologique de l'essai	27
6.1.	Expériences sur la chimie du sol	27
6.2.	Expériences sur la physique du sol	28
6.3.	Expériences sur la biodiversité du sol	28
	Résultats et discussion	29
1.	Comparaison interspécifique	29
1.1.	Comparaison de paramètres.....	29
1.1.1.	Diamètres minimums et maximums	29
1.1.2.	Distance inter-ramification	31
1.1.3.	Masse sèche	31
1.1.4.	Paramètres uniques aux rhizotrons	32
1.2.	Comparaison des rhizotrons scannés	33
1.3.	Comparaison de modélisation interspécifique	34
2.	Comparaison inter-traitement	36
2.1.	Épinard.....	36
2.1.1.	Paramètres individuels.....	36
2.1.2.	Modélisation	39
2.1.3.	Sorties de modèle	41
2.2.	Butternut	42
2.2.1.	Paramètres individuels.....	42
2.2.2.	Modélisation	44
2.2.3.	Sorties de modèle	45
2.3.	Potimarron.....	47
2.3.1.	Paramètres individuels.....	47
2.3.2.	Modélisation	49
2.3.3.	Sorties de modèle	50

Discussion générale.....	52
1. Comparaison interspécifique	52
1.1. Discussion de l'effet espèce.....	52
1.2. Discussion de la modélisation interspécifique.....	52
1.3. Discussion de l'exercice de validation.....	52
2. Comparaison inter-traitement	53
2.1. Absence d'effet traitement sur les paramètres.....	53
2.2. Discussion de la modélisation.....	53
2.2.1. Modélisation de l'épinard	53
2.2.2. Modélisation du butternut.....	53
2.2.3. Modélisation du potimarron.....	54
2.3. Effet traitement sur la longueur totale.....	54
2.4. Effet traitement modéré sur la profondeur.....	54
2.5. Généralisation de l'effet traitement	54
3. Comparaison paramétrique des expériences.....	55
4. Recommandations.....	57
5. Améliorations potentielles du travail.....	58
Conclusion et perspectives	59
Références bibliographiques	61
Annexes	65
Annexe 1 : Exigences du maraichage	65
Annexe 2 : Table de lavage utilisée.....	66
Annexe 3 : Composition de la solution d'Hoagland (Smith et al., 1983).....	66
Annexe 4 : Scanner utilisé dans le cadre des expériences	67
Annexe 5 : Évolution de la croissance du butternut en fonction du temps pour tous les traitements	67
Annexe 6 : Évolution de la croissance du potimarron en fonction du temps pour tous les traitements	68

Table des figures

Figure 1 – Nombre d’exploitation et superficie agricole en 2021 (SPW, 2022)	2
Figure 2 – Évolution de la superficie des principaux légumes en plein air en Région wallonne entre 2010 et 2018 (Statbel, 2019)	5
Figure 3 – Représentations racinaires obtenues avec ArchiSimple (Pagès et al., 2014)	7
Figure 4 – Croissance primaire et croissance secondaire (Boundless, 2021)	8
Figure 5 – Localisation de la parcelle d’essai à la ferme de Lauzelle, Louvain-la-Neuve	12
Figure 6 - Rhizotron contenant des graines de courge	13
Figure 7 – Disposition des parcelles d’essai de conversion de prairies (Wilkin & Legast, 2022)	14
Figure 8 – Première récolte des épinards le 18 mai 2022	16
Figure 9 – Deuxième récolte des épinards (à gauche), le 10 juin 2022 et troisième récolte (à droite), le 27 juin 2022	17
Figure 10 – Plantes témoins de butternuts et potimarrons	18
Figure 11 – Racines de courges (à gauche) et d’épinard (à droite) prêtes à être scannées	18
Figure 12 – Systèmes caulinaires d’épinards à l’étuve	19
Figure 13 – Racine d’épinard traitée avec SmartRoot	19
Figure 14 – Rhizotrons d’épinards au début de l’expérience	21
Figure 15 – Rhizotrons de courge prêt à être scanné	22
Figure 16 – Composition des différentes parties d’un boxplot (David’s Statistics, 2016)	27
Figure 17 - Distribution statistique des diamètres maximums et minimums	30
Figure 18 – Boxplot et comparaison interspécifique du diamètre maximal (A) et du diamètre minimal (B)	30
Figure 19 – Boxplot et comparaison interspécifique de la distance inter-ramification	31
Figure 20 - Comparaison des masses sèches des échantillons récoltés	32
Figure 21 - Relation entre le diamètre apical et le taux de croissance de l’épinard (A), le butternut (B) et le potimarron (C)	33
Figure 22 – Scans des rhizotrons en fin d’expérience des trois espèces : épinard (en haut), butternut (à gauche) et potimarron (à droite)	34
Figure 23 - Comparaison de modélisation des espèces cultivées en rhizotrons après 35 jours	35
Figure 24 - Comparaison inter-traitement du diamètre maximal (A) et minimal (B) pour l’épinard	37
Figure 25 - Comparaison inter-traitement de la distance inter-ramification (A) et de la densité des tissus racinaires (B) pour l’épinard	37
Figure 26 – Relation entre le diamètre des racines mères et celui des racines filles pour l’épinard	38
Figure 27 – Scans des échantillons d’épinards récoltés au temps T1 (en haut), T2 (à gauche) et T3 (à droite)	40
Figure 28 – Modélisation du système racinaire de l’épinard selon différents traitements après 40 jours pour le temps de récolte T2	40
Figure 29 – Comparaison de la longueur totale du système racinaire (A) et de la profondeur (B) pour tous les traitements de l’épinard à la période de récolte T2	41
Figure 30 – Comparaison de l’évolution de la profondeur pour tous les traitements de l’épinard	42
Figure 31 - Comparaison inter-traitement du diamètre maximal (A) et du diamètre minimal (B) pour le butternut	43
Figure 32 - Comparaison inter-traitement de la distance inter-ramification (A) et de la densité des tissus racinaires (B) pour le butternut	43
Figure 33 – Relation entre le diamètre des racines mères et celui des racines filles pour le butternut	44

Figure 34 – Scan d'échantillon de butternut récolté.....	44
Figure 35 – Modélisation du système racinaire du butternut selon différents traitements après 60 jours	45
Figure 36 – Comparaison de la longueur totale (A) et de la profondeur (B) du système racinaire pour tous les traitements du butternut.....	46
Figure 37 – Comparaison de l'évolution de la profondeur pour tous les traitements du butternut	46
Figure 38 - Comparaison inter-traitement du diamètre maximal (A) et du diamètre minimal (B) pour le potimarron	47
Figure 39 - Comparaison inter-traitement de la distance inter-ramification (A) et de la densité des tissus racinaires (B) pour le potimarron.....	48
Figure 40 – Relation entre le diamètre des racine mères et celui des racines filles pour le potimarron.....	48
Figure 41 – Scans des échantillons de potimarrons récoltés : Labour (à gauche) et Témoin (à droite)	49
Figure 42 – Modélisation du système racinaire du potimarron selon différents traitements après 60 jours	50
Figure 43 – Comparaison de la longueur totale (A) et de la profondeur (B) du système racinaire pour tous les traitements du potimarron	51
Figure 44 – Comparaison de l'évolution de la profondeur pour tous les traitements du potimarron.....	51
Figure 45 - Modélisation des expériences de Lauzelle avec l'IPD fixé pour l'épinard (A), le butternut (B) et le potimarron (C).....	56
Figure 46 - Relation entre le diamètre et la croissance avec une méthode alternative pour l'épinard (A), le butternut (B) et le potimarron (C).....	57

Liste des tableaux

Tableau 1 – Paramètres et processus du modèle ArchiSimple	9
Tableau 2 - Méthode d'obtention des paramètres	24
Tableau 3 - Comparaison de la longueur totale et de la profondeur pour les systèmes racinaires modélisés et obtenus en rhizotrons	36
Tableau 4 – Paramètres fixes pour l'épinard	39

Liste des équations

Équation 1 – Minéralisation de l'azote	3
Équation 2 – Moyenne, écart-type et erreur standard	24
Équation 3 – Hypothèse nulle et alternative de l'ANOVA.....	24
Équation 4 – Hypothèse nulle et alternative de l'ANOVA.....	25
Équation 5 – Modèle probabiliste de l'ANOVA I	25
Équation 6 – Hypothèse nulle et alternative du test de Tukey	26

Liste des abréviations

ANOVA	Analyse de la variance
APL	Azote potentiellement lessivable
C	Carbone
CePiCOP	Centre pilote céréales et oléo-protéagineux
CIPAN	Cultures intermédiaires pièges à nitrates
COS	Carbone organique du sol
CRA-W	Centre wallon de recherche agronomique
CSV	Comma separated value
CtRab	Cellule transversale de recherche en agriculture biologique
DPI	Dots per inch
GRANAR	Generator of root anatomy in R
MECHA	Model of explicit cross-section hydraulic anatomy
MO	Matière organique
N	Azote
PAC	Politique agricole commune
PGDA	Programme de gestion durable de l'azote
QQ	Quantiles-Quantiles
SAU	Surface agricole utile
SSA	Survey surface agricoles
XML	Extensible markup language

Introduction

De plus en plus de maraichers décident d'implanter des cultures maraichères sur d'anciennes prairies permanentes. Bien que celles-ci soient intéressantes au niveau pédologique, cette conversion accélère le cycle du carbone ainsi que celui de l'azote pouvant causer des pertes de matières organiques ainsi que des pertes d'azote par lixiviation.

De nombreuses études émergent quant à l'impact de l'implantation de ces cultures sur ces anciennes prairies. Cependant peu d'études relatives aux systèmes racinaires de ces cultures ont déjà vu le jour. Ce travail se penche ainsi sur cet aspect par le biais de la modélisation à l'aide d'un modèle d'architecture racinaire. Différentes modalités de conversion de prairie seront étudiées et comparées à l'aide du modèle. Trois espèces maraichères seront étudiées, l'épinard, le butternut et le potimarron.

Ce travail est divisé en quatre parties. La première partie, « *État de l'art* », aborde les informations connues à ce jour sur les prairies permanentes et leurs conversions. Un deuxième point sur le maraichage y est établi et l'importance de celui-ci. Enfin, un dernier point sur les modèles racinaires y est présenté avec un focus particulier sur le modèle ArchiSimple, utilisé dans ce travail.

La deuxième partie, « *Matériels et méthodes* », décrit l'intégralité des expériences réalisées dans le cadre de ce travail à la fois à la ferme expérimentale de Lauzelle et dans les serres de l'UCLouvain. Toute la méthode et les outils utilisés pour obtenir des résultats à analyser sont décrits dans cette section. L'intégralité des méthodes d'obtention des paramètres du modèle y est exposée.

La troisième partie, « *Résultats et discussion* », présente les différents résultats observés à la fois en conditions contrôlées ainsi que pour les cultures de la ferme de Lauzelle. Une comparaison interspécifique y est réalisée dans un premier temps suivie d'une comparaison des différentes modalités de conversion. Les résultats de la modélisation y sont présentés et une première discussion d'effets directement observable est réalisée.

La quatrième et dernière partie, « *Discussion générale* », discute des effets globaux observés à travers l'intégralité des expériences et resitue ces résultats par rapport aux objectifs de départ. Certaines recommandations et améliorations potentielles du travail sont également exposées dans cette section.

État de l'art

1. Prairies permanentes

1.1. Définition

Le terme prairie permanente qualifie une terre servant à la production de plantes fourragères herbacées ne rentrant pas dans un système de rotation des cultures depuis cinq ans ou plus. Ces prairies peuvent être ensemencées ou non et sont composées d'espèces pérennes tels que le ray-grass anglais, le dactyle, le trèfle blanc ou encore la fétuque des prés (Fourrage Mieux, 2020).

Les prairies permanentes occupent aujourd'hui encore une place très importante dans les exploitations agricoles belges. En 2021, ces prairies occupaient près de 42% de la Surface Agricole Utile (SAU), soit environ 311.287 hectares (SPW, 2022). La Figure 1 illustre le nombre d'exploitations et la superficie agricole utilisée en 2021.

Ces prairies sont reconnues pour offrir de nombreux services écosystémiques variés. Parmi ceux-ci, on peut noter une contribution à la préservation des sols (limitation des problèmes d'érosion, épuration des eaux), à l'alimentation animale, à la régulation climatique (séquestration du carbone) ou encore à l'attraction d'auxiliaires de cultures et de pollinisateurs (Theau & Choisis, 2016). Maintenir ces prairies est donc essentiel. Par ailleurs, des primes relatives au maintien des prairies permanentes sont octroyées dans le cadre du premier pilier de la Politique Agricole Commune (PAC). Ces primes se retrouvent sous forme d'éco-régimes, un nouveau système de paiement vert de la nouvelle PAC 2023-2027. L'éco-régime « *Maintien des prairies et réduction de la charge en bétail* » vise ainsi, en partie, à préserver ces prairies permanentes en offrant une aide financière de base de 40€/hectare accompagnée d'une prime supplémentaire conditionnée à la charge en bétail sur la prairie (Portail de l'agriculture wallonne, 2022).

	2021	%	Moyenne par exploitation
Exploitations (nombre)			
Ensemble des exploitations	12 728	-	-
Exploitations professionnelles	10 384	100.0 %	-
Grandes cultures	3 432	33.1 %	-
Bovins laitiers	1 448	13.9 %	-
Bovins viandeux	2 337	22.5 %	-
Bovins laitiers et viandeux	1 213	11.7 %	-
Cultures et bovins	1 136	10.9 %	-
Autres	818	7.9 %	-
Superficie agricole utilisée (ha)			
Surface agricole utilisée	740 623	100.0 %	58.19
Prairies permanentes	311 287	42.0 %	-
Cultures fourragères	105 364	14.2 %	-
Céréales	185 576	25.1 %	-
Cultures industrielles	64 553	8.7 %	-
Pommes de terre	40 019	5.4 %	-

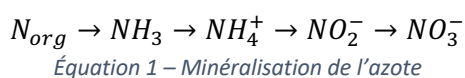
Figure 1 – Nombre d'exploitation et superficie agricole en 2021 (SPW, 2022)

1.2. Conversion de prairies

1.2.1. Généralités

Une prairie permanente peut être convertie en terre de culture. Cette pratique, appelée conversion de prairie (anciennement surnommée destruction de prairie), a cependant des conséquences sur le sol. Les sols des prairies permanentes présentent une concentration en carbone (C) organique et en azote (N) bien plus importante que des terres de culture (Poeplau et al., 2011). Il y a là un réel avantage d'effectuer cette conversion pour la mise en place de culture. Cependant, cette conversion provoque une accélération du cycle de l'azote ainsi que du cycle du carbone. En conséquence, on peut y observer une perte significative de matière organique (MO) (les pertes peuvent aller jusqu'à 40% de carbone organique) associée à une minéralisation de l'azote (Équation 1) (Poeplau et al., 2011).

Cette minéralisation de l'azote est dangereuse car elle peut causer, lors des pluies, une lixiviation des nitrates en profondeur des nappes phréatiques. Cette lixiviation peut alors générer une pollution intense. La prairie peut ainsi libérer entre 300 et 700 kg d'azote par hectare les deux premières années suivant sa conversion.



1.2.2. Législation

Pour empêcher la contamination des nappes par les nitrates, la protection des eaux souterraines est réglementée par plusieurs législations. En Europe, la directive 91/676/CEE, appelée Directive Nitrate, impose à chaque état européen un programme d'action. En Wallonie, la directive utilisée est le Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) (PROTECT'eau, 2022c). Ce programme gère et impose de nombreuses procédures à suivre concernant la gestion et l'utilisation de l'azote sous toutes ses formes (stockage des engrais azoté, gestion de l'épandage, etc.).

L'Azote Potentiellement Lessivable (APL), un outil de mesure du reliquat de nitrate présent dans les sols après récolte, a été mis en place dans le cadre du PGDA. Cet outil permet de contrôler la bonne gestion de l'azote en zone vulnérable. Les mesures d'APL sont contrôlées dans les 90 premiers centimètres du sol des parcelles agricoles (PROTECT'eau, 2022a). Un contrôle est effectué sur trois parcelles sélectionnées aléatoirement dans une exploitation. Une exploitation se voit conforme dans son contrôle de l'APL si elle ne dépasse pas une valeur seuil, appelée seuil d'intervention, représentant le contenu en azote minéral résiduel dans le profil cultural (PROTECT'eau, 2022a). Cette valeur seuil a été déterminée grâce à un réseau de parcelles cultivées, les Survey Surfaces agricoles (SSA), qui permettent d'établir annuellement les valeurs de l'APL (Vandenberghe & Marcoen, 2004).

La conversion des prairies fait l'objet d'une réglementation stricte encadrée par le PGDA. Elle n'est autorisée qu'entre le 1^{er} février et le 31 mai (PROTECT'eau, 2022b). De nombreuses règles sont à respecter avant la conversion ainsi que dans les deux années qui suivent celle-ci. Il convient ainsi d'arrêter la fertilisation organique ou minérale avant la conversion (PROTECT'eau, 2022b). Il est interdit d'apporter des engrais minéraux la première année post-conversion et d'apporter des engrais organiques les deux années post-conversion (PROTECT'eau, 2022b). Enfin, l'implantation de légumes ou légumineuses n'est également pas autorisée durant les deux années qui suivent la conversion (PROTECT'eau, 2022b).

Afin de gérer efficacement la fertilisation azotée suite à une conversion de prairie, il convient idéalement d'y planter des cultures gourmandes en azote ainsi que de couvrir complètement le sol de manière permanente afin de limiter les risques environnementaux (Hardy & Godden, 2018).

1.2.3. Techniques de conversion

Afin de convertir une prairie, un labour peut être utilisé. Le labour consiste à retourner la terre à une certaine profondeur afin de préparer le sol pour l'implantation de cultures. Il permet ainsi de détruire la végétation déjà existante, ameublir le sol et amener de la matière organique provenant des premières couches du sol (Biielders et al., 2021). Cependant le labour possède également de nombreux inconvénients également. Le mélange des couches superficielles du sol accélère la minéralisation des éléments minéraux ce qui peut causer un pic de minéralisation qui entraîne une lixiviation des nitrates du sol (Wilkin & Legast, 2022). D'autres inconvénients sont à noter tels qu'un assèchement des sols ce qui peut augmenter les risques d'érosion (Biielders, 2018), la création d'une semelle de labour, une couche de sol dense formée sous le soc de la charrue (Wilkin & Legast, 2022) ou encore un impact négatif sur l'activité microbienne (Bertin, 2021). Il est important de noter également qu'un mauvais labour va influencer considérablement le développement d'adventices et les reliquats azotés du sol (Wilmus, 2021).

Une autre méthode de conversion de prairie assez répandue consiste en une conversion chimique. Un herbicide total est alors utilisé tel que le glyphosate. Cette molécule inhibe la biosynthèse des acides aminés aromatiques chez les plantes ce qui perturbe la croissance hormonale et la synthèse des vitamines chez la plante (Picque, 2016). L'utilisation du glyphosate est une alternative aux inconvénients du labour ; cependant des études ont montré qu'il s'agit d'une molécule toxique ayant des impacts sur la biodiversité ainsi que sur la santé humaine (Picque, 2016). Le glyphosate était normalement autorisé jusqu'au 15 décembre 2022 (EFSA, 2022) mais l'autorisation a été prolongée d'un an jusqu'en décembre 2023 (Pleinchamp, 2022). Le glyphosate est cependant totalement interdit en agriculture biologique.

Il existe une troisième méthode de conversion de prairie : l'occultation. La méthode consiste à recouvrir la prairie d'une couche opaque telle qu'une bâche pour empêcher la lumière d'atteindre la végétation et bloquer la photosynthèse (Blanchard, 2022). D'autres alternatives à la bâche peuvent être adoptées telles que l'utilisation de feuilles mortes, de copeaux de bois ou de paille (Wilkin & Legast, 2022).

2. Maraichage

2.1. Importance

Le maraichage est une pratique qui consiste à cultiver des légumes en plein air. En 2021 en Belgique, les produits maraichers et horticoles représentaient 4,3% de la SAU (Statbel, 2022). Cependant, bien que la surface de culture soit beaucoup plus faible que celles des grandes cultures, la valeur de la production de ces produits maraichers est la plus importante (36,2% de la valeur de la production de l'agriculture) (Statbel, 2022).

En Région wallonne, la superficie de culture des légumes en plein air a augmenté de près de 56% entre 2008 et 2018 (18.143 hectares en 2018 pour 11.630 hectares en 2010) (Riera et al., 2020). Concernant les différents légumes cultivés, trois légumes principaux dominent la production maraichère sur cette période 2010-2018. Il s'agit des petits pois, des haricots verts et des carottes. Parmi les autres légumes les plus cultivés, on retrouve les oignons, les épinards ou encore les racines de witloof (Riera et al., 2020). La Figure 2 illustre les quantités de légumes cultivés pour la période 2010-2018.

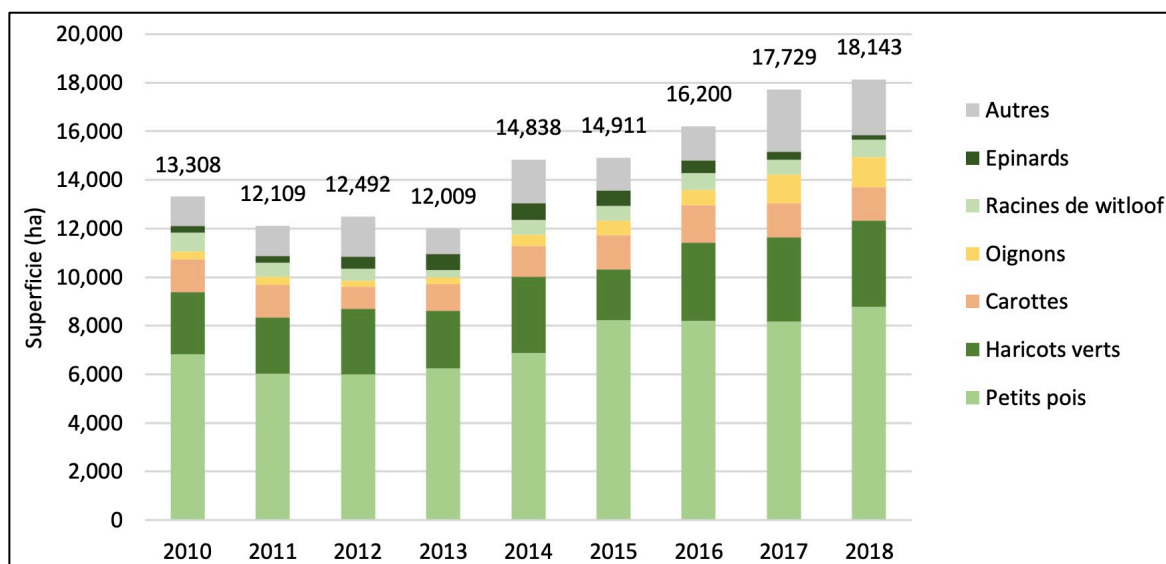


Figure 2 – Évolution de la superficie des principaux légumes en plein air en Région wallonne entre 2010 et 2018 (Statbel, 2019)

Beaucoup de légumes en plein air sont également cultivés en agriculture biologique. En 2021, c'est 2.659 hectares de légumes qui sont cultivés en bio en Wallonie (Biowallonie, 2022). Cela représente près de 3% de l'intégralité des surfaces cultivées en agriculture biologique en Wallonie (Biowallonie, 2022). La superficie du maraichage bio a connu une constante évolution depuis dix ans avec seulement 372 hectares en 2011 (Biowallonie, 2022). Concernant les légumes cultivés, les plus présents sont également les pois et les carottes, destinés principalement à l'agro-industrie (Biowallonie, 2022).

2.2. Maraichage après conversion de prairie

De nombreux maraichers, que cela soit des nouveaux exploitants ou des maraichers expérimentés, désirent s'implanter sur d'anciennes prairies permanentes car il s'agit de terres riches en matières organiques, épargnées des produits phytos et présentant un coût bien plus abordable (Hardy et al., 2017). Cependant, le PGDA interdit la culture de légumes dans les deux premières années suivant la conversion de la prairie en raison de l'incapacité des légumes à prélever de manière efficace l'excès d'azote minéralisé (Hardy et al., 2017).

Une étude de la Cellule transversale de Recherche en Agriculture biologique (CtrAb) du Centre wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W) a eu lieu entre 2016 et 2017, qui avait pour but d'estimer la quantité d'azote minéral produit sur des prairies converties les deux premières années suivant leurs conversions ainsi que d'évaluer les risques de lixiviation des nitrates pour différents légumes au cours des deux premières années culturales. Il ressort de cette étude qu'un bon nombre de légumes dépassent les seuils d'APL en raison de leur faible capacité d'absorption de l'azote (Hardy et al., 2017). Cet excès s'observe surtout chez les légumes dits « feuilles » ayant un faible enracinement racinaire. Une concentration trop élevée de nitrates dans ces légumes peut entraîner un retrait de la vente de ceux-ci pour risques nocifs sur la santé (Heens, 2013). L'étude a également montré que les légumes dits « racines », exigeants en azote (carotte, betterave, etc.), ont suffisamment pompé l'azote et appauvri le sol en dessous des seuils d'intervention (Hardy et al., 2017). Afin de gérer efficacement l'azote dans les périodes de mise à nu du sol, il convient d'installer des Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates (CIPAN) (Hardy et al., 2017). Les CIPAN sont des cultures de couvertures ayant pour but de protéger la qualité de l'eau de la pollution par les nitrates (Bertin, 2021).

3. Les modèles racinaires

3.1. Généralités

Les modèles d'architecture racinaire sont intéressants pour pouvoir se représenter facilement le système sol-plante. Ils présentent des caractéristiques d'intérêt pour toute personne qui souhaite étudier le système racinaire des plantes. Ils permettent, premièrement, de simuler la structure du système racinaire dans l'espace afin de se rendre compte de la complexité de celui-ci (Pagès et al., 2014). Deuxièmement, ils permettent de représenter différents mécanismes de développement racinaire et l'interaction système racinaire-sol (Pagès et al., 2014). Troisièmement, ils permettent de simuler des interactions entre la racine et la tige via différentes méthodes d'allocation de ressources ou via des signaux chimiques (Pagès et al., 2014).

De plus en plus de modèles ont vu le jour ces dernières années suite à l'évolution des outils de modélisation. Chaque modèle présente donc ses spécificités et leur utilisation diffère selon le but recherché. *Generator of Root Anatomy in R (GRANAR)* est un modèle développé pour générer rapidement des réseaux anatomiques digitaux de racines de plantes monocotylédones (Heymans et al., 2020). Un autre modèle utilisé pour travailler sur l'hydraulique racinaire est, par exemple, *Model of Explicit Cross-section Hydraulic Anatomy (MECHA)* qui permet d'obtenir des estimations des conductivités hydrauliques axiales et radiales des racines (Couvreur et al., 2018). Un autre modèle, *CRootBox* permet, lui, de représenter une modélisation de l'architecture racinaire en relation avec son environnement statique et dynamique (Schnepf et al., 2018).

Ainsi, les modèles d'architecture racinaire sont multiples et leur utilisation est variée. Certains fournissent des informations sur l'aspect structural du système racinaire, d'autres sur des processus tels que l'exsudation, l'assimilation des nutriments ou l'allocation des ressources dans la plante (Pagès et al., 2014 ; Personeni et al., 2007). Cependant, peu de ces modèles d'architecture racinaire sont intégrés dans un contexte plus large de modèles écosystémiques dû à la complexité de ceux-ci (Pagès et al., 2014 ; Pedersen et al., 2010). Il est difficile de modéliser le système racinaire de manière exhaustive tout en y intégrant les effets de l'environnement. De plus, beaucoup de modèles racinaires ne sont pas représentatifs d'une plante entière et beaucoup d'entre eux ne savent pas représenter à la fois le système racinaire et le système caulinaire (Pagès et al., 2014). La quantité de paramètres à estimer représente également un aspect contraignant des modèles racinaires. *CRootBox*, par exemple, présente une vingtaine de paramètres à estimer pour chaque type de racine ce qui fait très vite monter le nombre total de paramètres et devient un processus fastidieux (Schnepf et al., 2018). L'idée de proposer un modèle simplifié et générique permettrait de faire face à ces contraintes. C'est la proposition du modèle *ArchiSimple*, développé par Loïc Pagès et son équipe en 2012.

3.2. Le modèle *ArchiSimple*

Le modèle *ArchiSimple* a été développé principalement en réponse aux contraintes évoquées dans la section 3.1. Il s'agit d'un modèle représentant le système racinaire selon trois dimensions : la largeur du système racinaire, la profondeur du système racinaire et le temps de croissance. *ArchiSimple* permet de représenter une certaine diversité architecturale ainsi que de nombreux processus contribuant au développement dynamique de la plante pour de nombreuses espèces tout en tenant compte de l'interaction de celles-ci avec l'environnement. Tous ces processus sont représentés par un nombre simplifié de paramètres tout en restant le plus précis possible. Le modèle suppose que les variations des caractéristiques du développement racinaire peuvent être estimées très facilement par la taille de l'extrémité de ses racines (Pagès et al., 2014). Il s'agit d'un modèle C++, un langage de programmation compilé permettant la programmation sous différents paradigmes : une programmation générique, procédurale ainsi qu'une programmation orientée objet. Le code source est traduit en code objet et la machine peut exécuter celui-ci (Journal du Net, 2020).

Le modèle possède un mélange de paramètres statiques et dynamiques composé principalement de mesures de diamètres et de vitesses de croissance. Ces paramètres peuvent facilement être estimés par le biais d'expériences relativement simples ainsi que par la littérature. La Figure 3 illustre des représentations racinaires pouvant être obtenues avec ArchiSimple.

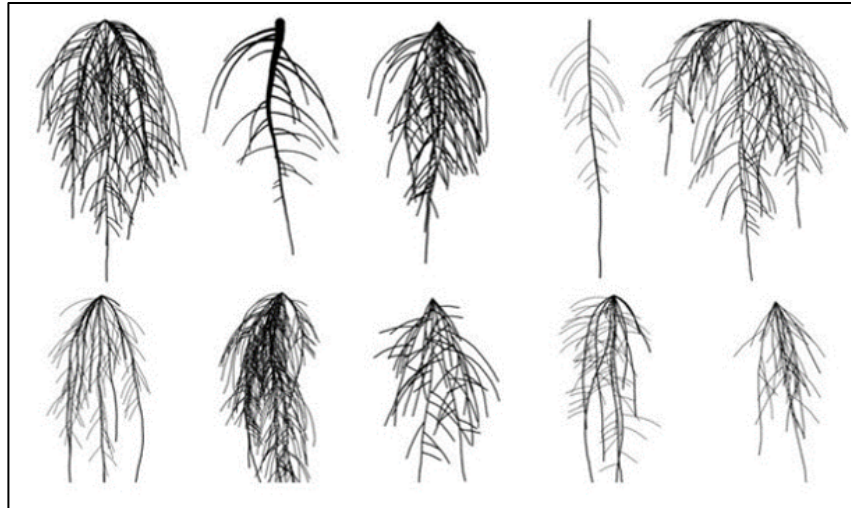


Figure 3 – Représentations racinaires obtenues avec ArchiSimple (Pagès et al., 2014)

Le modèle ArchiSimple est un modèle dynamique ce qui signifie que sa représentation du système racinaire est basée sur un jeu de courts segments de plusieurs millimètres ainsi que sur des méristèmes qui grandissent. Un méristème est une zone de division cellulaire à l'origine des organes et des tissus végétaux (Boundless, 2021). Les méristèmes dits « primaires » sont des zones dans lesquelles la croissance primaire (croissance en longueur) (Figure 4) des organes s'effectue. Aux extrémités des organes telles que la tige ou les racines, les méristèmes sont appelés méristèmes « apicaux » (Microscopie des plantes, 2022). Ceux-ci sont utilisés comme unités de croissance dans le monde végétal.

ArchiSimple fonctionne avec un système de pas de temps et chaque pas de temps correspond à un jour. Entre chaque pas de temps, des fonctions sont appliquées au système racinaire virtuel. Ces fonctions traduisent les processus de développement racinaire principaux utilisés par ArchiSimple : l'**émission de racines adventives**, c'est-à-dire les racines prenant naissance sur une tige aérienne ou souterraine ou tout autre partie du végétal (Biologie Végétale, 2019) ; l'**élongation des racines** traduisant donc le développement du système racinaire en longueur ; la **ramification** qui traduit les relations entre les racines dites « mères » et les racines dites « filles » ; la **croissance radiale**, c'est-à-dire la croissance en épaisseur (qualifiée de croissance « secondaire ») (Figure 4) ; l'**auto-élagage** suite à la décomposition des racines (Pagès et al., 2014). Pour chaque processus, un certain nombre de paramètres est à estimer.

Des paramètres intéressants supplémentaires peuvent être sortis du modèle une fois la simulation réalisée. Tous les segments ainsi que leurs attributs sont disponibles dans un fichier de sortie contenant leurs longueurs, leurs diamètres, leurs ramifications et leurs âges. Depuis cette sortie, il est possible d'obtenir des informations complémentaires tels que la profondeur du système racinaire, sa longueur totale ou encore la surface occupée par celui-ci (Pagès et al., 2014). ArchiSimple fournit également des informations sur l'échange de ressources entre les organes sources (producteurs de substances nutritives) et les organes puits (récepteur de ces substances produites par les organes sources). Pour cela, une fonction décrivant l'offre de ces organes sources est d'abord introduite dans le modèle. La demande pour les organes puits est calculée à chaque pas de temps pour l'ensemble du système racinaire. Afin de vérifier l'efficacité de l'allocation, un coefficient de satisfaction est alors estimé permettant de calculer la croissance réelle.

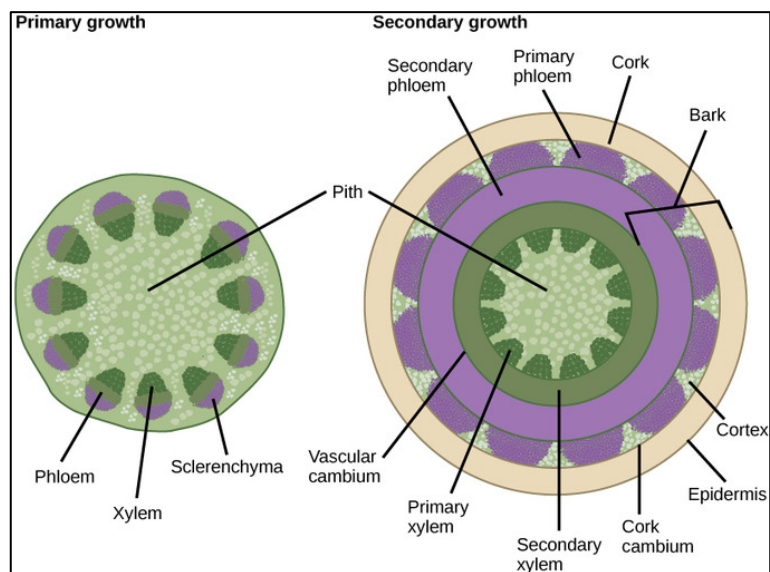


Figure 4 – Croissance primaire et croissance secondaire (Boundless, 2021)

Lorsque le modèle ArchiSimple a été développé en 2012, la première version du modèle comportait 13 paramètres basés sur les différents mécanismes principaux énoncés plus haut. En décembre 2022, le modèle est à présent dans sa version 9.1. et contient 24 paramètres différents, toujours basé sur des processus physiologiques globaux. C'est à l'aide de ce nombre de paramètres et de cette version du modèle que ce mémoire a été réalisé.

3.3. Paramètres du modèle ArchiSimple

Les 24 paramètres d'intérêt du modèle sont ainsi répartis selon les différents processus décrits à la section 3.2. Ainsi, depuis la version 9.1 d'ArchiSimple, les différents processus décrits par les paramètres sont les suivants : **émission des racines primaires, émission de racines adventives, croissance radiale, croissance axiale, ramification** et **mortalité**.

Chaque processus et les paramètres qui lui sont attribués seront décrits en détail par la suite et l'ensemble des paramètres et processus sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Paramètres et processus du modèle ArchiSimple

Processus	Paramètres	Abréviation	Unité
Émission des racines primaires	Vitesse d'émission des racines séminales	<i>erSem</i>	Jour ⁻¹
	Proportion du diamètre maximal pour les racines séminales	<i>dSem</i>	/
	Nombre maximal de racines séminales	<i>maxSem</i>	/
Émission des racines adventives	Âge du début d'émission des racines adventives	<i>ageAdv</i>	Jour
	Distance à la base maximale pour les racines adventives	<i>distAdv</i>	/
	Vitesse d'émission des racines adventives	<i>erAdv</i>	Jour ⁻¹
	Proportion du diamètre maximal pour les racines adventives	<i>dAdv</i>	/
	Nombre maximal de racines adventives	<i>maxAdv</i>	/
Croissance radiale	Coefficient de croissance radiale	<i>SGC</i>	/
Croissance axiale	Diamètre minimal en deçà duquel il n'y a plus de croissance	<i>dmin</i>	mm
	Diamètre apical maximal des racines primaires	<i>dmax</i>	mm
	Pente de relation entre la vitesse de croissance et le diamètre	<i>EL</i>	mm.mm/jour
	Type de gravitropisme	<i>TrT</i>	/
	Intensité du gravitropisme	<i>Trint</i>	/
	Coefficient de durée de la croissance	<i>GDS</i>	Jour/mm ²
Ramification	Durée de développement des primordias	<i>PDT</i>	Jour
	Distance inter-ramification	<i>IPD</i>	mm
	Probabilité d'émergence d'une latérale sur un axe de diamètre <i>dmax</i>	<i>pdmax</i>	/
	Probabilité d'émergence d'une latérale sur un axe de diamètre <i>dmin</i>	<i>pdmin</i>	/
	Pente de la proportion du diamètre fille par rapport à son diamètre mère	<i>RDM</i>	/
	Coefficient de variation du diamètre des ramifications	<i>CVDD</i>	/
Mortalité	Densité des tissus racinaires	<i>TMD</i>	g/cm ³
	Coefficient d'espérance de vie	<i>LDC</i>	Jour.mm/g
Autre	Durée de la simulation, en jours	<i>simtime</i>	Jour

Le premier processus d'intérêt concerne l'émission des racines primaires. Ces racines primaires (appelées aussi racines séminales) proviennent de l'évolution de la radicule de l'embryon, il s'agit de racines persistantes (Biologie Végétale, 2019). Cette émission est caractérisée par trois paramètres. La **vitesse d'émission des racines séminales** (*erSem*) caractérise la fréquence (en jours) à laquelle de nouvelles racines séminales apparaissent depuis la graine. La **proportion du diamètre maximal pour les racines séminales** (*dSem*) détermine le rapport entre le diamètre maximal du système racinaire et le diamètre de ses racines séminales

afin d'estimer la proportion du diamètre occupée par celles-ci. Le **nombre maximal de racines séminales** (*maxSem*) détermine le nombre total de racines séminales à la fin de la croissance de la plante.

Le second processus concerne l'émission des racines adventives. Ce processus est caractérisé par cinq paramètres. L'**âge du début d'émission des adventives** (*ageAdv*), estimé en jour depuis le début de la croissance. La **distance à la base maximale pour les racines adventives** (*distAdv*) permet d'estimer à quelle distance maximale par rapport à la graine les racines adventives se développent. La **vitesse d'émission des adventives** (*erAdv*) qui, comme pour les séminales, caractérise la fréquence d'apparition des racines séminales. La **proportion du diamètre maximal pour les racines adventives** (*dAdv*) détermine le rapport entre le diamètre maximal du système racinaire et le diamètre de ses racines adventives. Le **nombre maximal de racines adventives** (*maxAdv*), à estimer en fin de croissance.

Le troisième processus concerne la croissance radiale. Il s'agit de la croissance en épaisseur de la racine. Cette croissance est déterminée par un **coefficient de croissance radiale** (*SGC*). Chez les monocotylédones, ce coefficient est nul car ces plantes n'ont pas de croissance secondaire (Pagès et al., 2014).

Le quatrième processus concerne la croissance axiale (croissance en longueur). Elle est déterminée par six paramètres. Le **diamètre minimal** (*dmin*) qui correspond au diamètre en dessous duquel il n'y a plus de croissance racinaire. Le **diamètre maximal** (*dmax*) qui correspond au diamètre apical maximal des racines. Le paramètre traduisant la **relation entre la vitesse de croissance et le diamètre** (*EL*) qui correspond à la pente de cette relation. Il s'agit d'un paramètre important car il définit le taux d'élongation potentiel des racines (Pagès et al., 2014). Le **type de gravitropisme** (*TrT*) définit la manière dont les plantes suivent un stimulus de gravité lors de leur croissance (Lefranc, 2005). L'**intensité du gravitropisme** (*Trint*) détermine la force de ce stimulus. La **durée de la croissance axiale** (*GDS*) correspond à un paramètre estimé par un coefficient.

Le cinquième processus concerne la ramification des racines. Six paramètres déterminent ce processus. La **durée de développement des primordias** (*PDT*) qui détermine la longueur maximale des racines. La **distance inter-ramification** (*IPD*) qui correspond à la distance entre deux racines latérales. Le **rapport entre le diamètre des racines « filles » et celui de leurs « mères »**, le paramètre correspond à la pente de cette relation (*RDM*). La **variation du diamètre des ramifications** (*CVDD*), estimée par un coefficient. La **probabilité d'émergence sur dmin** (*pdmin*), un paramètre de probabilité qui traduit la possibilité qu'une racine latérale supplémentaire de diamètre minimal émerge sur un axe principal. La **probabilité d'émergence sur dmax** (*pdmax*), un paramètre de probabilité qui traduit la possibilité qu'une racine latérale supplémentaire de diamètre maximal émerge sur un axe principal.

Le dernier processus concerne la mortalité des racines. Deux paramètres sont impliqués. La **densité des tissus racinaires** (*TMD*) qui constitue le rapport entre la masse sèche des racines et le volume frais (Pagès et al., 2014). L'**espérance de vie** (*LDC*) de la plante, estimée par un coefficient.

Un des paramètres du modèle est également la **durée de la simulation** (*simtime*) en jours qui peut être réglée à la volonté de l'utilisateur.

Objectifs

L'enjeu environnemental de la conversion des prairies afin d'implanter des cultures maraichères semble une problématique fortement liée à l'époque actuelle. Il est cependant essentiel de s'intéresser aux flux d'azote et de carbone car la conversion de la prairie entraînera une lixiviation rapide de l'azote causée par une perturbation du cycle du carbone. Cela aura pour conséquence une diminution nette de la matière organique du sol. Le problème vient du fait que les cultures maraichères ne sont pas autant demandeuses d'azote qu'une grande culture (maïs, blé, etc.) ce qui peut entraîner une lixiviation importante de l'azote dans les nappes phréatiques et entraîner des problèmes de pollution. Le rendement de ces cultures maraichères peut également être impacté et le développement de maladies pourrait-être favorisé par ces problèmes pédologiques.

Mais d'une part, l'impact de la conversion des prairies sur le système racinaire de plantes maraichères est encore peu étudié. D'autre part, le recours à la modélisation pour comprendre en détail le fonctionnement des systèmes racinaires augmente de plus en plus avec les années et il y a là un grand intérêt à les étudier par le biais de celle-ci. L'enjeu du développement de ces modèles se base sur la capacité des modèles à représenter de manière pertinente l'impact de l'environnement sur le développement racinaire.

L'objectif de ce travail est double : le premier objectif sera **d'analyser le développement racinaire des espèces maraichères selon différentes modalités de conversion de prairie**. Ainsi, des expériences en ferme expérimentale auront lieu sur des parcelles de prairies récemment converties en cultures maraichères. Le second objectif, méthodologique, sera **d'estimer dans quelles mesures le modèle ArchiSimple est capable de représenter les différences de développement observées expérimentalement entre les différentes modalités**.

Dans le cadre de ce travail, les différents paramètres du modèle seront calculés via des expériences. Les paramètres dynamiques du modèle seront obtenus grâce à des expériences effectuées en serre sur des rhizotrons. Les autres paramètres seront obtenus grâce aux expériences effectuées à la ferme de Lauzelle sur un essai agronomique. Les systèmes racinaires seront excavés pour ensuite être scannés et analysés à l'aide d'un logiciel de visualisation racinaire, SmartRoot. Les informations obtenues de ce scan seront traitées et le modèle ArchiSimple sera alors utilisé pour comparer les différentes modalités et sortir des variables d'intérêt de celui-ci.

Matériels et méthodes

1. Caractéristiques des essais

1.1. Caractéristiques du champ expérimental

La première partie du mémoire a été réalisée à la ferme universitaire de Lauzelle, appartenant à l'UCLouvain (Figure 5). Elle est située dans la commune d'Ottignies-Louvain-la-Neuve appartenant à la province du Brabant wallon. C'est en 2017 que la ferme de Lauzelle est devenu une ferme de recherche maraichère, financée par l'UCLouvain ainsi que par la Chaire Baillet Latour (UCLouvain, 2022).

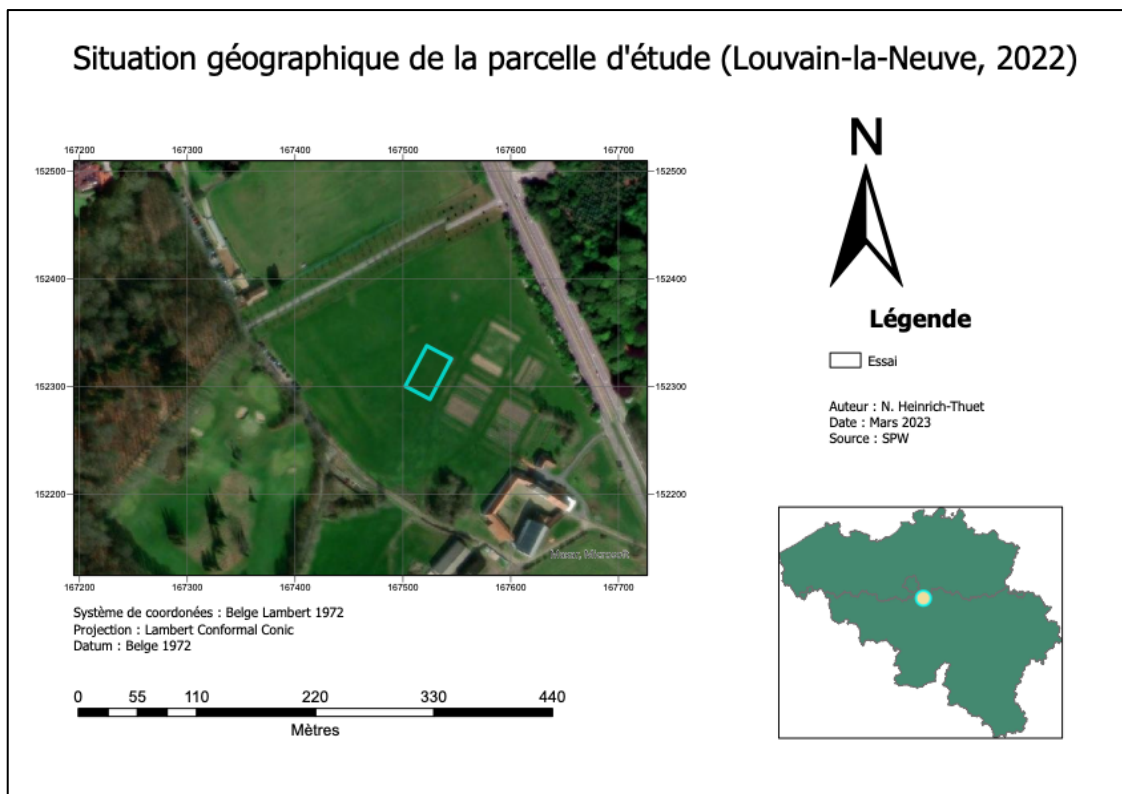


Figure 5 – Localisation de la parcelle d'essai à la ferme de Lauzelle, Louvain-la-Neuve

L'essai à la ferme est situé dans la zone agro-géographique et bioclimatique du plateau limoneux brabançon. Il se trouve à une altitude de 135 mètres et ses coordonnées géographiques sont 50°68 Nord et 4°61 Est (Wilkin & Legast, 2022). Le Géoportail de la Wallonie indique un sol sablo-limoneux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait (SPW Agriculture, 2022).

L'essai agronomique de conversion se situe sur une ancienne prairie permanente pâturée qui n'a pas accueilli de cultures depuis quelques siècles (UCLouvain, 2022). Depuis la transformation de la ferme de Lauzelle en ferme de recherche, la prairie a été fauchée. L'essai a été installé en 2018 (Wilkin & Legast, 2022) et se situe en pente légère d'environ 6% de dénivelé (Wilkin & Legast, 2022). Il est important de noter également que la zone d'essai se situe en zone vulnérable à la lixiviation des nitrates (SPW Agriculture, 2022). L'essai rentre dans le cadre de l'étude de Pierre Bertin sur l'influence de différentes modalités de conversion de prairie sur les flux d'azote et de carbone du sol.

1.2. Caractéristiques des rhizotrons



Figure 6 - Rhizotron contenant des graines de courge

La seconde partie du mémoire a été réalisée dans les serres de l'UCLouvain sur des rhizotrons. Un rhizotron est défini comme : « un système de laboratoire souterrain destiné à l'examen de la croissance des racines des plantes, qui contient des colonnes de sol fermées par des plaques de plastique transparent et qui permettent la visualisation, la mesure et la photographie, des racines » (GRAW-HILL, 2002). Comme représenté sur la Figure 6, le rhizotron est composé d'une surface en bois fine dans laquelle est placé un substrat qui sert de surface solide sur laquelle pourra pousser la racine. Le substrat utilisé est la perlite, une roche volcanique contenant beaucoup d'eau et appréciée pour ses qualités de drainage d'eau facilitant la germination de la graine (Gamm vert, 2018). Sur ce substrat est placé un papier filtre sur lequel poussera la racine, le tout sera maintenu par des barres de fer. Du papier transparent a été également rajouté sur la surface du rhizotron afin de pouvoir tracer l'évolution des racines au marqueur indélébile. Des tuyaux fins seront placés sur le haut du rhizotron pour faciliter l'apport d'eau et de nutriments et le dispositif sera recouvert de plastique opaque afin de ne pas exposer le rhizotron à la lumière et éviter le développement d'algues. Les graines seront placées en haut du dispositif et orientées vers le bas afin de forcer la croissance en profondeur le long du dispositif.

2. Disposition des essais

2.1. Plan expérimental

L'essai de conversion de prairie est disposé sur 15 parcelles de 90m² (3m x 30m) divisées en trois périodes de conversion. La *Date de conversion 1* correspond à une première conversion réalisée en automne 2021, la *Date de conversion 2* a été réalisée en hiver 2021 et la *Date de conversion 3* a été réalisée au printemps 2022 (Wilkin & Legast, 2022). Tous les traitements ont été réalisés en bandes et les traitements *Labours* ont été répétés plusieurs fois pour servir de témoins. La Figure 7 illustre le plan d'expérience ainsi que la disposition des différentes modalités.

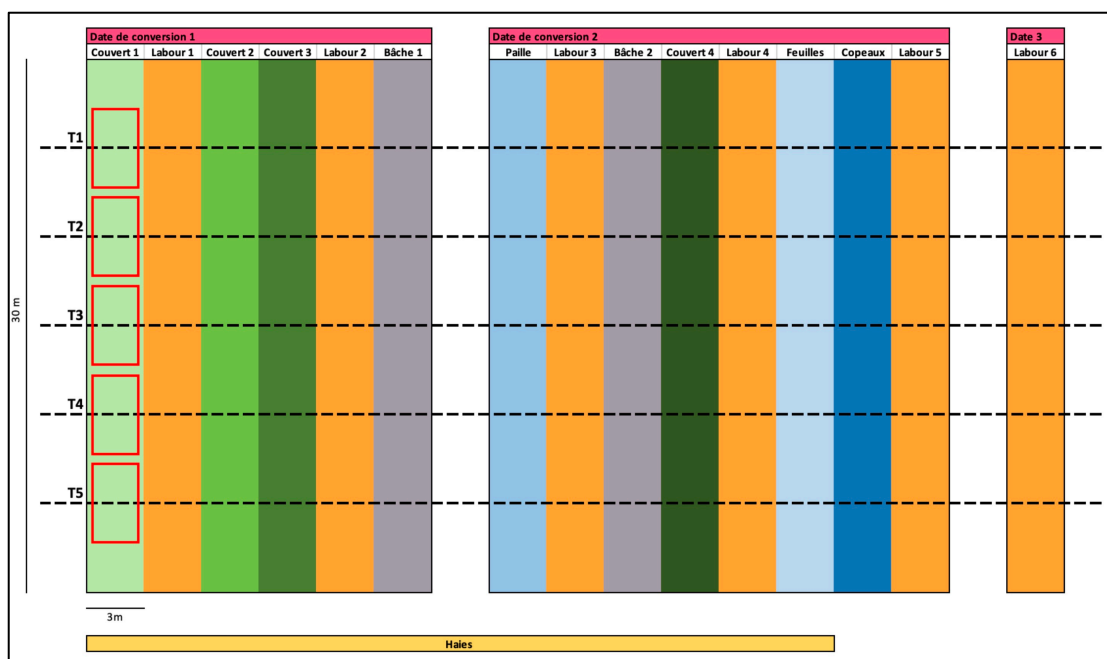


Figure 7 – Disposition des parcelles d'essai de conversion de prairies (Wilkin & Legast, 2022)

2.2. Chronologie

L'idée de l'étude de Pierre Bertin est de tester la conversion de prairies à plusieurs périodes de l'année. L'itinéraire phytotechnique est détaillé ci-dessous.

2.2.1. Périodes de conversion

La première conversion de la prairie a été réalisée au début de l'automne. Les premières parcelles installées étaient les suivantes : *Labour 1*, *Labour 2*, *Couvert végétal 1*, *Couvert végétal 2*, *Couvert végétal 3* ainsi que la *Bâche 1*. Toutes les parcelles ont été labourées le 23 septembre 2021 (Wilkin & Legast, 2022).

Les parcelles de la deuxième conversion ont été installées au début de l'hiver. Il s'agissait des parcelles suivantes : *Labour 3*, *Labour 4*, *Labour 5*, *Couvert végétal 4* ainsi que les occultations *Feuilles*, *Copeaux*, *Paille* et *Bâche 2*. Toutes ces parcelles ont été labourées le 15 novembre 2021 (Wilkin & Legast, 2022).

Lors de la troisième période de conversion, la parcelle *Labour 6* a été installée. Elle a été labourée le 13 avril 2022 (Wilkin & Legast, 2022).

2.2.2. Semis des cultures

Avant d'implanter les cultures, il était nécessaire de travailler le sol. Parmi les travaux effectués, les *Couverts végétaux* et les différentes occultations organiques ont été broyés. Un cultivateur a permis d'incorporer les restes des *Couverts végétaux* dans le sol. Enfin, une herse rotative a été utilisée pour affiner la terre (Wilkin & Legast, 2022).

Suite à cette préparation, les épinards ont été semés par le maraicher de la ferme de Lauzelle, Lucas Contino. Il s'agissait d'épinards bio de la variété Butterfly. Le semoir utilisé provenait du Centre Pilote Céréales et Oléo-protéagineux (CePiCOP), utilisé dans les essais agronomiques (Wilkin & Legast, 2022). Le semis a été effectué le 29 avril 2022 sur l'ensemble de l'essai. Celui-ci fut peu concluant et le taux de levée très faible.

Suite aux épinards, une seconde culture a été implantée, deux espèces différentes de courges : des potimarrons Uchiki-Kuri (*Cucurbita maxima Duchesne*) et des Tiana Butternut (*Cucurbita moschata 'Butternut'*). Le semis été effectué le 2 juin 2022 sur l'ensemble de l'essai.

2.3. Traitements

Ce mémoire n'ayant été réalisé que sur les traitements *Labour*, *Bâche*, *Feuilles*, *Copeaux* et *Paille*, il ne sera détaillé par la suite que ces traitements d'intérêts, les couverts végétaux n'ayant pas été étudiés.

2.3.1. Labour

Le labour a été effectué avec une charrue à une profondeur de 25 cm. La profondeur est assez élevée car une prairie nécessite un labour profond pour éviter les repousses (Hardy et al., 2017).

2.3.2. Bâche

Les deux bâches ont été installées respectivement le 4 octobre 2021 et le 1^{er} décembre 2021. Il s'agit d'une bâche de silo classique (125 microns), maintenue au sol grâce à des tas de terre (Wilkin & Legast, 2022).

2.3.3. Occultations organiques

Les feuilles mortes installées sur la parcelle proviennent d'un ramassage dans la ville de Louvain-la-Neuve. Les feuilles ont été installées le 30 novembre 2021 à l'aide d'une épandeuse. La quantité de feuilles installée est d'environ 53 kg/m². Certaines feuilles de meilleures qualités proviennent des parcs et jardins et sont certifiées « zéro-phyto » (Wilkin & Legast, 2022).

Les copeaux de bois proviennent également de la commune de Louvain-la-Neuve. Ils ont été produits suite au broyage des branches taillées sur les arbres de la ville. Ils ont été installés le 30 novembre 2021 et la quantité est d'environ 40 kg/m² (Wilkin & Legast, 2022).

La paille a été étalée sur la parcelle le 30 novembre 2021. Un ballot de 250 kg a été versé ce qui correspond approximativement à 3 kg/m² (Wilkin & Legast, 2022).

3. Méthode d'échantillonnage

Une préparation de la méthode d'échantillonnage fut nécessaire pour la récolte des échantillons à Lauzelle. Il avait été convenu de découper un carré de terre de cinq centimètres de côté pour chaque plante récoltée. Il a été décidé de récolter les échantillons ayant présentés la plus grande croissance situés idéalement au centre des parcelles de traitements afin d'éviter un effet de bord ou l'influence d'un traitement adjacent. Pour les échantillons de courges, il a été prévu de les sectionner au niveau du collet et de n'extraire que le système racinaire afin de laisser toutes les parties aériennes sur la parcelle d'essai à destination des restaurants universitaires de l'UCLouvain.

4. Mesures

4.1. Expériences en champ expérimental

4.1.1. Récolte des échantillons

La méthode de récolte des échantillons s'est basée sur la méthode scientifique *Shovelomics*, une méthode développée en 2010 permettant de récolter facilement une plante et son système racinaire afin d'en obtenir des paramètres d'architecture (Trachsel et al., 2011).

Les premières récoltes ont été réalisées sur les épinards. Pour cela, il a été convenu d'aller récolter à trois périodes différentes (*T1*, *T2*, *T3*) cinq épinards pour chaque traitement d'intérêt. Les traitements sur lesquels nous avons décidé de travailler sont les *Labour*, *Bâche*, *Feuilles* et *Paille*. La première récolte des épinards (*T1*) a eu lieu le 18 mai 2022, une vingtaine de jours après le semis. En raison d'un climat peu favorable, les épinards n'étaient pas très développés et leur système racinaire très petit. Nous avons cependant quand même récolté cinq épinards pour chaque traitement (Figure 8). Pour les récolter, nous avons utilisé une bêche pour creuser un carré autour de la plante à environ 15 cm de profondeur. Creuser ce carré a permis de déterrer facilement le système racinaire sans l'abimer. Les plantes ont ensuite été étiquetées selon le traitement et mises en pot temporairement en gardant de la terre fraîche afin d'éviter une dégradation racinaire trop rapide.



Figure 8 – Première récolte des épinards le 18 mai 2022

La seconde récolte des épinards (*T2*) a eu lieu le 10 juin 2022. Lors de cette récolte, les épinards étaient bien plus développés tant au niveau foliaire que racinaire (Figure 9). La méthode de récolte était exactement la même que lors de la première récolte et nous avons récolté à nouveaux cinq plantes de chaque traitement. La troisième récolte (*T3*) a eu lieu le 27 juin 2022, toujours selon la même méthode. Cette fois-là, les épinards étaient en fleur et leur système racinaire était moins important qu'au *T2* (Figure 9).



Figure 9 – Deuxième récolte des épinards (à gauche), le 10 juin 2022 et troisième récolte (à droite), le 27 juin 2022

Une fois les plantes récoltées, elles ont été ramenées aux serres de Louvain-la-Neuve afin d'être nettoyées. Pour cela, une table de lavage a été utilisée (Annexe 2 : Table de lavage utilisée). Celle-ci est composée d'un tamis très fin permettant de retirer quasi l'intégralité des particules de terre grâce à un puissant jet d'eau. L'idée était de se débarrasser de toutes les particules de terre pouvant gêner les scans des systèmes racinaires.

Suite aux expériences sur les épinards, ce sont des courges (butternuts et potimarrons) qui ont été semées à Lauzelle. Une récolte d'échantillons de courges a eu lieu le 4 octobre 2022. Contrairement aux épinards, les courges n'ont été récoltées qu'une seule fois et non pas à plusieurs périodes différentes. Lors de cette récolte, il fut complexe de trouver suffisamment d'échantillons de chaque variété pour chaque traitement. Nous avons ainsi dû récolter moins d'échantillons que prévu initialement. Pour les butternuts, nous avons récolté respectivement trois échantillons des traitements *Bâche*, *Labour*, *Feuilles* et *Paille*. Pour les potimarrons, à cause de l'incapacité de récolter des échantillons *Paille*, nous avons respectivement récolté trois échantillons des traitements *Bâche*, *Labour* et *Feuilles*. Au total, quinze échantillons d'épinards par traitement ont été récoltés (séparés en trois périodes de récolte) et trois échantillons de courges par traitement ont été récoltés (à une seule période de récolte).

4.1.2. Témoins

En plus des plantes récoltées sur les parcelles de l'essai, il était convenu de comparer les systèmes racinaires de ces plantes avec des témoins. Pour cela, une parcelle de la ferme de Lauzelle cultivée depuis plusieurs années en maraichage classique m'a alors été réservée afin de pouvoir y récolter des épinards supplémentaires semés en même temps que sur l'essai. Malheureusement, en raison d'un taux de levée très faible, il n'a pas été possible de récolter des épinards présentant un système racinaire assez développé.

Lors du semis des courges, aucunes courges supplémentaires n'ont été semées sur la parcelle témoin. Afin de compenser le faible nombre d'échantillons récoltés à Lauzelle, il a été décidé de cultiver trois potimarrons et trois butternuts dans des pots en serre qui seraient utilisés comme témoins (Figure 10). Ces expériences furent peu concluantes pour les butternuts, il n'a alors été gardé que les témoins pour les potimarrons. Ceux-ci permettent de compenser l'absence de traitement *Paille* pour les potimarrons.



Figure 10 – Plantes témoins de butternuts et potimarrons

4.1.3. Scan des systèmes racinaires

Les racines nettoyées ont ensuite été scannées afin d’obtenir une image virtuelle du système racinaire. Les scans ont été effectués en serre grâce à un scanner Epson V850 Pro appartenant au laboratoire PEPA (Annexe 4 : Scanner utilisé dans le cadre des expériences). Pour scanner, les échantillons ont été coupés au niveau du collet afin de séparer le système caulinaire du système racinaire. L’intégralité du système caulinaire a alors été envoyé à l’étuve (cf. Section 4.1.4.). Le système racinaire a été placé dans un bac contenant de l’eau déminéralisée dans lequel l’intégralité des racines sont bien visibles afin d’apparaître clairement sur le scan. Les scans ont été effectués à une résolution de 600 Dots Per Inch (DPI). La Figure 11 illustre des racines de courges et d’épinards prêtes à être scannées.



Figure 11 – Racines de courges (à gauche) et d’épinard (à droite) prêtes à être scannées

4.1.4. Mesure de la masse sèche

Afin d’obtenir un des paramètres d’ArchiSimple (la densité des tissus racinaires, *TMD*), il est nécessaire de connaître la masse sèche des échantillons. Pour cela, après chaque récolte d’échantillons, la partie caulinaire des plantes a été déposée à l’étuve du laboratoire PEPA. Les échantillons y ont été placés dans des sacs en plastiques spécifiques à l’étuve. A chaque récolte d’échantillons, les feuilles et la tige ont été placés pendant 4-5 jours à l’étuve à une température de 60°C (Figure 12). Une fois passés à l’étuve, les sachets contenant les feuilles sont pesés et le poids du sachet est soustrait afin d’en obtenir la masse sèche. Dû à la taille conséquente

des échantillons de courges, ceux-ci n'ont pas été mis à l'étuve. Les données de masse sèche des courges n'ont alors été mesurées que pour les plantes témoins.



Figure 12 – Systèmes caulinaires d'épinards à l'étuve

4.1.5. Traitement des scans racinaires

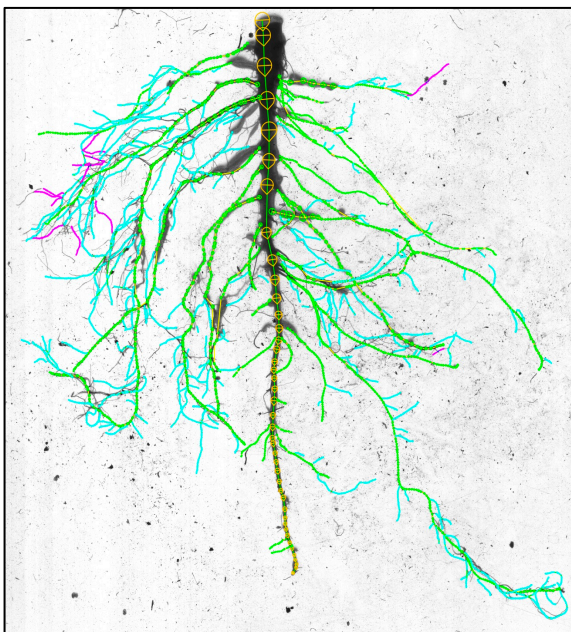


Figure 13 – Racine d'épinard traitée avec SmartRoot

Les scans des systèmes racinaires ont été traités à l'aide du logiciel SmartRoot. Il s'agit d'un plug-in d'ImageJ, un logiciel de traitement d'images pouvant afficher, éditer, analyser, traiter, sauvegarder et imprimer des images en couleurs et en niveaux de gris. Il peut lire de nombreux formats de fichiers image, notamment TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM et FITS (ImageJ, 2022). SmartRoot est un plug-in du logiciel développé par Guillaume Lobet, Xavier Draye et Loïc Pagès. Il s'agit d'un logiciel d'analyse d'image semi-automatique qui rationalise la quantification de la croissance et de l'architecture des racines pour les systèmes racinaires complexes. Le logiciel combine une représentation vectorielle des objets racinaires avec un puissant algorithme de traçage (Lobet et al., 2011).

SmartRoot a été utilisé pour traiter les systèmes racinaires scannés (scan sous format TIFF). L'intégralité des racines a été tracées à l'aide de la fonction *Trace Root*, afin d'enregistrer des informations d'architecture dans le logiciel. Pour chaque racine, il convenait d'y relier toutes leurs racines latérales à

l'aide de la fonction *Trace Lateral*, permettant à SmartRoot de créer des relations de parenté entre les racines. La Figure 13 illustre une racine d'épinard traitée avec SmartRoot.

Une fois l'intégralité des systèmes racinaires tracée, SmartRoot permet d'exporter les informations contenues sous forme d'un fichier Comma Separated Value (CSV). Ces fichiers contiennent, pour l'intégralité des racines, des informations de longueur, de surface, de volume, de diamètre, d'ontologie et leur parent associé. Ces fichiers CSV ont été traités par la suite sur le logiciel RStudio.

4.1.6. Analyse des systèmes racinaires

L'analyse des systèmes racinaires a été réalisée à l'aide du logiciel RStudio (libre) dans sa version 3.6.1. Beaucoup de fonctions de base de RStudio m'ont été utiles mais pour la manipulation et la représentation des données, le package *Tidyverse* a été utilisé. Il s'agit d'un ensemble de packages R conçus pour la science des données permettant de manipuler et représenter graphiquement des données. Parmi les packages présents dans le *Tidyverse*, on peut retrouver *ggplot2*, *dplyr* ou encore *tidyr* (Tidyverse, 2022).

La première étape de l'analyse consistait à importer l'ensemble des données des fichiers CSV de l'intégralité des plantes à l'aide de la fonction *read.csv*. Pour les épinards, les jeux de données ont été rassemblés, grâce à la fonction *rbind*, selon le traitement (*Bâche*, *Feuilles*, *Labour*, *Paille*) et le temps de récolte (*T1*, *T2*, *T3*). Pour les butternuts et les potimarrons, les jeux de données n'ont été rassemblés que selon le traitement car il n'y a eu qu'un seul temps de récolte. Une hypothèse a été émise quant au fait que les paramètres des plantes appartenant au même traitement et au même temps de récolte ont des valeurs similaires.

Sur l'ensemble des jeux de données, les diamètres maximums (*dmax*) et minimums (*dmin*) ont été obtenus par le premier décile et le neuvième décile. Un décile représente chacune des neuf valeurs qui divisent un jeu de données en dix parts égales, de sorte que chaque partie représente un dixième de l'échantillon de population (Insee, 2022). Les déciles ont été obtenus via la fonction R *quantile*. Pour chaque jeu de données, il a été possible d'obtenir une valeur de *dmin* et *dmax*. Le rapport entre le diamètre des racines « filles » et celui de leur « mère » a pu être obtenu via une fonction R construite par mes soins. Cette fonction consistait à créer une nouvelle colonne dans les jeux de données qui reliait les diamètres des racines au diamètre de leur parent associé. Grâce à cette nouvelle relation, le ratio du diamètre a été obtenu en divisant les diamètres des racines par le diamètre de leur parent. Ce rapport a été représenté graphiquement et un modèle linéaire a été établi. La pente de la droite de régression de ce modèle a alors pu être obtenue (*RDM*). Une valeur de *RDM* par espèce a été calculée. L'hypothèse que ce paramètre ne change pas en fonction du traitement a été émise.

Parmi les autres paramètres obtenus, la distance inter-ramification (*IPD*) est obtenue directement depuis l'export de SmartRoot. Dans cet export, une information (*child_density*) est donnée et correspond au nombre de racines latérales/cm. L'*IPD* est ainsi obtenu en prenant l'inverse de cette valeur. La densité des tissus racinaires (*TMD*) a été obtenue en divisant la masse sèche mesurée grâce à l'étuve par le volume des systèmes racinaires, une information fournie par SmartRoot. Le reste des paramètres ont été gardés à leur valeurs par défaut ou calculés très facilement. Ceux-ci seront présentés dans la section *Résultats et discussion*.

Une fois ces différents paramètres obtenus, toutes les informations ont été exportées sous forme de dataframe au format CSV. Ce jeu de données global est composé de 460 lignes et cinq colonnes : *Parameter*, *Specie*, *Treatment*, *Time* et *Value*.

4.2. Expériences en rhizotrons

4.2.1. Intérêts

L'intérêt des expériences en rhizotron est d'obtenir les paramètres dynamiques du modèle. La plupart des paramètres d'ArchiSimple sont statiques et ne varient pas dans le temps. Ils peuvent facilement être obtenus via des expériences simples. Cependant, le modèle contient quelques paramètres dynamiques, plus complexes à obtenir car ils demandent un suivi régulier. C'est ici tout l'intérêt du rhizotron qui permet de suivre de manière simplifiée et régulière le développement des racines contrairement aux plantes en champ, poussant dans le sol. Via les expériences en rhizotrons, les paramètres d'intérêt qui pourront être obtenus sont la vitesse d'émission

des racines séminales (*erSem*), la durée de développement des primordias (*PDT*) et surtout la pente de la relation entre la vitesse de croissance et le diamètre (*EL*), un des paramètres les plus importants d'ArchiSimple.

4.2.2. Méthode

Les expériences en rhizotrons ont débuté en avril 2022 dans les serres de Louvain-la-Neuve. Les premières expériences ont été réalisées sur des épinards bio de la variété Butterflay afin de travailler sur la même variété que ceux cultivés à la ferme de Lauzelle. Afin d'assurer une montée en graine et une croissance efficace des épinards, les rhizotrons se devaient d'être dans une serre fraîche car l'épinard est une plante ne tolérant pas bien les hautes températures (Morelock & Correll, 2008). Les rhizotrons ont ainsi été montés via la structure décrite à la section 1.2. Pour l'épinard, une quinzaine de rhizotrons ont été installés (Figure 14). Parmi les quinze graines, quasi l'intégralité de celles-ci ont germé trois jours après l'installation et aucune graine n'a germé plus de cinq jours après. L'expérience a duré un mois environ et s'est arrêtée lorsque les racines ont atteint le fond du rhizotron.



Figure 14 – Rhizotrons d'épinards au début de l'expérience

Durant l'entièreté de l'expérience, un suivi régulier des racines a eu lieu. Ce suivi consistait en deux opérations. Premièrement, fournir de l'eau et des nutriments via une solution de Hoagland, une solution hydroponique développée par Hoagland en 1933. Il s'agit d'une des solutions artificielles les plus populaires utilisées pour la croissance des plantes en expériences contrôlées. La solution contient de nombreux éléments chimiques nécessaires à la croissance des végétaux (N, P, S, Cl, B, Na, Mg, K, Ca, Mn, Zn, Cu, Mo, Fe) sous formes de micronutriments et macronutriments ainsi que de chélate. La solution se prépare en diluant sept solutions différentes dans de l'eau déminéralisée (Smith et al., 1983). Les sept solutions utilisées sont présentées dans l'Annexe 3 : Composition de la solution d'Hoagland (Smith et al., 1983). Deuxièmement, tracer de manière quotidienne l'évolution des racines durant toute leur croissance à l'aide de marqueurs indélébiles sur le papier transparent du rhizotron. Plusieurs couleurs ont été utilisées selon le type racinaire : la racine séminale a été tracée en noir, les latérales en bleu et les racines de troisième ordre en rouge. Un point a été tracé quotidiennement à côté des racines, permettant de suivre la croissance journalière de celles-ci.

La deuxième partie des expériences en serre a été réalisé sur des courges. Ces expériences ont débuté en août 2022. Dix nouveaux rhizotrons ont été installés contenant deux variétés différentes de courges, similairement à celles cultivées à Lauzelle. Cinq rhizotrons ont été montés contenant des potimarrons Uchiki-Kuri (*Cucurbita*

maxima Duchesne) et cinq autres rhizotrons contenant des Tiana Butternut (*Cucurbita moschata* 'Butternut'). L'intégralité des graines de courges avait germé en trois jours maximum et ont montré une croissance bien plus importante que les épinards. Concernant le suivi régulier, la méthodologie était exactement la même que pour les rhizotrons d'épinards. L'expérience a duré environ trois semaines. La Figure 15 illustre un rhizotron de courge en fin d'expérience prêt à être scanné.



Figure 15 – Rhizotrons de courge prêt à être scanné

4.2.3. Scans des rhizotrons

Les scans des rhizotrons ont été effectués de la même façon que pour les expériences à Lauzelle grâce au scanner. La méthode différait ici car il était nécessaire de scanner à la fois les feuilles transparentes sur lesquelles étaient tracées quotidiennement les racines (afin de pouvoir déterminer la vitesse de croissance par la suite) mais également les systèmes racinaires en eux-mêmes afin d'obtenir les valeurs des diamètres et des longueurs. Les scans ont été effectués à une résolution de 600 DPI. Une photo du scanner utilisé se retrouve en Annexe 4 : Scanner utilisé dans le cadre des expériences.

4.2.4. Traitement des scans de rhizotrons

SmartRoot a été utilisé pour traiter les images scannées de la même manière que les scans des échantillons de Lauzelle. Sur les feuilles transparentes, la fonction *Mark* a été utilisée afin d'indiquer le taux de croissance journalier qui permet à SmartRoot par la suite de calculer la vitesse de croissance racinaire (en cm/jour). La difficulté pour les scans des rhizotrons consistait à faire correspondre les racines tracées sur les rhizotrons avec les racines « réelles » du système racinaire. L'export des scans traités a permis d'obtenir de multiples informations sur le système racinaire. Les scans des transparents permettent d'obtenir la vitesse de croissance racinaire pour chaque racine.

4.2.5. Analyse des rhizotrons

L'analyse des systèmes racinaires a également été réalisée à l'aide du logiciel RStudio. Les différents jeux de données ont été importés via la fonction *read.csv*. Deux jeux de données par plante ont été importés, les données provenant du scan des transparents et les données provenant des scans des systèmes racinaires. Ils ont été regroupés en un jeu de données général comprenant l'ensemble des informations grâce à la fonction *merge*.

Un travail relativement similaire aux expériences de Lauzelle a été réalisé sur ces jeux de données. Les paramètres *dmin* et *dmax* ont été obtenus ainsi que le paramètre *RDM* en suivant exactement la même méthode que pour les échantillons à Lauzelle. Contrairement aux autres expériences, certains paramètres n'ont pu être obtenus exclusivement que par les expériences en rhizotrons. Le premier paramètre calculé est la pente

de la relation entre la vitesse de croissance et le diamètre (*EL*). Pour obtenir ce paramètre, un modèle linéaire a été réalisé en mettant en relation la croissance (en cm/jour) calculée grâce à la fonction *mark* de SmartRoot et le diamètre, obtenu directement via l'export de SmartRoot. Ce modèle linéaire a été représenté graphiquement via une régression (cf. Section *Résultats et discussion*). La pente de la droite de régression correspond au paramètre *EL*. L'hypothèse faite ici est que cette relation sera la même pour toutes les modalités de conversion des prairies et ce paramètre sera utilisé pour l'intégralité des plantes lors de la modélisation.

Le deuxième paramètre obtenu grâce aux rhizotrons est la durée de développement des primordias (*PDT*). Pour obtenir ce paramètre, il était nécessaire de connaître la distance entre la dernière racine latérale et l'apex de la racine séminale (*LAUZ*). Cette valeur est obtenue via SmartRoot en la mesurant directement depuis les scans des systèmes racinaires. Le *PDT* est alors obtenu en divisant la valeur de *LAUZ* par la moyenne du taux de croissance des différents rhizotrons.

Enfin, le dernier paramètre obtenu via les rhizotrons est le taux d'émission des racines séminales (*erSem*, en j^{-1}). Celui-ci s'est calculé facilement par observation visuelle des rhizotrons. La méthode d'obtention des différents paramètres était la même pour les trois espèces de plantes.

À nouveau, le reste des paramètres a été laissé à leur valeur par défaut (voir section *Résultats et discussion*). L'intégralité des paramètres a été calculé pour chaque plante cultivée en rhizotron (quinze plantes pour l'épinard et cinq plantes pour les courges) afin d'avoir le plus de données possibles. Tout le processus présenté a été répété pour les trois espèces. Une fois ces différents paramètres obtenus, toutes les informations ont été exportées sous forme de dataframe au format CSV. Ce jeu de données global est composé de 575 lignes et quatre colonnes : *Parameter*, *Specie*, *Plante* et *Value*.

4.3. Modélisation

4.3.1. Méthode

Le travail d'analyse des rhizotrons a permis d'obtenir les paramètres du modèle ArchiSimple nécessaires à la modélisation. ArchiSimple est un modèle fonctionnant depuis un code source RStudio. Son utilisation se fait depuis un script simple contenant une centaine de lignes. Dans un premier temps, une fonction (*read_archisimple_xml*) va lire un fichier de paramètres au format Extensible Markup Language (XML). Le format XML est un métalangage informatique permettant de faciliter des contenus complexes entre différents systèmes d'informations hétérogènes (MDN, 2022). Ce fichier contient les différents paramètres ArchiSimple à leur valeur « par défaut ». Le script va permettre d'encoder l'ensemble des paramètres mesurés par les expériences afin de réécrire ce fichier XML contenant les valeurs mesurées expérimentalement. On a ainsi la création d'une multitude de fichiers XML pour toutes les différentes conditions expérimentales (*Temps de récolte*, *Traitements*, *Espèce*). Le modèle simule la croissance racinaire à plusieurs pas de temps définis manuellement par le paramètre *simtime*. Cinq pas de temps seront utilisés pour les simulations (de 20 jours à 60 jours avec un pas de temps de 10 jours).

4.3.2. Simulations

L'intégralité des simulations génère des petits segments (de quelques millimètres) qui représentent le système racinaire. Entre chaque pas de temps définis par le paramètre *simtime*, des fonctions définissant les principaux processus physiologiques sont appliqués au système racinaire virtuel. Tous ces processus sont définis par les différents paramètres.

La modélisation est réalisée à partir des segments simulés à l'aide du plugin *ggplot*. Le fichier contenant l'intégralité des simulations est alors filtré par la fonction *filter* afin de ne sélectionner que certaines conditions expérimentales et réaliser une série de modélisations.

Tableau 2 - Méthode d'obtention des paramètres

Paramètre	Méthode d'obtention
<i>erSem</i>	Rhizotrons
<i>Dmin</i>	Lauzelle + Rhizotrons
<i>Dmax</i>	Lauzelle + Rhizotrons
<i>EL</i>	Rhizotrons
<i>PDT</i>	Rhizotrons
<i>IPD</i>	Lauzelle + Rhizotrons
<i>RDM</i>	Lauzelle + Rhizotrons
<i>TMD</i>	Lauzelle
<i>Longueur totale</i>	Modélisation
<i>Profondeur</i>	Modélisation

De nouvelles variables ont été créées à partir de l'intégralité des segments simulés. La longueur totale du système racinaire est obtenue en additionnant l'intégralité des segments. La profondeur du système racinaire est aussi obtenue à l'aide des segments verticaux simulés. Ces deux variables auront leur importance par la suite et seront utilisés pour comparer les traitements pour chaque espèce. Le tableau reprend les méthodes d'obtention des différents paramètres. Les paramètres absents de ce tableau ont été laissés à leur valeur par défaut.

5. Analyses statistiques

L'intégralité des traitements statistiques a été effectuée à l'aide du logiciel Microsoft Excel et du logiciel RStudio. Ces analyses se basent sur la théorie du cours de biométrie enseigné à la faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain par Bernadette Govaerts et Xavier Draye.

5.1. Moyenne, écarts-type et erreur standard

Pour toutes les analyses statistiques, les moyennes, les écarts-types et les erreurs standards se calculent de la manière suivante :

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Équation 2 – Moyenne, écart-type et erreur standard

Où

μ = la valeur moyenne des résultats

n = le nombre de mesures effectuées pour l'analyse

x_i = le résultat obtenu pour une mesure i

σ = l'écart-type lié à la moyenne

SE = l'erreur standard

5.2. Modèle linéaire

Pour l'obtention de certains paramètres, un modèle linéaire simple a été utilisé. Celui-ci met en relation une seule variable expliquée Y avec une variable explicative X . Les observations soumises à ce modèle simple suivent le modèle probabiliste suivant :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

$$\varepsilon_i \sim iN(0, \sigma^2) \quad i = 1, \dots, t \quad N = t^2$$

Équation 3 – Hypothèse nulle et alternative de l'ANOVA

Où :

y_i = la réponse quantitative étudiée

β_0 = intercept

β_1 = coefficient de régression

x_i = la variable explicative

ε_i = terme d'erreur

Ce modèle sera utilisé pour étudier la relation linéaire entre deux variables nécessaires à l'obtention de deux paramètres d'ArchiSimple (RDM et EL).

5.3. Analyse de la variance

5.3.1. Principe de l'analyse de la variance

L'analyse de la variance (ANOVA) a comme principe de décomposer la variance totale des données en deux parties : la variance entre traitements et la variance résiduelle (variance au sein d'un traitement). Les moyennes sont estimées différentes si la variance inter-traitement est suffisamment grande. Les hypothèses H_0 et H_1 de l'ANOVA sont les suivantes :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_1 : \text{au moins une des } \mu_k \text{ est } \neq \text{ des autres}$$

Équation 4 – Hypothèse nulle et alternative de l'ANOVA

Afin de vérifier ou réfuter cette hypothèse, un test de Fisher est effectué. Lorsque la p-valeur est inférieure au niveau de confiance α (fixé à la liberté de l'utilisateur, généralement 0,05 ou 0,01), l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée. Cela traduit alors qu'au moins une des moyennes est significativement différente.

5.3.2. Hypothèses de l'analyse de la variance

La réalisation d'une ANOVA demande de vérifier trois hypothèses au préalable :

- L'indépendance des données, assurée par un contrôle des conditions expérimentales
- La normalité des résidus, vérifiée par la réalisation d'un Quantiles-Quantiles (QQ) plot des résidus
- L'égalité des variances expérimentales (homoscédasticité), vérifiée par un graphique des résidus en fonction du traitement

L'ensemble des données obtenues dans le cadre de ce mémoire répondent à ces trois hypothèses.

5.3.3. ANOVA I (à un critère de classification)

Les observations soumises à une ANOVA I suivent le modèle probabiliste suivant :

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \text{ avec } \sum \alpha_i = 0 \text{ et } i = 1, \dots, m \text{ et } j = 1, \dots, n_i$$

Équation 5 – Modèle probabiliste de l'ANOVA I

Où

Y_{ij} = la réponse quantitative étudiée

μ_i = le résultat moyen attendu pour le $i^{\text{ème}}$ traitement

ε_{ij} = l'écart résiduel entre l'observation j et la moyenne i et où $\varepsilon_{ij} \sim iN(0, \sigma^2)$

μ = le résultat moyen attendu tous traitements confondus

α_i = l'effet du $i^{\text{ème}}$ traitement

Si, lors de ce test, l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée, cela prouve qu'au moins un des traitements est différent des autres. Cependant, ce test ne donne aucune information sur la comparaison inter-traitement. Il faut pour cela utiliser un test de Tukey.

5.3.4. Test de Tukey

Le test de Tukey est un test permettant de déterminer quel(s) traitements sont significativement différents entre eux en comparant leurs moyennes et les différences entre celles-ci. Afin de comparer les moyennes, la statistique de test est la suivante :

$$q_s = \frac{Y_A - Y_B}{SE}$$

Où

q_s = la statistique de test

Y_A = la plus grande des deux moyennes comparées

Y_B = la plus petite des deux moyennes comparées

SE = l'erreur standard

Dans le test de Tukey, l'hypothèse nulle (H_0) dit que toutes les moyennes sont égales. Un test de Fisher est utilisé pour prouver (ou réfuter) cette hypothèse. Si la p-valeur obtenue à ce test est inférieure au niveau de confiance α , l'hypothèse nulle est rejetée et elle est acceptée dans le cas où cette p-valeur est supérieure au niveau de confiance α . Dans le cas d'un rejet de H_0 , les moyennes sont considérées significativement différentes (au niveau α choisi). Les hypothèses nulles et alternatives pour trois moyennes μ_1, μ_2 et μ_3 sont présentées à l'Équation 6 :

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_1 = \mu_2 ; H_0 : \mu_1 = \mu_3 ; H_0 : \mu_2 = \mu_3 \\ H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 ; H_1 : \mu_1 \neq \mu_3 ; H_1 : \mu_2 \neq \mu_3 \end{aligned}$$

Équation 6 – Hypothèse nulle et alternative du test de Tukey

5.4. Boxplots

La plupart des comparaisons effectuées par la suite seront représentées sous forme de boxplots (aussi appelé boîte à moustache) à l'aide du logiciel RStudio. Un boxplot (Figure 16) est une représentation graphique qui illustre la distribution de données à partir de cinq statistiques : le minimum, le maximum, la médiane et le premier (Q1) et troisième (Q3) quartile. Un boxplot est représenté par une boîte comprenant l'intégralité des données entre Q1 et Q3. Une ligne est tracée à l'intérieur de la boîte, représentant la médiane. Les « moustaches » s'étendent hors de la boîte et caractérisent les valeurs maximums et minimums des données. Des données plus « distantes », appelées données aberrantes (outliers en anglais), contrastant complètement avec le reste des données, peuvent être représentées sous forme de points extérieurs au boxplot (Galarnyk, 2023). Les « encoches » (« Notch ») pouvant être observées sur les boxplots représentent un intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne.

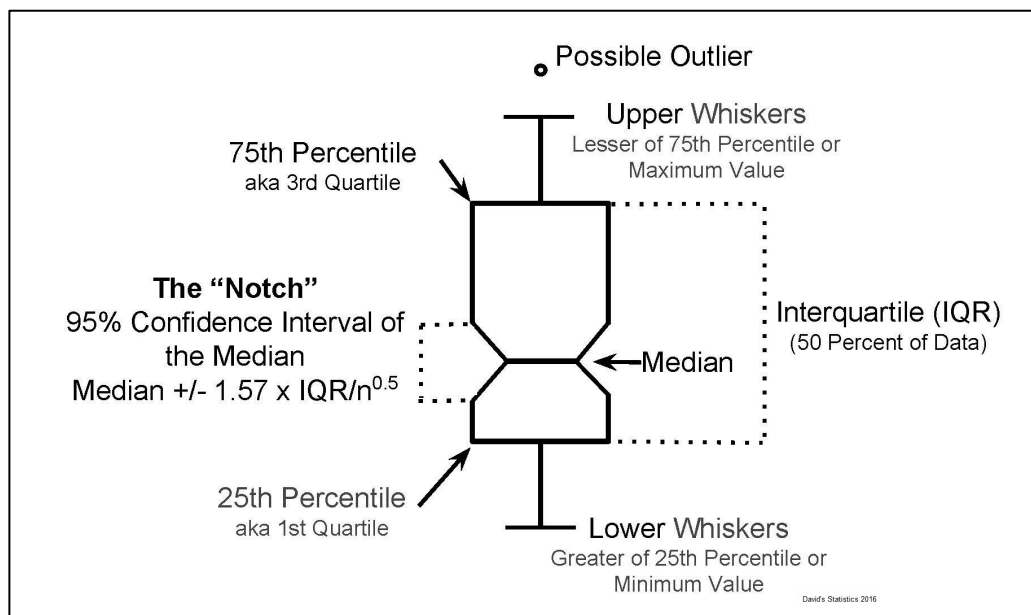


Figure 16 – Composition des différentes parties d'un boxplot (David's Statistics, 2016)

Les boxplots sont intéressants pour comparer les distributions des données entre plusieurs groupes. Pour les résultats qui suivront, tous les boxplots seront accompagnés de tests de Tukey permettant d'observer visuellement les comparaisons entre les groupes et également connaître les différences significatives existantes (ou non) entre ceux-ci.

6. Présentation de l'étude pédologique de l'essai

Avant de présenter les résultats obtenus, il est intéressant de s'attarder premièrement sur les résultats pédologiques des différentes modalités obtenus par Wilkin et Legast (2022) dans le cadre de leur mémoire. Ces informations permettront d'obtenir des pistes de réflexion futures sur mes résultats d'expérience obtenus. Seuls les résultats obtenus sur les traitements d'intérêts seront présentés.

6.1. Expériences sur la chimie du sol

Une première mesure intéressante réalisée par Wilkin et Legast (2022) a été effectuée sur l'APL. Leurs résultats ont globalement montré que les traitements *Bâches* présentaient des valeurs d'APL extrêmes, proches des seuils de non-conformité. Les traitements *Labours* ont présenté des teneurs correctes et non problématiques. Pour les occultations organiques, les mesures sur les traitements *Feuilles* et *Pailles* sont très proches. Wilkin et Legast recommandent une conversion par occultation avec ces deux traitements.

Une autre analyse chimique réalisée par Wilkin et Legast (2022) concerne la mesure du carbone organique du sol (COS). Celle-ci est importante car elle influence la fertilité du sol (Bertin, 2021). Il avait été expliqué précédemment que la conversion de prairie pouvait entraîner une perte de ce carbone organique (Poeplau et al., 2011). Une conversion par occultation organique pourrait ainsi remédier à ce problème de perte. Wilkin et Legast n'ont cependant observé aucun effet traitement sur ce COS malgré la présence d'occultations. D'après Pierre Bertin, il est également important de noter que la perte de carbone organique après conversion n'est pas observable sur un temps si court.

6.2. Expériences sur la physique du sol

Différentes analyses physiques du sol ont été réalisées sur l'essai par Wilkin et Legast (2022). Une première analyse concerne la résistance à la pénétration représentant la facilité avec laquelle le système racinaire va croître en profondeur. Celle-ci dépend principalement de la force de liaison entre les particules du sol. D'après leurs mesures, aucun effet traitement n'est observable.

Une seconde analyse concerne la stabilité des agrégats, signe d'une bonne qualité de sol. Wilkin et Legast ont observé des agrégats moins stables pour les *Labours* que pour les autres traitements. Cela s'explique par l'impact du travail du sol sur sa stabilité (Biielders et al., 2021).

Enfin, une dernière analyse sur l'infiltration de l'eau a été réalisée. Si cette eau s'infiltré bien, le stockage de celle-ci dans le sol est meilleur et l'érosion est réduite (Biielders, 2018). Wilkin et Legast n'ont cependant observé aucunes différences d'infiltration entre les traitements.

6.3. Expériences sur la biodiversité du sol

La mesure de la biodiversité du sol effectuée par Wilkin et Legast (2022) consistait principalement en une mesure du taux de décomposition de la matière organique par les micro-organismes du sol. Leurs résultats ont montré que, sans surprise, les traitements *Paille* et *Feuilles* présentent un taux de décomposition de la MO beaucoup plus rapide. Ce sont les *Labours* qui décomposent le moins la MO. Cela rejoint ce qui avait été dit sur les impacts négatifs du labour dans la section *État de l'art*. Enfin, Wilkin et Legast ont observé que les *Bâches* décomposaient également très bien la MO probablement en raison d'une température élevée sous la bâche. En effet, la décomposition de la MO est accélérée par des températures élevées (Conant et al., 2011).

Résultats et discussion

Cette partie décrit l'intégralité des résultats obtenus à travers les expériences réalisées à Lauzelle et dans les serres de Louvain-la-Neuve. Ces résultats seront discutés dans un premier temps lors de leur présentation. Une discussion générale sera réalisée dans un second temps dans la section suivante. Les résultats seront présentés de la façon suivante :

- ❖ Comparaison interspécifique
- ❖ Étude détaillée par espèce
 - Paramètres individuels
 - Modélisation
 - Outputs de la simulation

1. Comparaison interspécifique

Dans un premier temps, une comparaison interspécifique sera effectuée. Celle-ci comparera les paramètres du modèle ArchiSimple entre les trois espèces étudiées. Lors de cette première comparaison, les paramètres utilisés proviendront des expériences réalisées en rhizotrons. Ces paramètres seront utilisés afin de comparer des conditions de culture similaire entre les trois espèces et parer tous les effets non contrôlés des expériences réalisées à la ferme de Lauzelle. Une comparaison de quelques paramètres d'intérêts sera réalisée dans un premier temps. Dans un second temps, les espèces seront comparées par le biais de la modélisation avec ArchiSimple afin d'observer si le modèle rend bien compte de la réalité observée lors des expériences.

1.1. Comparaison de paramètres

1.1.1. Diamètres minimums et maximums

Comme décrit dans la section *Matériels et Méthodes*, les diamètres minimums et maximums ont été obtenus à partir des premiers et neuvièmes déciles de l'intégralité des résultats mesurés. Dans un premier temps, une distribution statistique des diamètres minimums et maximum a été réalisée pour l'intégralité des rhizotrons (Figure 17). Cette figure illustre une distribution beaucoup plus étalée pour les diamètres minimums que pour les diamètres maximums. Ces différences de diamètres n'ont pas pu être observées visuellement de manière précise en raison de l'absence de croissance secondaire dans les rhizotrons empêchant de distinguer de manière précise les différences de diamètre.

Parmi les résultats obtenus, les valeurs des diamètres minimums varient entre 0,282 mm et 0,399 mm. Les valeurs des diamètres maximums, quant à eux, varient entre 0,433 mm et 0,747 mm. D'une manière générale, pour les diamètres maximums, ce sont les courges qui ont présenté les plus gros diamètres et pour les diamètres minimums, ce sont plutôt les épinards qui possèdent les valeurs les élevées.

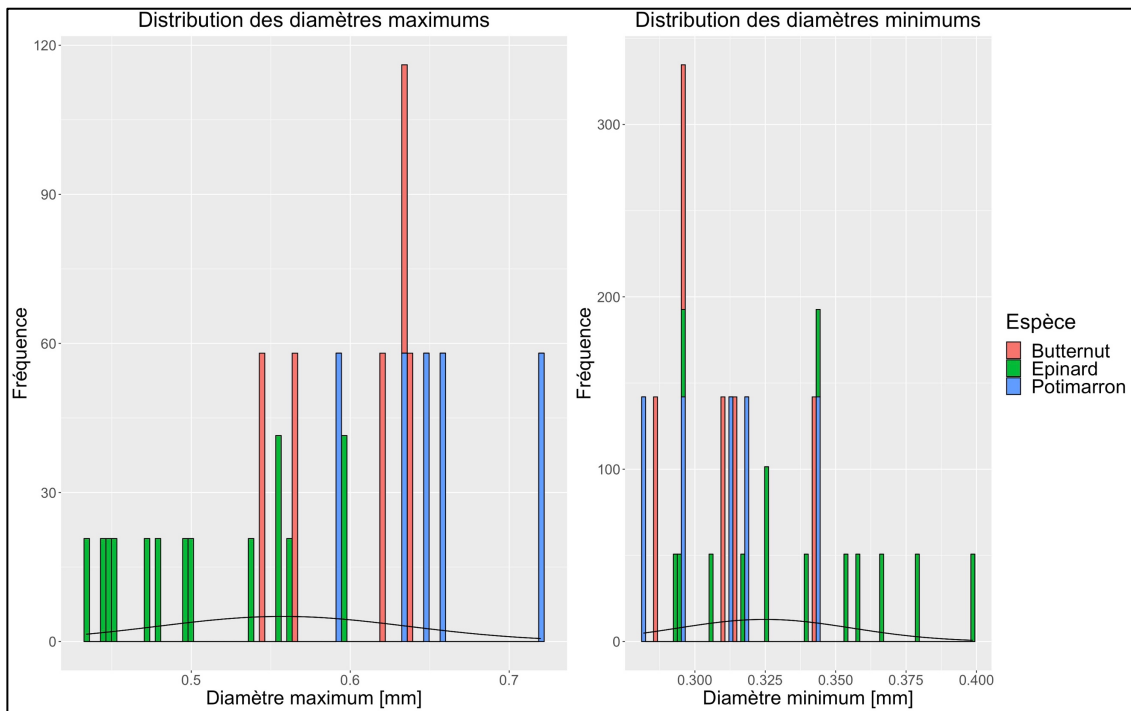


Figure 17 - Distribution statistique des diamètres maximums et minimums

Les trois espèces de plantes ont été mises en relation quant à leurs valeurs mesurées de d_{min} et d_{max} . Pour cela, un test de Tukey a été réalisé permettant de faire une comparaison interspécifique. Les données ont été représentées sous forme d'un boxplot (Figure 18). Pour les diamètres maximums, une différence significative entre les potimarrons et les épinards est observable (au niveau $\alpha = 0,01$). Cependant, pour les diamètres minimums, aucune différence significative ne sont observables au même niveau de confiance. L'absence de significativité entre les deux espèces de courges pour ces deux paramètres s'explique probablement par le fait qu'elles appartiennent à la même famille du règne végétal et présentent une structure racinaire très comparable. Ces observations ont pu être faites également lors des expériences.

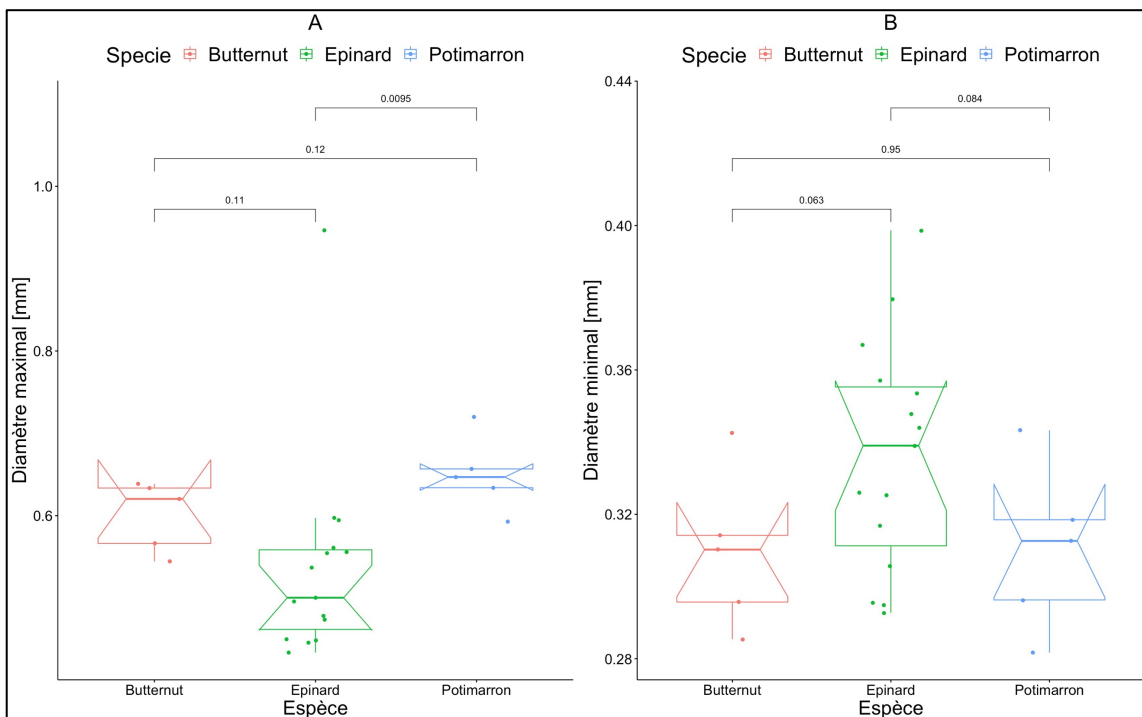


Figure 18 – Boxplot et comparaison interspécifique du diamètre maximal (A) et du diamètre minimal (B)

1.1.2. Distance inter-ramification

La distance inter-ramification (*IPD*) est une information qui a pu être obtenue directement depuis l'export des données de SmartRoot à l'aide des informations données par la variable *child_density*. Ce paramètre a ici été comparé de manière interspécifique (Figure 19) à partir des valeurs obtenues dans les expériences en rhizotrons. Cette comparaison interspécifique a montré une différence significative entre les épinards et les deux espèces de courges (au niveau $\alpha = 0,01$). Entre les deux espèces de courges, il n'y a pas de différence significative pour l'*IPD*. Les deux espèces appartenant à la même famille, elles présentent une architecture racinaire similaire, ce qui explique probablement ce résultat, à l'instar des *dmin* et *dmax* présentés plus haut.

Parmi l'intégralité des résultats obtenus, l'*IPD* présente des valeurs assez similaires par espèce. Elle oscille entre 4,89 mm et 66,76 mm pour les échantillons d'épinards. Pour les échantillons de butternuts, elle oscille entre 4,19 mm et 10,19 mm. Pour les échantillons de potimarrons, elle oscille entre 3,77 mm et 8,9 mm. On observe ainsi une grande variabilité de l'*IPD* pour l'épinard atteignant des valeurs très élevées. Ces résultats sont cohérents avec les observations faites en rhizotrons, les épinards ont présenté une croissance très variable tant au niveau de la croissance en profondeur que de la ramification. Les courges ont quant à elles montré une très grande densité de ramification.

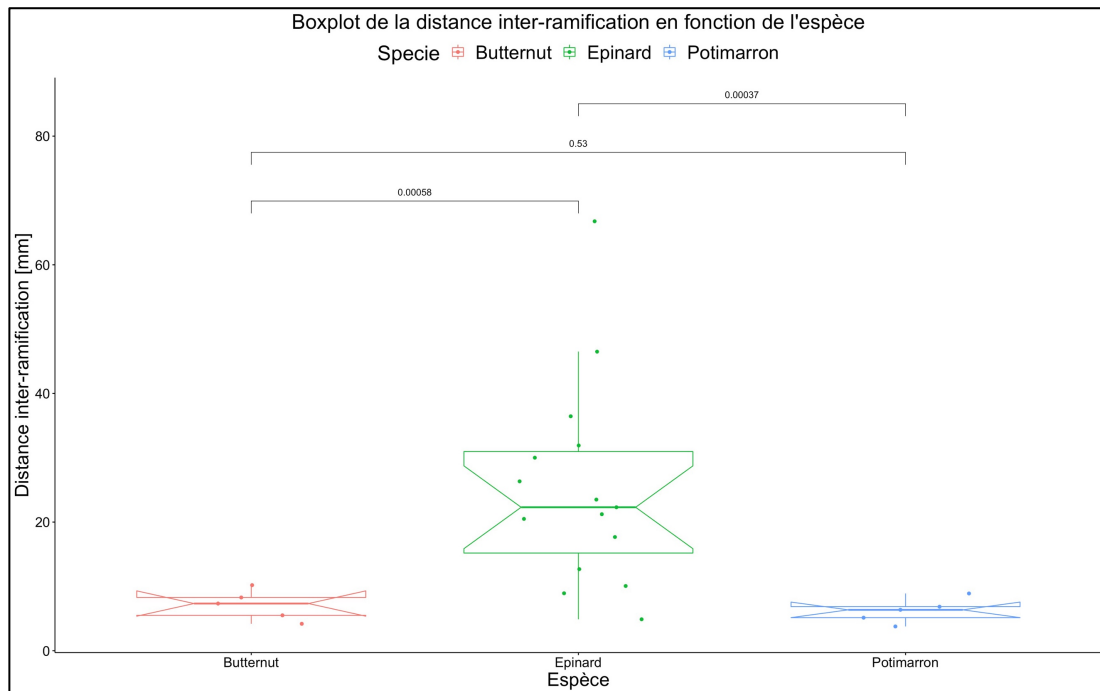


Figure 19 – Boxplot et comparaison interspécifique de la distance inter-ramification

1.1.3. Masse sèche

Enfin, une dernière comparaison à effectuer se rapporte à la mesure de la masse sèche à partir des systèmes caulinaires passés à l'étuve. Contrairement aux résultats présentés plus haut, la comparaison ne s'effectue pas à partir des données obtenues en rhizotrons mais à partir des données de Lauzelle. Les masses sont présentées sur la Figure 20. Pour rappel, les masses sèches des courges n'ont été mesurées que pour les témoins en raison de l'incapacité de les passer à l'étuve.

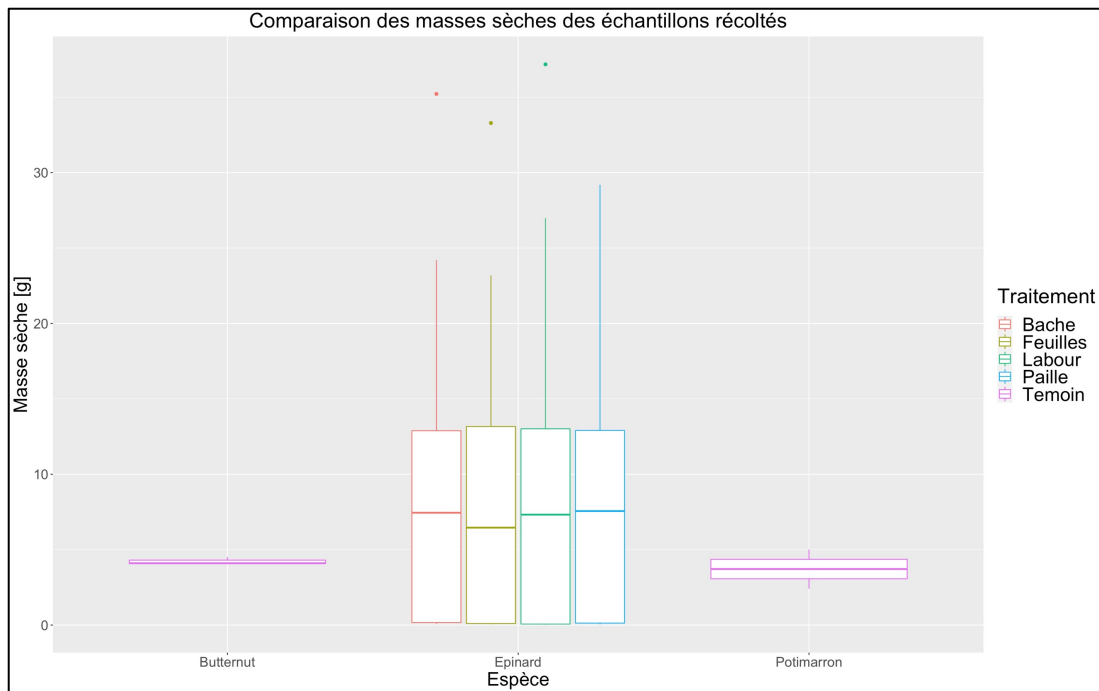


Figure 20 - Comparaison des masses sèches des échantillons récoltés

Les masses sèches des épinards présentent des variabilités plus élevées que les deux autres espèces dû à un nombre plus élevé d'échantillons mesurés. Pour les courges, les témoins des deux espèces avaient une masse sèche relativement similaire.

1.1.4. Paramètres uniques aux rhizotrons

Les expériences en rhizotrons ont permis d'obtenir trois paramètres uniques à celles-ci. Le premier paramètre, *EL*, est probablement un des paramètres les plus importants du modèle. Il caractérise la relation entre la vitesse de croissance et le diamètre caractérisant ainsi l'élongation potentielle des racines. Le paramètre *EL* correspond à la pente de cette relation. L'hypothèse avait été faite que ce paramètre ne changeait pas entre les traitements et une seule valeur a été calculée par espèce. Sur la Figure 21, les valeurs du diamètre apical (en mm) et de la vitesse de croissance (en mm/jour) ont été mises en relation pour les trois espèces étudiées. La méthode utilisée ici diffère de celle employée par Loïc Pagès. En effet, sachant que le nombre total de racines différait fortement en fonction de l'espèce, il a été décidé de calculer l'*EL* sur base des relations entre croissance et diamètre pour chaque ordre racinaire (racines primaires, secondaires et tertiaires). Ce choix permet d'approximer plus correctement le paramètre *EL* afin d'équilibrer les jeux de données pour chaque espèce.

La droite bleue représente la droite de régression du modèle linéaire associé à cette relation et la droite noire représente une droite de comparaison passant par le point 0. Le potimarron se distingue des deux autres espèces pour ce paramètre. La valeur du paramètre *EL* s'élève à 39,2 mm.mm/jour pour l'épinard, 47,2 mm.mm/jour pour le butternut et 60,5 mm.mm/jour pour le potimarron. Une autre méthode d'approximations du paramètre *EL* a également été réalisée mais elle n'approximait pas le paramètre de manière satisfaisante. Elle sera expliquée dans la section *Discussion générale*.

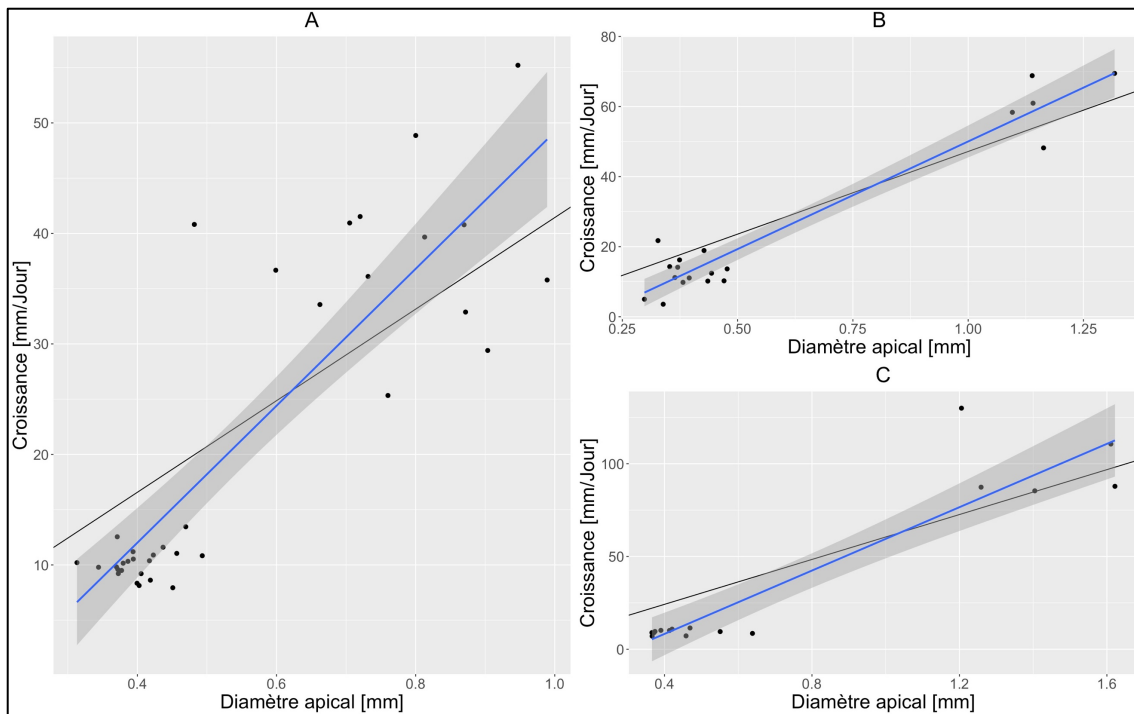
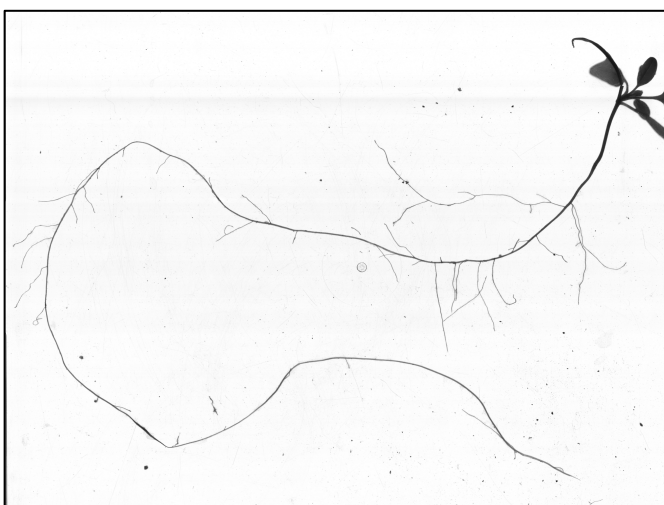


Figure 21 - Relation entre le diamètre apical et le taux de croissance de l'épinard (A), le butternut (B) et le potimarron (C)

Le second paramètre obtenu via les expériences en rhizotrons est le paramètre *PDT*, la durée de développement des primordias. Cette valeur a été obtenue grâce à SmartRoot comme expliqué dans la section *Matériels et Méthodes*. Pour l'épinard, la valeur du paramètre *PDT* est de 6,015 jours. Pour le butternut, sa valeur est de 0,936 jour et pour le potimarron, sa valeur est de 0,6571 jour.

Enfin, les rhizotrons ont permis d'obtenir le paramètre *erSem*, la vitesse d'émission des racines séminales. Le paramètre a été obtenu à partir d'une moyenne des *erSem* de l'intégralité des rhizotrons de chaque espèce. Pour l'épinard, la valeur du paramètre *erSem* est de 0,1275 jour⁻¹. Pour le butternut, il a une valeur de 0,1071 jour⁻¹. Pour le potimarron, il a une valeur de 0,1071 jour⁻¹ également. Ainsi, pour ces trois paramètres, la même hypothèse que la valeur de ces paramètres ne changeait pas entre les traitements a été émise.

1.2. Comparaison des rhizotrons scannés



Avant d'illustrer les modélisations comparatives des espèces, il faut comprendre les différences observables entre la réalité et les modélisations réalisées avec ArchiSimple. Pour cela, il est nécessaire d'illustrer les résultats des expériences effectuées en rhizotrons. La Figure 22 montre trois systèmes racinaires en fin d'expérience en rhizotrons (*Rhizotron 15* pour l'épinard, *Rhizotron 4* pour le butternut et *Rhizotron 3* pour le potimarron).



Figure 22 – Scans des rhizotrons en fin d'expérience des trois espèces : épinard (en haut), butternut (à gauche) et potimarron (à droite)

De nombreuses différences peuvent être observées entre les espèces à partir de ces scans. En termes de croissance, la différence est indéniable. Les épinards ont présenté des systèmes racinaires très peu développés par comparaison aux courges. Une grande différence de ramification est observable, ainsi que de profondeur. Entre les courges, une croissance similaire peut être notée sur l'ensemble des rhizotrons cultivés. Il est important également de noter que la plus grosse différence entre les espèces cultivées en rhizotrons et les échantillons récoltés à Lauzelle vient de l'absence de croissance secondaire dans les rhizotrons due à la minceur de ceux-ci. Cette absence de croissance secondaire explique probablement les différences de diamètres observées dans la section précédente.

1.3. Comparaison de modélisation interspécifique

Une première modélisation de comparaison interspécifique a été réalisée à l'aide d'ArchiSimple. Les paramètres utilisés pour celle-ci provenaient des expériences en rhizotrons. La modélisation interspécifique n'a été réalisée qu'à partir de ces expériences-là car, afin de comparer correctement les espèces, il est préférable que les conditions de culture soient similaires. La modélisation à l'aide des paramètres obtenus grâce aux expériences de Lauzelle a été réalisée par espèce et sert à comparer les différents traitements de conversion de prairies.

La Figure 23 illustre cette modélisation après 35 jours (durée moyenne des expériences en rhizotrons). Il est intéressant d'observer les résultats de la modélisation et de les comparer avec les scans des systèmes racinaires présentés à la Figure 22. On peut y observer qu'ArchiSimple arrive relativement bien à représenter les caractéristiques de croissance (profondeur, ramification, densité, etc.) des trois espèces étudiées.

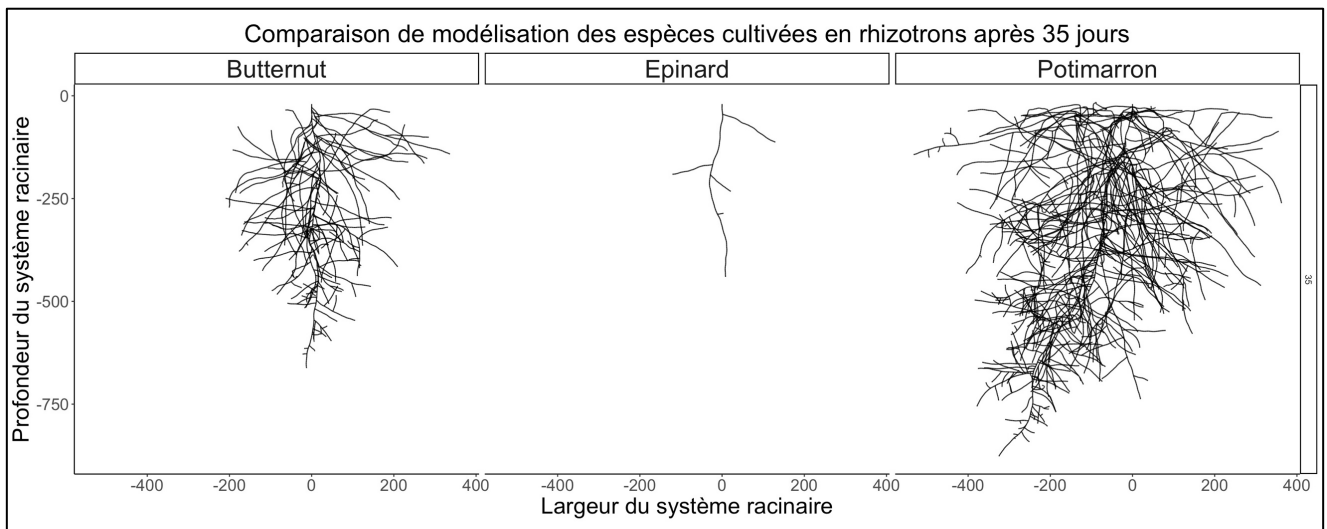


Figure 23 - Comparaison de modélisation des espèces cultivées en rhizotrons après 35 jours

Parmi les différences observables visuellement, on constate de prime abord un aspect principal qui différencie les courbes de l'épinard, la densité de ramification. Comme évoqué précédemment, cette différence est due principalement à un paramètre, l'*IPD*. Les différences interspécifiques de ce paramètre ont été montrées dans la section précédente. Lorsque ArchiSimple modélise les systèmes racinaires, il interprète les différentes valeurs encodées pour un même paramètre afin d'en faire une synthèse la plus précise possible. En raison de la grande variabilité du paramètre *IPD* chez l'épinard, une valeur assez élevée a probablement été encodée par ArchiSimple ce qui justifie cette faible densité. Ce résultat est en accord avec les expériences en rhizotrons sachant que les épinards cultivés ont présenté une très faible densité de ramification telle qu'illustrée à la Figure 22 bien que celui-ci reste cependant globalement sous-évalué par ArchiSimple. Pour les deux espèces de courges, une grande densité est observable sur la modélisation et avait pu être observée également sur l'intégralité des échantillons cultivés en rhizotrons. On observe également que les trois espèces présentent des différences concernant la profondeur de croissance dues à des valeurs différentes du paramètre *EL* qui explique (majoritairement, bien qu'il ne soit pas le seul) la profondeur atteinte par le système racinaire. Globalement, quelques épinards ont à peine atteint la moitié du rhizotron. On considèrera la synthèse des quinze rhizotrons illustrée ici comme acceptable. D'une manière générale, ArchiSimple semble représenter de manière plutôt réaliste les systèmes racinaires, du moins ceux des expériences en rhizotrons.

Afin d'appuyer ces comparaisons, un exercice de validation a été réalisé. Cet exercice consistait à étudier deux caractéristiques architecturales du système racinaire, la longueur totale ainsi que la profondeur. Ces deux critères ont été comparés entre les expériences en rhizotrons et la modélisation. Afin d'obtenir la longueur totale des systèmes racinaires modélisés, l'intégralité des segments simulés a été additionnée, similairement à ce qui avait été fait pour le traitement des expériences à Lauzelle. La profondeur du système racinaire a aussi été obtenue à l'aide des segments verticaux simulés. Pour obtenir ces informations provenant des systèmes racinaires de rhizotrons, les scans et l'export fournis par SmartRoot ont été utilisés. La longueur totale a été obtenue en additionnant la longueur de l'intégralité de chaque racine mesurée grâce à SmartRoot. La profondeur s'est approximée en utilisant la valeur de la racine présentant la longueur la plus élevée. Cette approximation a pu se faire car toutes les racines ont poussé vers le bas dans le rhizotron.

Tableau 3 - Comparaison de la longueur totale et de la profondeur pour les systèmes racinaires modélisés et obtenus en rhizotrons

Espèce	Longueur totale (Modélisé)	Longueur totale (Rhizotron)	Profondeur (Modélisé)	Profondeur (Rhizotrons)
Butternut	1435 cm	508,38 cm	54,3 cm	52,63 cm
Épinard	60,5 cm	155 cm	32,2 cm	47,322 cm
Potimarron	4819 cm	940 cm	55,4 cm	53,47 cm

Les différentes valeurs obtenues pour les deux modalités sont présentées dans le Tableau 3. Pour les résultats modélisés, les valeurs ont été prises à un temps similaire afin de les comparer avec la durée des expériences en rhizotrons. Pour les rhizotrons, la longueur totale et la profondeur ont été obtenues selon la moyenne des différents rhizotrons de chaque espèce. On peut observer que la profondeur présente des valeurs similaires entre les deux conditions d'étude pour les courges et la simulation est légèrement plus faible pour l'épinard comme illustré précédemment. C'est pour la longueur totale que de grandes variations sont observables.

2. Comparaison inter-traitement

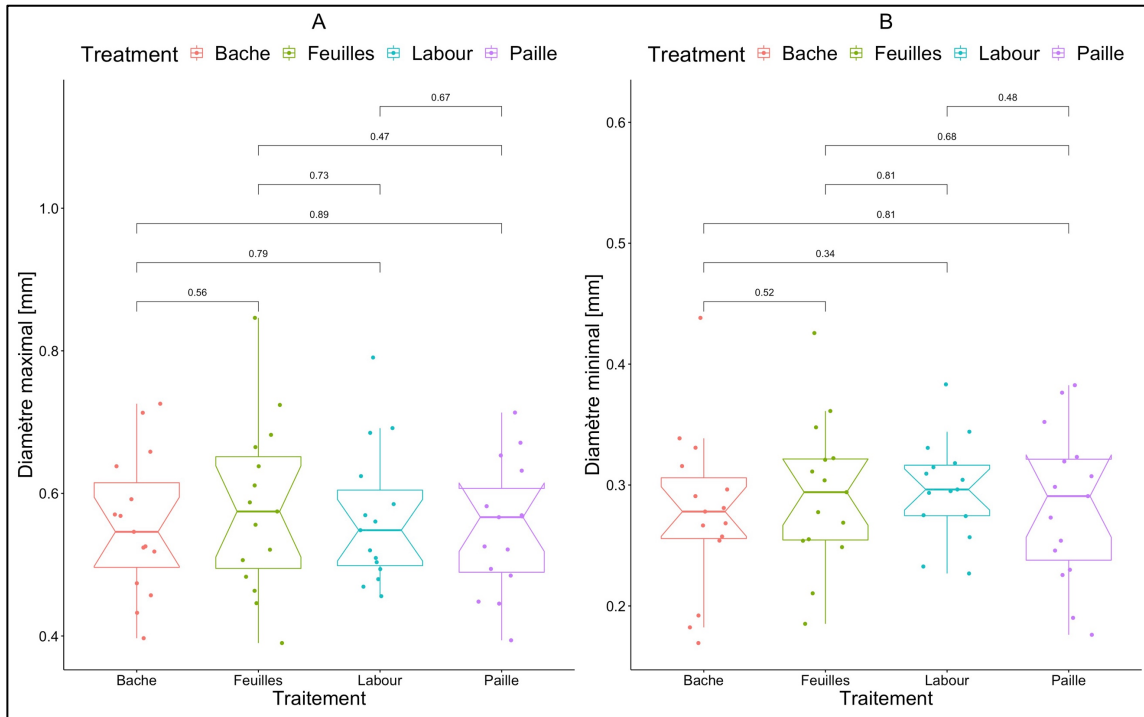
Chaque espèce a, par la suite, été étudiée individuellement. L'ensemble des paramètres obtenus sera présenté pour chaque espèce et des comparaisons inter-traitement seront effectuées. Les paramètres utilisés et les mesures effectuées proviennent ici des expériences réalisées à la ferme de Lauzelle. ArchiSimple sera utilisé afin de s'intéresser aux différences visuelles entre les traitements.

2.1. Épinard

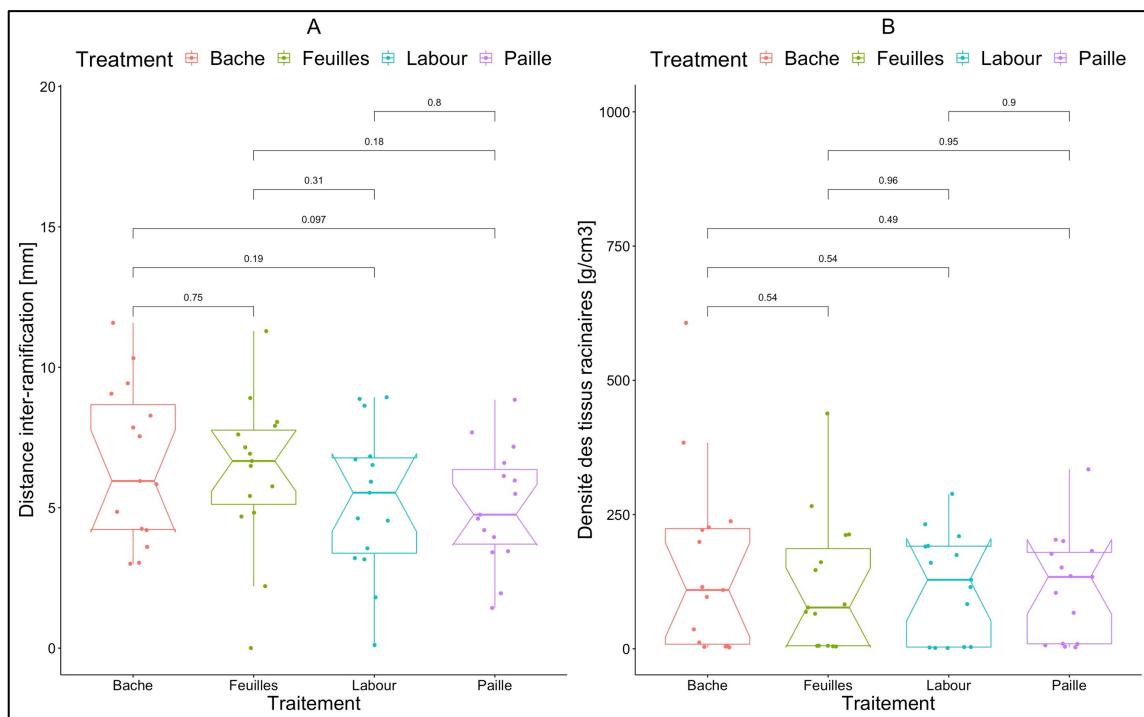
2.1.1. Paramètres individuels

La plupart des paramètres du modèle ont été gardés à leur valeur par défaut à l'exception des paramètres discutés plus haut. Pour ces paramètres variables, une étude comparative inter-traitements a été effectuée afin de déterminer si un effet traitement était observable sur la croissance du système racinaire.

Une première comparaison inter-traitement a été effectuée pour les paramètres de diamètres minimums et maximums (Figure 24). On observe, pour les deux paramètres, qu'il n'y a aucune différence significative entre les traitements (au niveau $\alpha = 0,01$). Cette absence de significativité sera discutée dans la partie *Discussion générale*.



Le paramètre *IPD* obtenu à partir de SmartRoot a également été comparé entre les traitements des épinards (Figure 25). On y observe à nouveau un effet non-significatif du traitement (au niveau $\alpha = 0,01$) et une distribution de valeurs du paramètre similaire pour chacun de ceux-ci. L'*IPD* est un paramètre important qui détermine la densité de ramification. Une absence de l'effet traitement montre que celui-ci n'influe pas sur cette densité. Le paramètre *TMD* a également été comparé entre les traitements (Figure 25). Aucun effet significatif du traitement n'est à noter à nouveau. Tout comme l'*IPD*, des distributions de valeurs similaires du paramètre *TMD* ont été obtenues pour les différents traitements.



À partir des valeurs des diamètres, il a été possible d'obtenir la relation entre les diamètres des racines mères et celui de leurs racines filles. La pente de cette relation correspond au paramètre *RDM*. Le ratio de diamètres a été représenté graphiquement à l'aide d'un nuage de point pour l'épinard (Figure 26). Sur le graphique, une droite oblique a été tracée, le divisant en deux et permettant d'ainsi bien observer la proportion entre les deux types racinaires. En toute logique, la grande majorité des racines latérales présentent un diamètre plus fin que leurs racines mères. La ligne bleue représente la droite de régression, obtenue grâce à la fonction *lm* de RStudio. Le paramètre *RDM* obtenu pour l'épinard a une valeur de 0,074. Ce paramètre a été obtenu grâce à la fonction *coef*, permettant d'obtenir l'intercept et la pente de la droite de régression.

L'intégralité des paramètres présentés ci-dessus sont des paramètres variables du modèle pouvant être calculés par des expériences simples. Ces paramètres (à l'exception des trois paramètres mesurés grâce aux rhizotrons) ont une valeur différente par traitement et par temps de récolte. Parmi les quinze autres paramètres restants, certains ont pu être obtenus très facilement de manière visuelle (*dSem*, *maxSem*, *ageAdv*, *distAdv*, *erAdv*, *dAdv*, *maxAdv*). Les paramètres restants ont été gardés à leur valeur par défaut. Cela est dû au fait que les expériences pour obtenir des valeurs spécifiques n'ont pas été possibles dans le cadre de ce mémoire. Les valeurs par défaut représentent cependant une très bonne approximation des valeurs pouvant être obtenues par des expériences pour la plupart des plantes dicotylédones (Pagès et al., 2014). Le Tableau 4 présente les quinze paramètres fixes du modèle pour l'expérience sur les épinards. L'intégralité de ceux-ci a été utilisé pour modéliser les systèmes racinaires à l'aide de ArchiSimple.

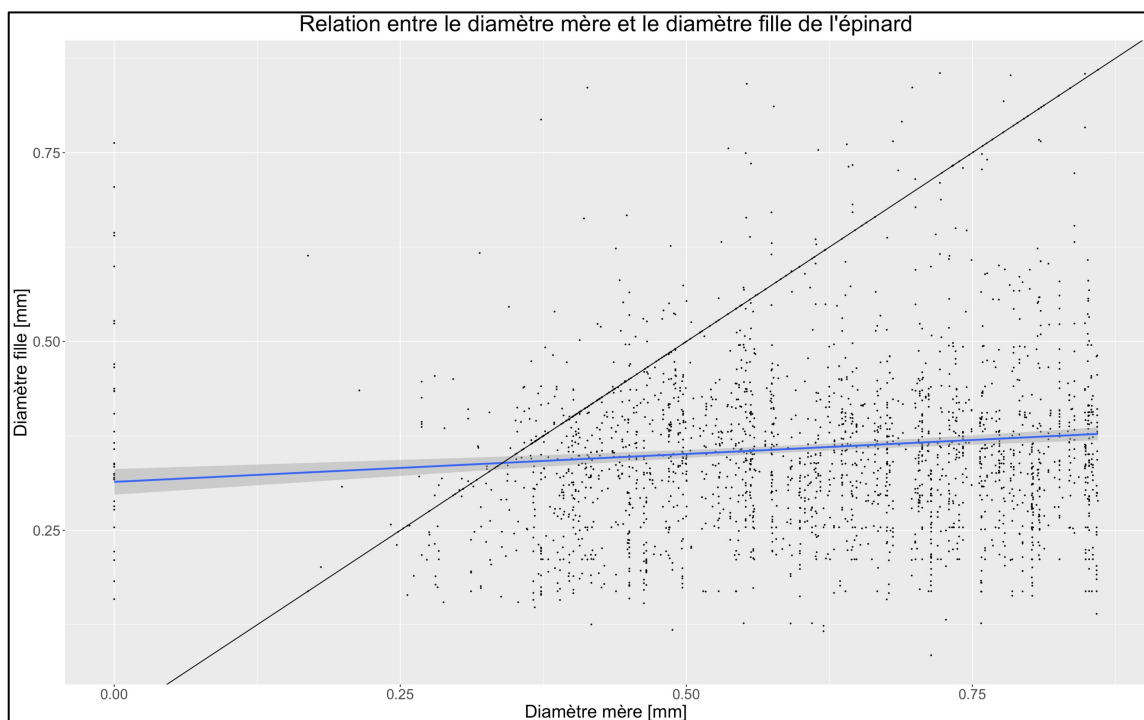


Figure 26 – Relation entre le diamètre des racine mères et celui des racines filles pour l'épinard

Tableau 4 – Paramètres fixes pour l'épinard

Paramètres	Valeur
Proportion du diamètre maximal pour les racines séminales	1
Nombre maximal de racines séminales	1
Âge du début d'émission des racines adventives	0
Distance à la base maximale pour les racines adventives	0
Vitesse d'émission des racines adventives	0
Proportion du diamètre maximal pour les racines adventives	0
Nombre maximal de racines adventives	0
Type de gravitropisme	1
Intensité du gravitropisme	0,03
Probabilité d'émergence d'une latérale sur un axe de diamètre d_{max}	0,8
Probabilité d'émergence d'une latérale sur un axe de diamètre d_{min}	0
Coefficient de variation du diamètre des ramifications	0,15
Coefficient de durée de la croissance	400
Coefficient de croissance radiale	0,9
Coefficient d'espérance de vie	5000

Les cinq paramètres relatifs aux racines adventives ont facilement été déterminés en raison de l'absence de ce type racinaire chez l'épinard. La valeur de ces paramètres est alors nulle. Les épinards n'ayant présentés qu'une seule racine séminale, la valeur des deux paramètres relatifs à ces types racinaires a pu être obtenue visuellement.

Le type de tropisme (TrT) est fixé à 1 et correspond à un gravitropisme vers le bas tandis que son intensité ($Trint$) est fixée par défaut.

Les probabilités d'émergence pd_{min} et pd_{max} sont fixées à leur valeur par défaut et déterminent si le modèle continue ou non à générer des nouvelles racines.

Enfin, les paramètres $CVDD$, GDs , SGC et LDC sont des coefficients, laissés à leur valeur par défaut.

2.1.2. Modélisation



À l'aide de l'intégralité des paramètres présentés plus haut, des modélisations du système racinaire de l'épinard ont été réalisées avec ArchiSimple. Ces modélisations ont pour but de représenter l'architecture racinaire d'un épinard « théorique » basée sur les paramètres obtenus pour les différents traitements. L'objectif est de rendre compte des potentielles différences visuelles de développement racinaire pour les modalités de conversion de prairie.

Avant d'observer les résultats de la modélisation, il est intéressant d'observer quelques systèmes racinaires d'épinards récoltés à Lauzelle pour les trois différentes périodes (Figure 27). Les épinards représentés ici sont : pour $T1$ (Feuilles 1), pour $T2$ (Paille 7) et pour $T3$ (Feuilles 13).

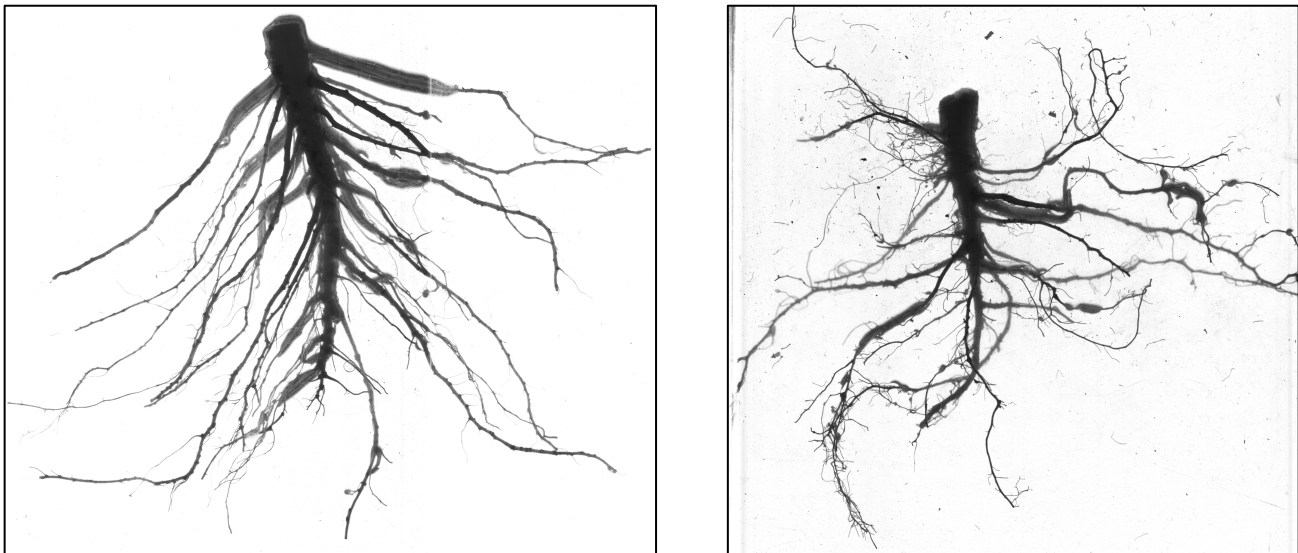


Figure 27 – Scans des échantillons d'épinards récoltés au temps T1 (en haut), T2 (à gauche) et T3 (à droite)

La modélisation a plusieurs intérêts supplémentaires. Elle permet de comparer les systèmes racinaires aux différentes périodes de récolte pour l'épinard. Elle permet également d'observer une évolution de la croissance du système racinaire dans le temps, grâce au paramètre *simtime*, qui détermine la durée de la simulation (en jours) pouvant être divisée en plusieurs pas de temps. Les sorties de la simulation permettent d'obtenir des données complémentaires sur les systèmes racinaires modélisés telles que leur longueur totale, leurs profondeurs ainsi que la surface occupée par ceux-ci et de comparer ces informations entre les traitements (cf. 2.1.3).

Les différentes modalités de conversion de prairie pour l'épinard ont été modélisées après 40 jours pour le temps de récolte T2 (Figure 28). Ce choix a été fait car il a été constaté que le temps de récolte le plus intéressant à modéliser était le T2. En effet, au T1, les épinards étaient trop petits pour que la modélisation soit pertinente. Au T3, les systèmes racinaires furent moins développés que lors du T2. Cela s'explique par le fait qu'au début de sa croissance, l'épinard va préférer allouer ses ressources dans la croissance de son système racinaire afin de capter le plus de nutriments possible. Une fois le système racinaire suffisamment développé, les ressources seront plutôt allouées dans le développement des parties aériennes (feuilles, tige, organes floraux) (Morelock & Correll, 2008). Cet effet avait bien été observé sur le terrain lors de la récolte des échantillons. Au vu des similarités entre les traitements, il est difficile de quantifier un effet de celui-ci sur la croissance racinaire de l'épinard.

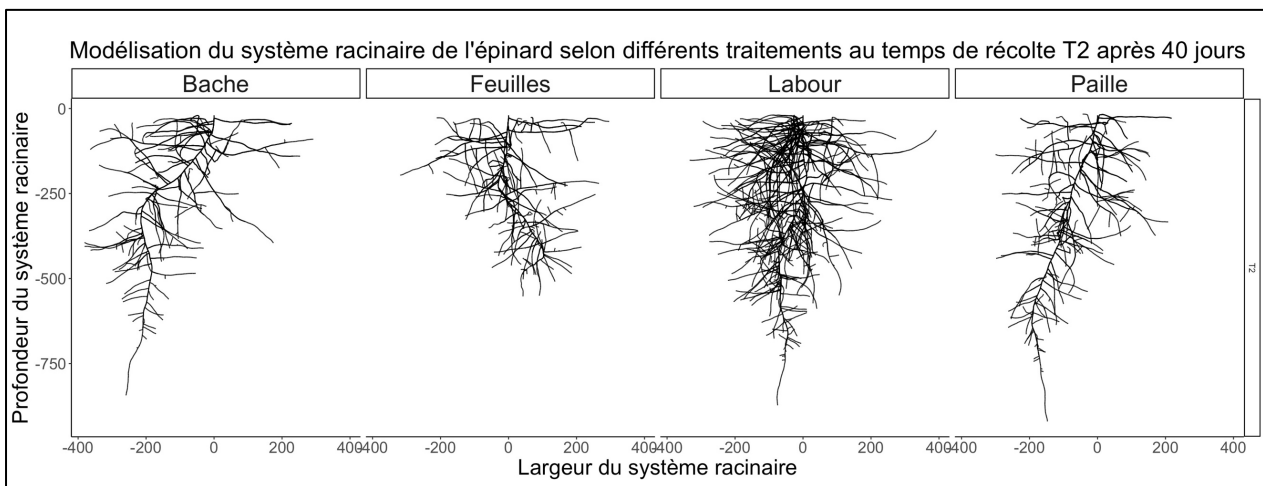


Figure 28 – Modélisation du système racinaire de l'épinard selon différents traitements après 40 jours pour le temps de récolte T2

2.1.3. Sorties de modèle

Chaque simulation réalisée avec ArchiSimple va générer des segments de quelques millimètres qui, ensemble, vont constituer le système racinaire virtuel, auquel seront appliquées des fonctions traduisant les différents phénomènes physiologiques caractérisés par les paramètres. À l'aide de ces segments, il est possible d'obtenir des informations complémentaires intéressantes (longueur totale du système racinaire, profondeur, surface totale). Les deux variables d'intérêts, la longueur totale et la profondeur sont donc des variables simulées par ArchiSimple.

La longueur totale des racines a, dans un premier temps, été comparée entre les différents traitements afin d'observer si une différence significative au niveau de la longueur du système racinaire est observable. Pour cela, un test de Tukey a été réalisé et les données ont été représentées sous forme de boxplots à la période de récolte T2 (Figure 29), à partir des variables simulées par ArchiSimple. Pour l'épinard, on observe des différences significatives entre les traitements pour quasi l'intégralité des traitements (au niveau $\alpha = 0,01$). Le traitement *Labour* se distingue des autres traitements avec une longueur totale beaucoup plus importante due à une plus grande densité de ramification de ce traitement.

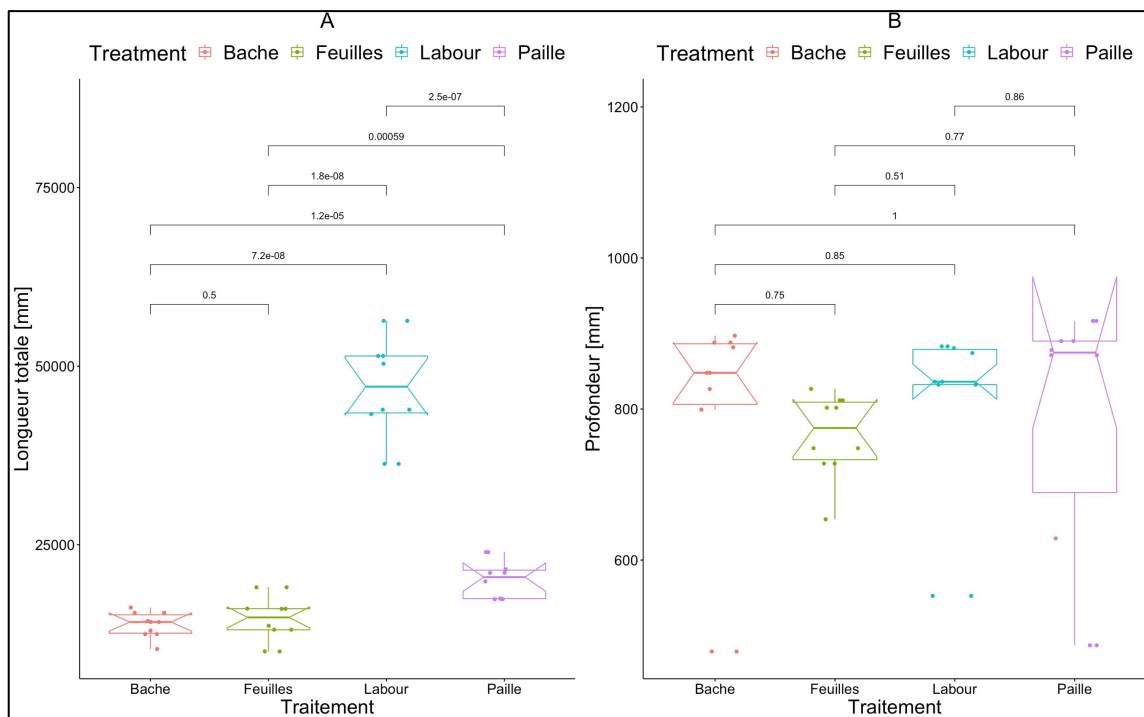


Figure 29 – Comparaison de la longueur totale du système racinaire (A) et de la profondeur (B) pour tous les traitements de l'épinard à la période de récolte T2

Il est intéressant également d'étudier les différences inter-traitements relatives à la profondeur des systèmes racinaires. Ces comparaisons sont illustrées sur la Figure 29 pour la deuxième période de récolte. On y observe à présent une absence totale de différences significatives entre les traitements. On tirera de ces observations que, pour l'épinard, le traitement aura un effet sur la longueur totale du système racinaire mais pas sur la profondeur de celui-ci. Ces observations seront discutées dans la section *Discussion générale*.

Enfin, une dernière comparaison effectuée dans le cadre de l'étude des sorties du modèle est l'évolution de la profondeur selon la durée de la simulation (Figure 30) pour tous les traitements. Cette comparaison a été réalisée à l'aide de boxplots. En toute logique, on observe une augmentation de la profondeur dans le temps

pour tous les traitements. On constate cependant une variabilité croissante de la profondeur à mesure que le temps de simulation augmente. Cette variabilité augmente de manière progressive pour les quatre traitements.

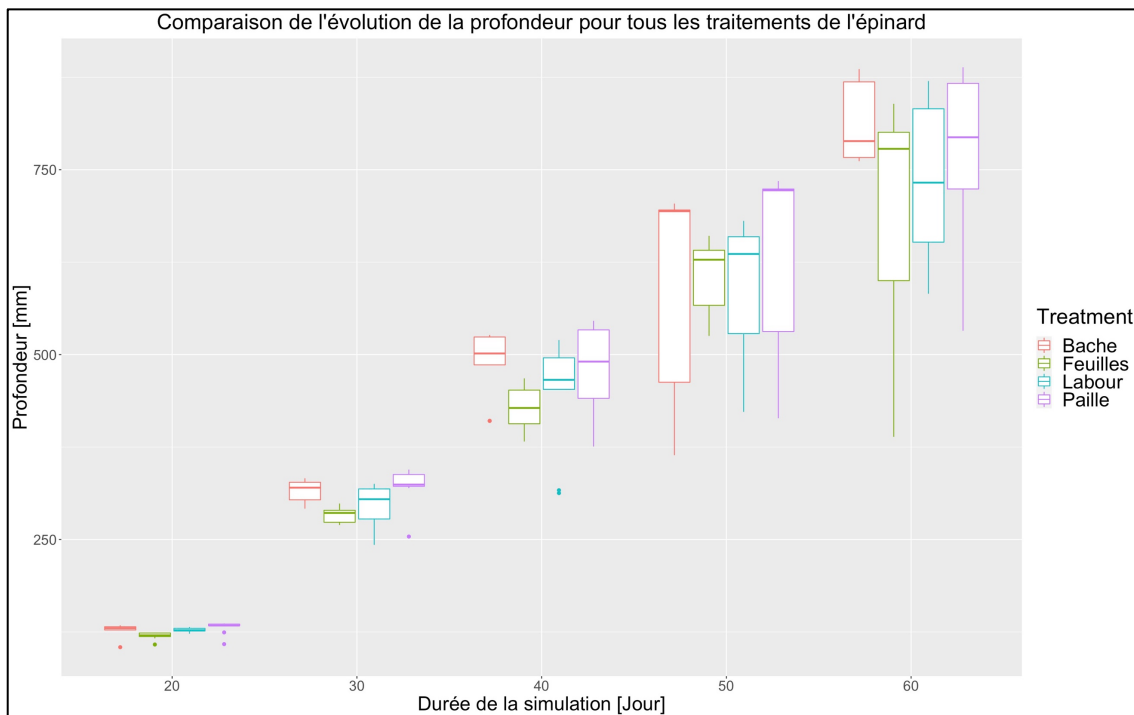


Figure 30 – Comparaison de l'évolution de la profondeur pour tous les traitements de l'épinard

2.2. Butternut

2.2.1. Paramètres individuels

Similairement aux épinards, de nombreux paramètres pour la modélisation des butternuts ont été laissés à leur valeur par défaut. Les autres ont été étudiés selon la même approche comparative que pour l'épinard à l'aide de boxplots et de tests de Tukey.

Il avait été montré dans la section *Résultats et discussion* que les butternuts présentaient les plus grandes valeurs de d_{max} des trois espèces étudiées. Une comparaison interspécifique a été réalisée à la Figure 31. De même que pour les épinards, aucune différence significative (au niveau $\alpha = 0,01$) n'est observable entre les traitements. On peut y observer cependant que les valeurs des diamètres présentent des plus grandes variabilités inter-traitements que les épinards.

Les deux paramètres IPD et TMD du butternut ont également été comparés entre les traitements (Figure 32). À nouveau, les deux paramètres présentent une plus grande variabilité inter-traitement que pour l'épinard. Une nouvelle fois, aucune différence significative n'ont pu être observées entre les traitements.

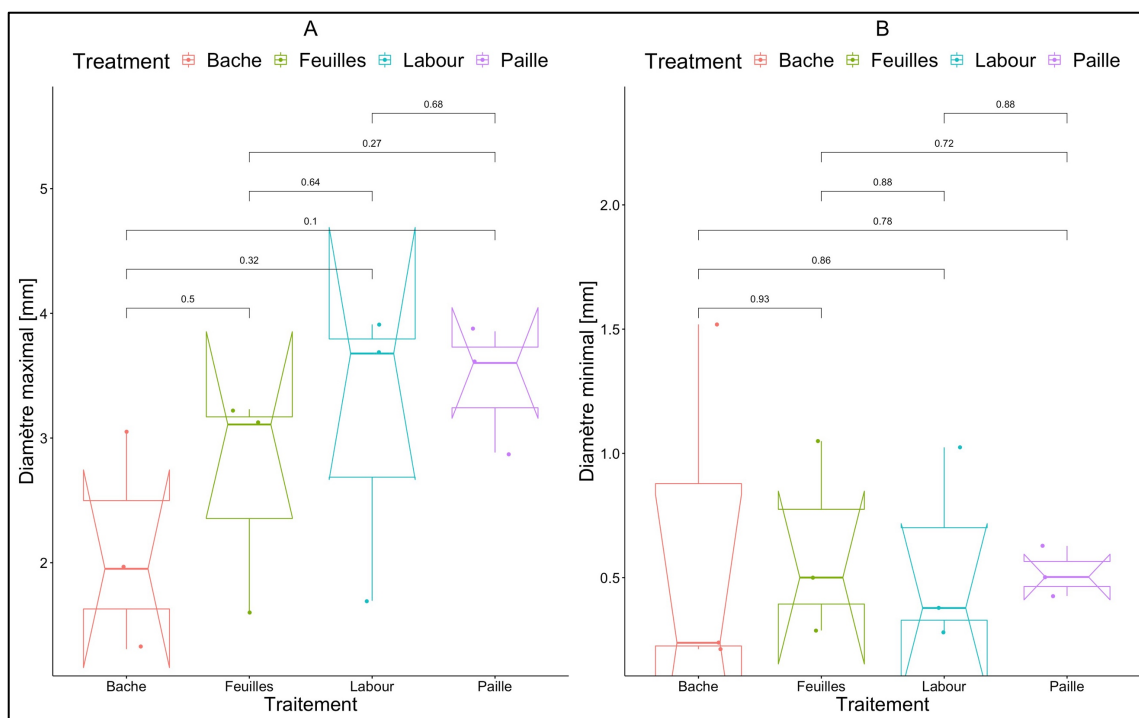


Figure 31 - Comparaison inter-traitement du diamètre maximal (A) et du diamètre minimal (B) pour le butternut

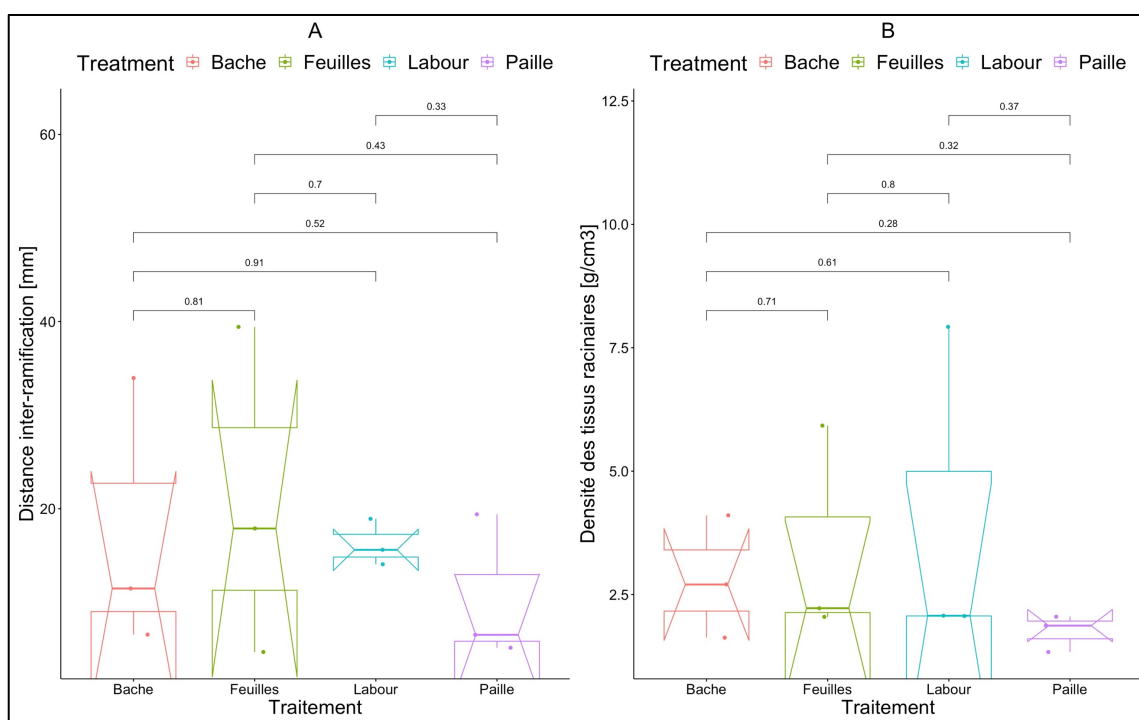


Figure 32 - Comparaison inter-traitement de la distance inter-ramification (A) et de la densité des tissus racinaires (B) pour le butternut

Similairement aux épinards, les quinze autres paramètres ont soit été obtenus par observation visuelle soit laissés à leurs valeurs par défaut. Les paramètres relatifs aux racines séminales et adventives ont été acquis par observation visuelle. Le butternut n'ayant présenté qu'une seule racine séminale et aucune racines adventives, ces valeurs sont faciles à obtenir. Le reste des paramètres a été laissé à la valeur par défaut. Ces quinze paramètres sont résumés dans le Tableau 4 (cf. 2.1.1). La justification des valeurs choisies pour ces paramètres est similaire aux échantillons d'épinards.

Le paramètre *RDM* a été obtenu analytiquement selon la même méthode que pour l'épinard à l'aide de la relation entre les diamètres des racines mères et les diamètres des racines filles (Figure 33). Similairement à l'épinard, la grande majorité des racines latérales présente un diamètre plus fin que leurs mères. Pour le butternut, le paramètre *RDM* a une valeur de 0,166. Moins de données sont observables en raison d'un nombre plus faible d'échantillons récoltés.

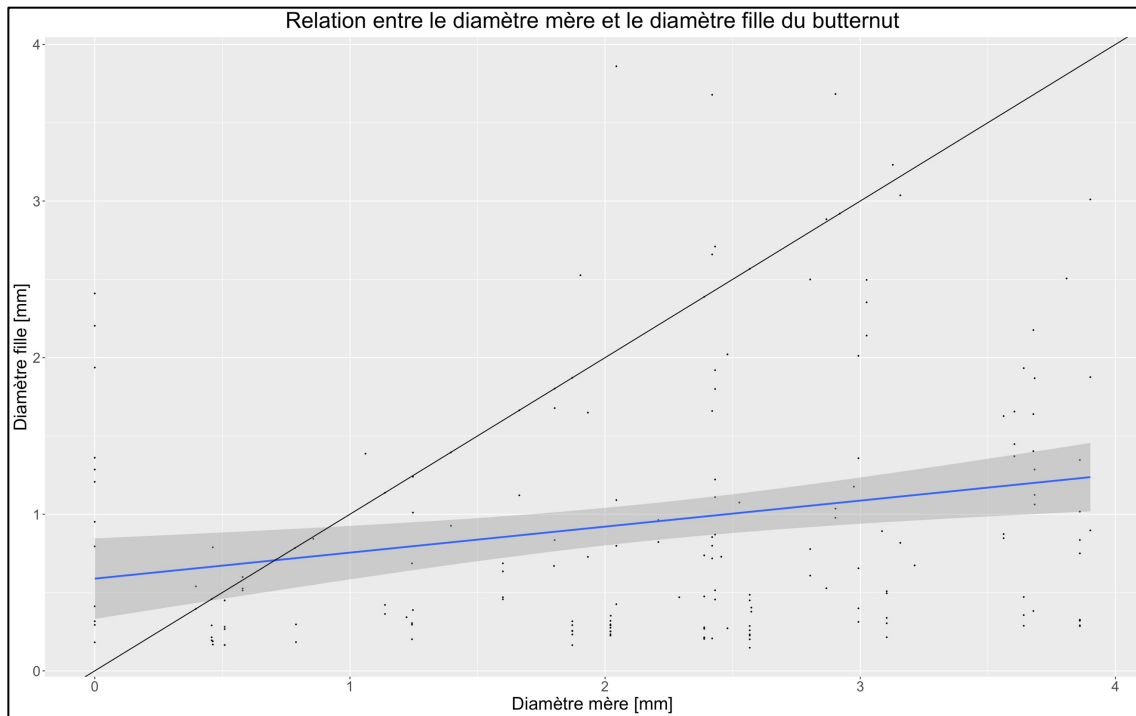


Figure 33 – Relation entre le diamètre des racines mères et celui des racines filles pour le butternut

2.2.2. Modélisation

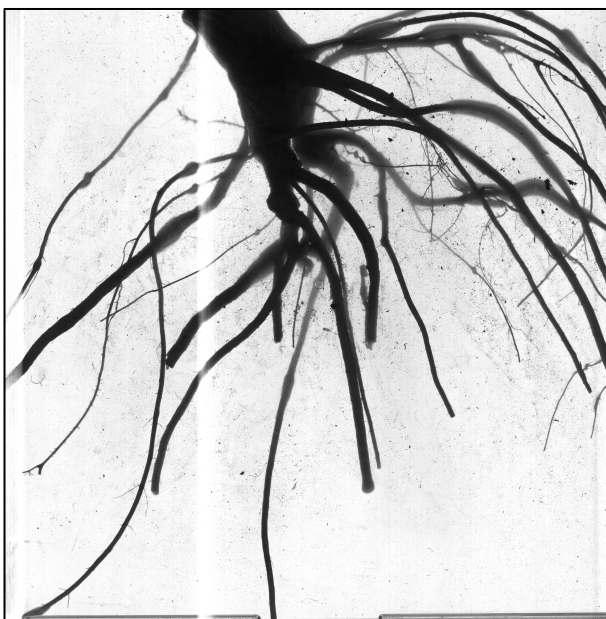


Figure 34 – Scan d'échantillon de butternut récolté

Avant d'observer les résultats de la modélisation, il est intéressant de constater l'état d'un système racinaire de butternut récolté à Lauzelle (Figure 34). Il s'agit ici de l'échantillon *Labour 3*.

La modélisation du butternut à l'aide d'ArchiSimple a suivi le même protocole que pour l'épinard. L'idée est toujours de représenter un butternut « virtuel » et procéder à une observation visuelle des différences observables entre les traitements. La modélisation a été à nouveau effectuée à des valeurs croissantes de *simtime* (20 jours à 60 jours). Contrairement aux expériences sur les épinards, il n'y a eu ici qu'une seule période de récolte.

Les différentes modalités de conversion de prairies ont été modélisées pour le butternut après 60 jours (Figure 35). De légères différences visuelles sont observables. Le traitement *Bâche* présente un système racinaire

clairement moins développé que les autres, notamment concernant la profondeur de celui-ci. On peut observer des différences claires de ramification entre les différents traitements dues à des différences au niveau du paramètre *IPD* (valeur la plus faible pour le traitement *Paille* et la plus élevée pour le traitement *Labour*). Ces différences de valeurs pourraient expliquer la différence de densité observée mais n'expliquerait pas la différence de profondeur observée notamment pour le premier traitement. Excepté cette légère différence de profondeur, peu de différences réellement marquantes sont observables. Il est ainsi difficile de quantifier un réel effet traitement pour cette espèce. De plus, de nombreuses différences sont observables entre les résultats de la modélisation et les échantillons récoltés à Lauzelle. Ces modélisations se rapprochent plus des résultats obtenus dans le cadre des expériences en rhizotrons. Ces différences illustrées grâce à la modélisation n'avaient pas été observées lors de la récolte des échantillons, elles seront discutées dans la section *Discussion générale*.

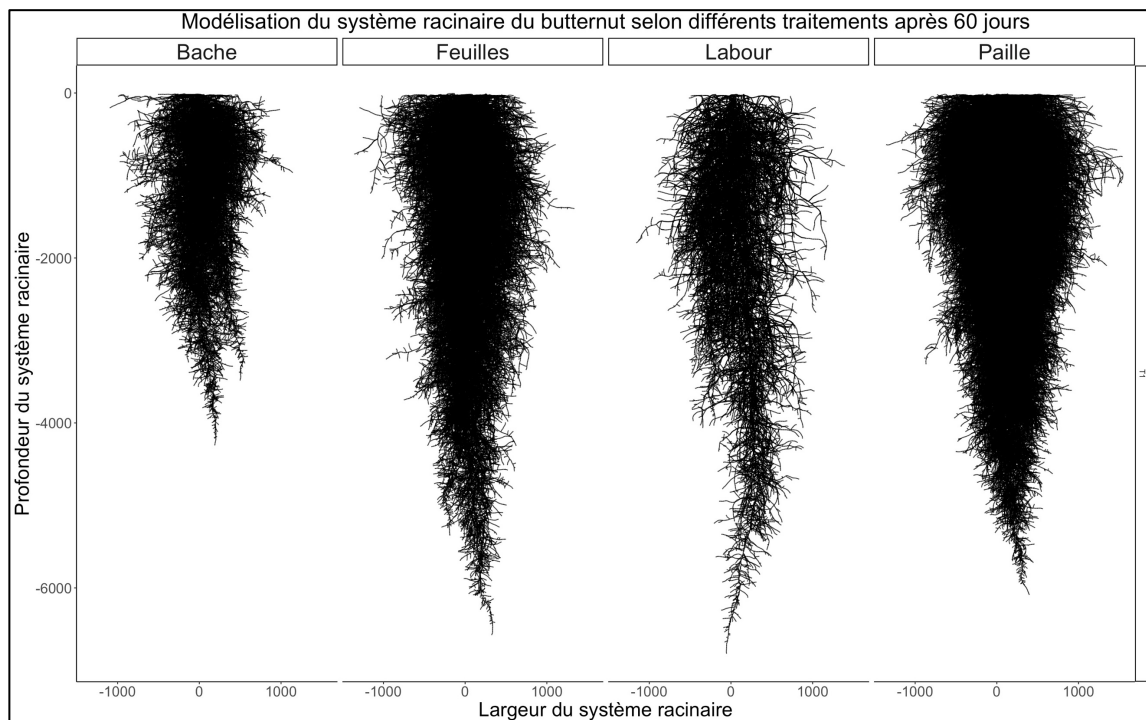


Figure 35 – Modélisation du système racinaire du butternut selon différents traitements après 60 jours

L'évolution de la croissance racinaire du butternut a également été modélisée mais elle n'offre pas d'informations complémentaires à la Figure 35. Cette évolution peut être retrouvée dans l'Annexe 5 : Évolution de la croissance du butternut en fonction du temps pour tous les traitements

2.2.3. Sorties de modèle

Similairement à l'épinard, la longueur totale des racines simulée par ArchiSimple a été comparée à l'aide de tests de Tukey (Figure 36). Des différences significatives sont également observables entre presque l'intégralité des traitements. On observe à nouveau l'effet d'une grande densité de ramification des traitements *Feuilles* et *Labour* sur la longueur totale du système racinaire. Une seconde comparaison inter-traitement de la profondeur a été réalisée (Figure 36). Au même niveau de confiance ($\alpha = 0,01$), on observe cette fois un effet significatif du traitement sur la profondeur pour certains traitements uniquement. Il a été déterminé qu'un effet significatif du traitement sur la profondeur pouvait être observé. On peut également faire le rapprochement entre ces boxplots et les résultats de la modélisation. Le traitement *Bâche* présente des valeurs plus faibles de profondeur, ce qui est en accord avec la Figure 35.

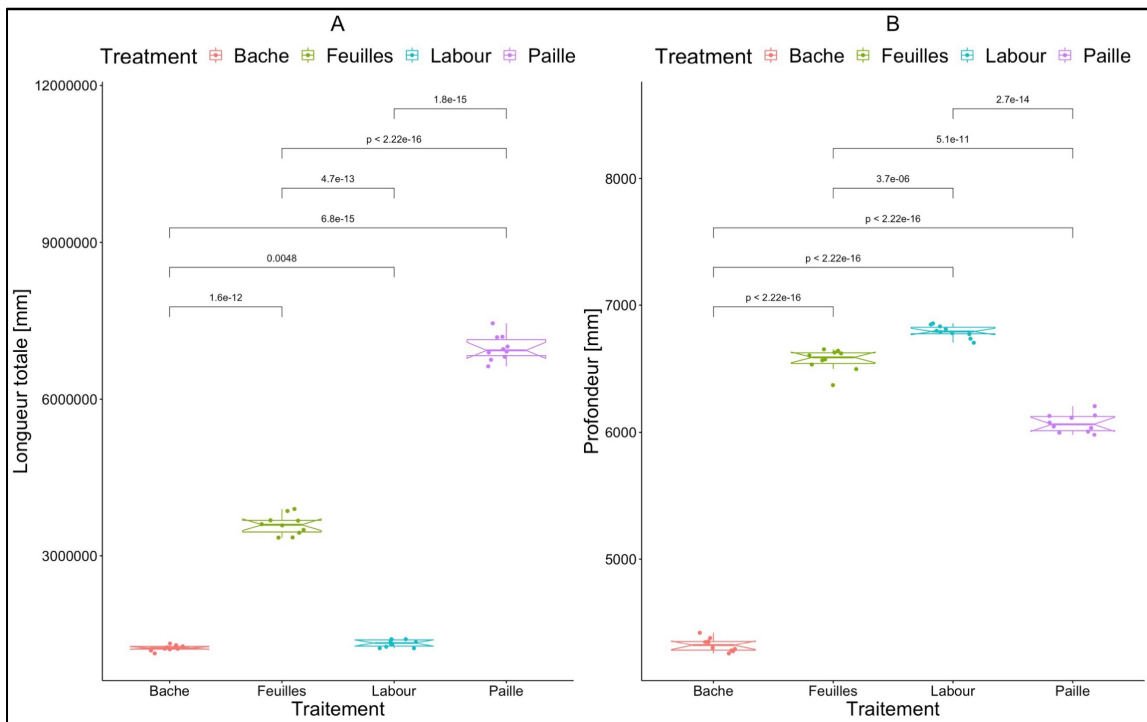


Figure 36 – Comparaison de la longueur totale (A) et de la profondeur (B) du système racinaire pour tous les traitements du butternut

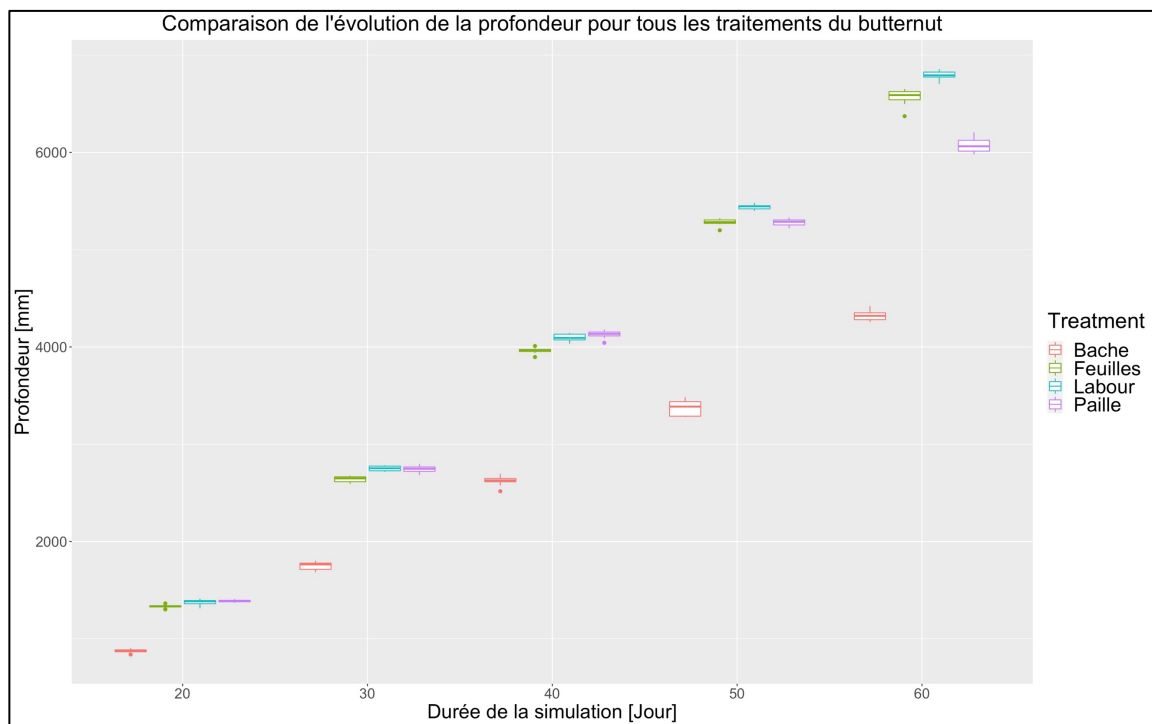


Figure 37 – Comparaison de l'évolution de la profondeur pour tous les traitements du butternut

Similairement à l'épinard, une étude de l'évolution de la profondeur selon la durée de la simulation pour tous les traitements a été réalisée (Figure 37). La tendance observée ici est une augmentation croissante de la profondeur pour tous les traitements qui peut être observée sur l'intégralité de la simulation. La variabilité des données ne varie presque pas dans le temps.

2.3. Potimarron

2.3.1. Paramètres individuels

Le même processus décrit ci-dessus a été appliqué également aux paramètres du potimarron afin de comparer les traitements entre eux et réaliser une modélisation avec ArchiSimple. À nouveau, de nombreux paramètres ont été laissés à leurs valeurs par défaut.

Les paramètres d_{min} et d_{max} ont été comparés à la Figure 38. Tout comme les deux autres espèces, aucun effet traitement n'est à constater (au niveau $\alpha = 0,01$). Une grande variabilité inter-traitements s'observe cependant. De même que pour ces paramètres de diamètres, les paramètres IPD et TMD ont été comparés entre les traitements (Figure 39). Aucune différence significative n'est à noter également.

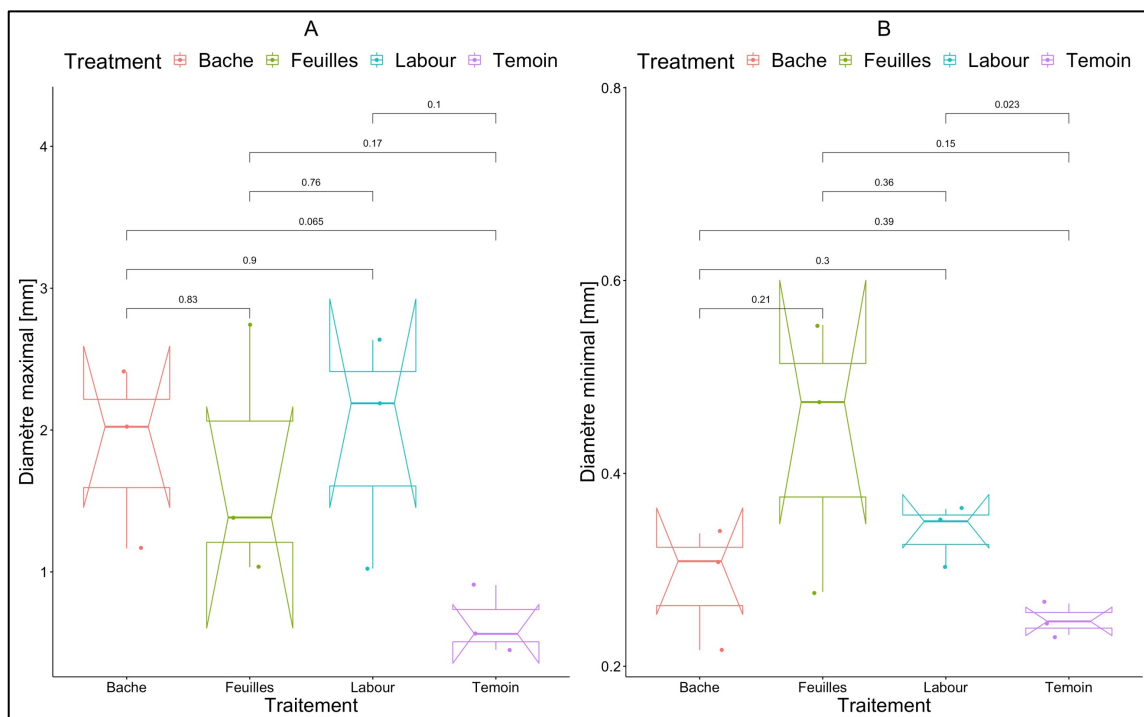


Figure 38 - Comparaison inter-traitement du diamètre maximal (A) et du diamètre minimal (B) pour le potimarron

L'obtention du reste des paramètres suit exactement la même logique que pour les deux espèces précédentes. Les potimarrons n'ont présenté qu'une seule racine séminale et aucune racines adventives. Il était facile d'en déterminer les paramètres liés à ces deux types racinaires. Le reste des paramètres a été laissé à la valeur par défaut. Ces valeurs sont résumées dans le Tableau 4 (cf. 2.1.1).

Enfin, le paramètre RDM a été obtenu selon la même méthode que précédemment. La relation des diamètres (Figure 40) suit la même tendance que pour les deux autres espèces bien que l'on observe un plus grand nombre de racines latérales dont le diamètre dépasse celui de leurs mères. Pour le potimarron, le paramètre RDM a une valeur de 0,214.

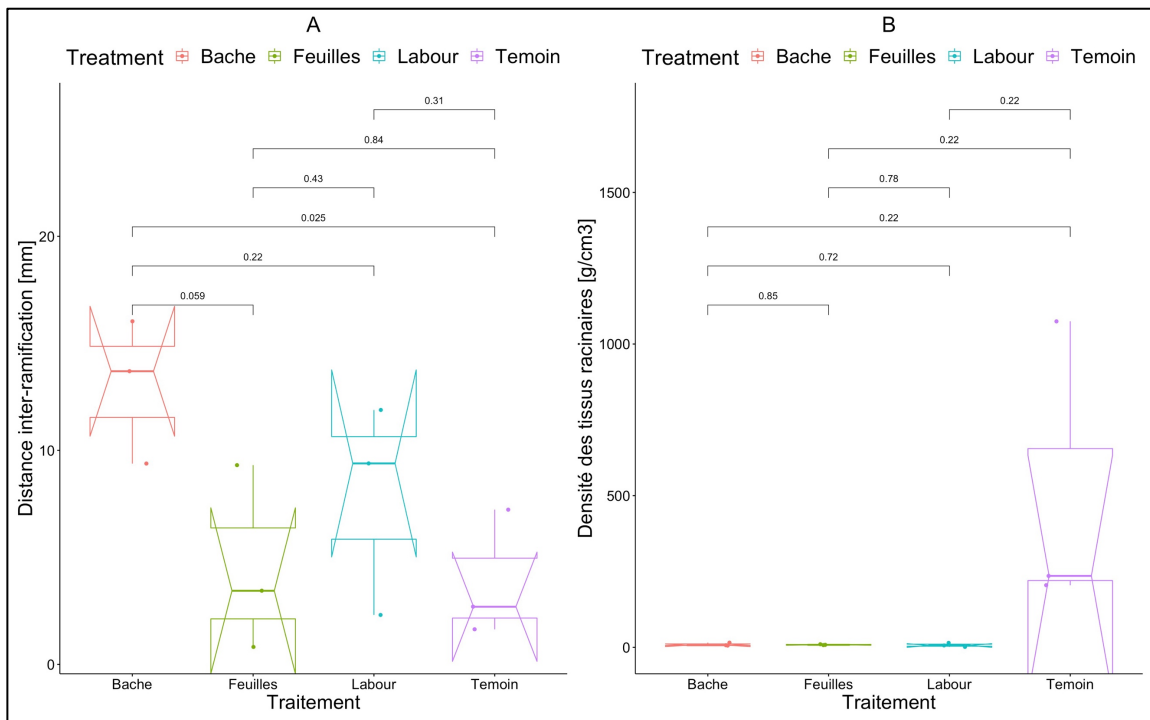


Figure 39 - Comparaison inter-traitement de la distance inter-ramification (A) et de la densité des tissus racinaires (B) pour le potimarron

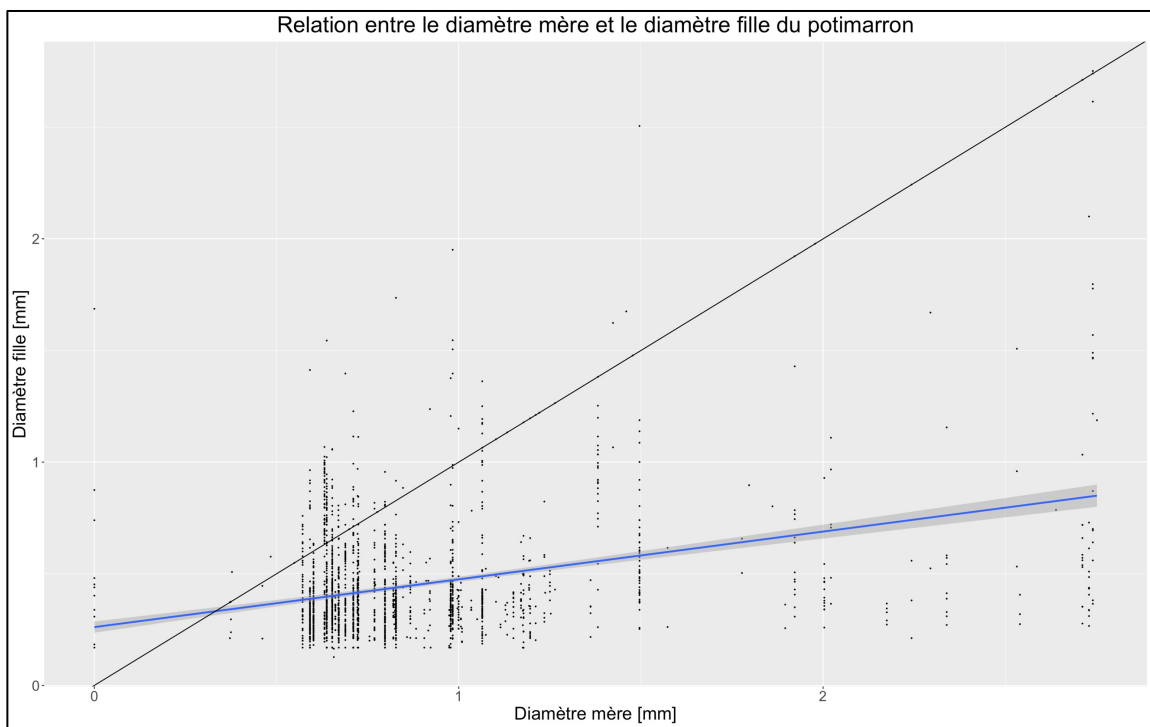


Figure 40 – Relation entre le diamètre des racine mères et celui des racines filles pour le potimarron

2.3.2. Modélisation

À nouveau, avant de réaliser la modélisation, il est intéressant de regarder l'état des échantillons récoltés. La Figure 41 illustre des scans de potimarrons : un échantillon récolté à Lauzelle à gauche (*Labour 3*) et un témoin à droite (*Témoin 1*).

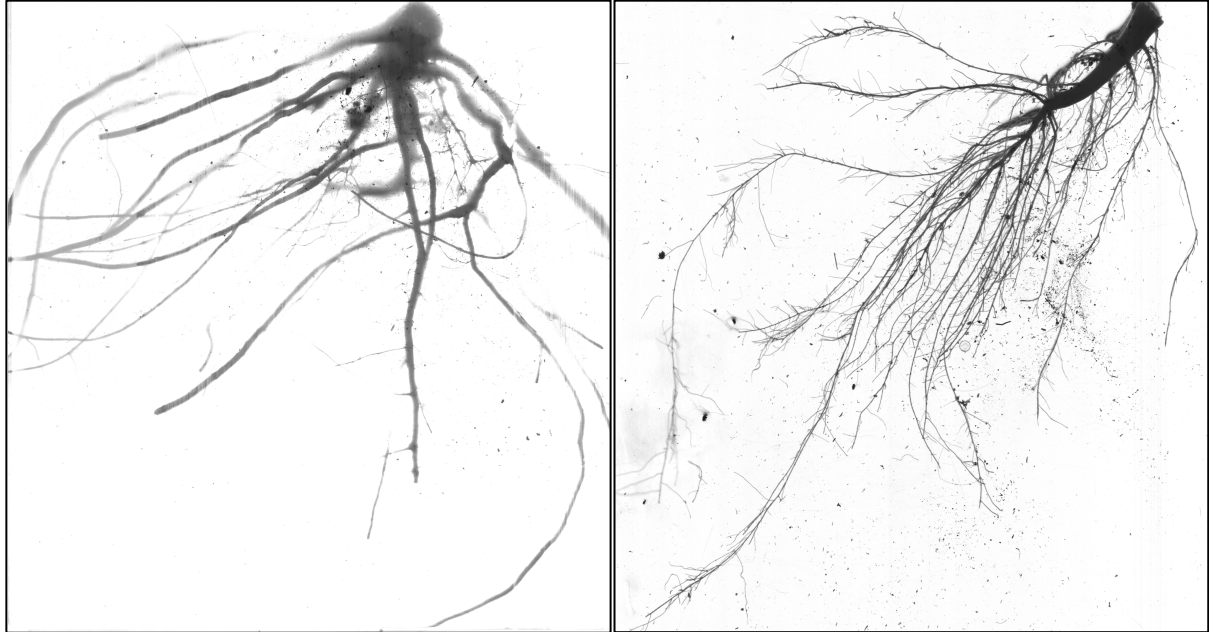


Figure 41 – Scans des échantillons de potimarrons récoltés : *Labour* (à gauche) et *Témoin* (à droite)

La modélisation du potimarron à l'aide d'ArchiSimple a été réalisée de la même manière que précédemment. Les valeurs du paramètre *simtime* suivaient la même série de valeurs croissantes. À nouveau, comme pour le butternut, il n'y a qu'une seule période de récolte des échantillons de potimarrons.

Les différentes modalités de conversion de prairies ont été modélisées pour le potimarron après 60 jours (Figure 42). De nombreuses informations sont à noter quant au résultat de cette modélisation. On peut y observer de nombreuses différences entre les traitements. Concernant la profondeur, contrairement au butternut, c'est le traitement *Bâche* qui montre la croissance la plus importante. Pour le traitement *Témoin*, on observe une croissance en profondeur considérablement plus faible que les autres traitements. Ceux-ci ayant été cultivés en pot dans les serres de l'UCLouvain, un très faible espace de croissance était disponible. ArchiSimple semble avoir représenté cette contrainte parfaitement. Similairement au butternut, des différences de ramification sont observables avec une extrême densité de ramification pour le traitement *Feuilles* et le traitement *Témoin*. En regardant la valeur des paramètres mesurés, le traitement *Feuilles* du potimarron présente la valeur mesurée du paramètre *IPD* la plus faible parmi l'intégralité des échantillons. Cette densité de ramification cause presque des soucis de lisibilité de cette modélisation bien que l'on puisse y décerner néanmoins des informations nécessaires. Sur cette modélisation, on peut observer un effet traitement plus important que pour les deux autres espèces étudiées.

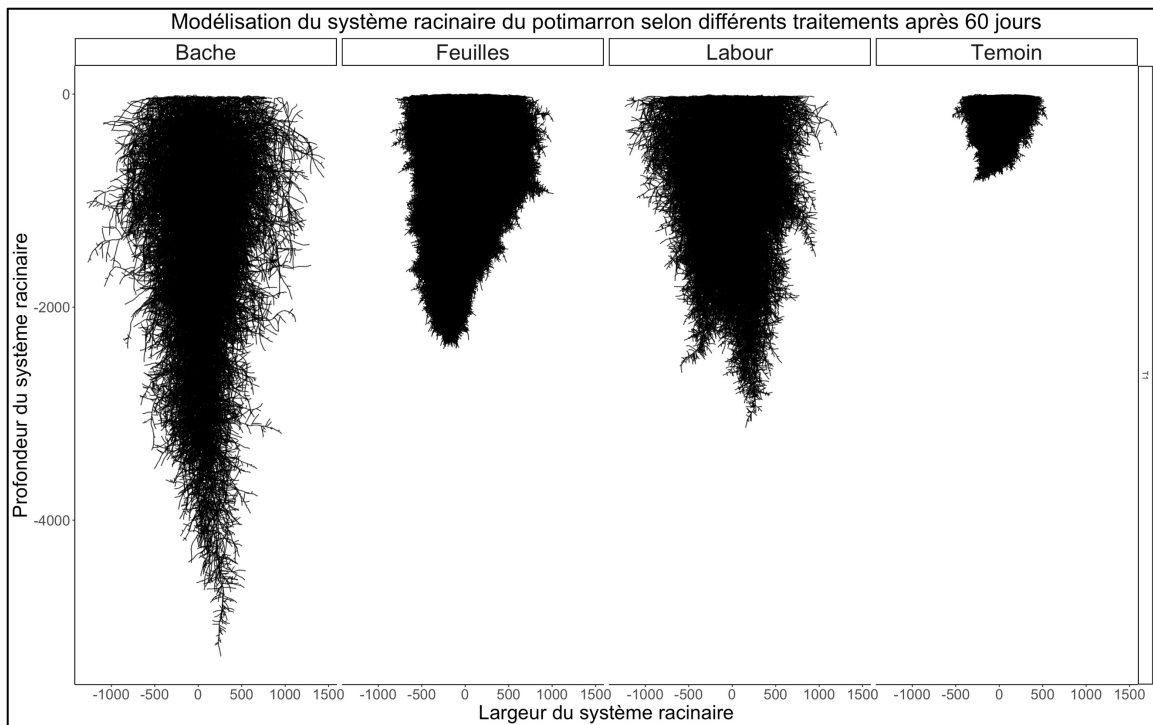


Figure 42 – Modélisation du système racinaire du potimarron selon différents traitements après 60 jours

L'évolution de la croissance racinaire du potimarron a également été modélisée mais à nouveau elle n'apporte pas d'informations complémentaires à la Figure 42. Cette évolution peut être retrouvée dans l'Annexe 6 : Évolution de la croissance du potimarron en fonction du temps pour tous les traitements.

2.3.3. Sorties de modèle

À nouveau, la longueur totale ainsi que la profondeur ont été comparées entre les traitements (Figure 43). Pour cette comparaison, il a été choisi d'exclure le traitement *Témoin* car les conditions d'étude furent complètement différentes et la comparaison n'avait pas lieu d'être. Pour la longueur totale, des différences significatives sont observables entre l'intégralité des traitements (au niveau $\alpha = 0,01$). L'effet de la grande densité du traitement *Feuilles* est également marquée ici. La seconde comparaison, celle de la profondeur, montre aussi des différences significatives entre les traitements (au niveau $\alpha = 0,01$). Ces résultats obtenus peuvent être observés sur la modélisation (Figure 42), on y voit bien les différences de longueur totale et de profondeur prouvées par les résultats des tests de Tukey. De même que pour le butternut, on considèrera un effet significatif du traitement sur ces deux variables pour le potimarron.

Similairement aux autres espèces, une étude de l'évolution de la profondeur selon la durée de la simulation pour tous les traitements, excepté le traitement *Témoin* a été réalisée (Figure 44). La tendance observée ici se rapproche de celle observée pour les deux autres espèces avec une augmentation croissante de la profondeur avec la durée de la simulation. La variabilité des données semble légèrement augmenter au fil du temps.

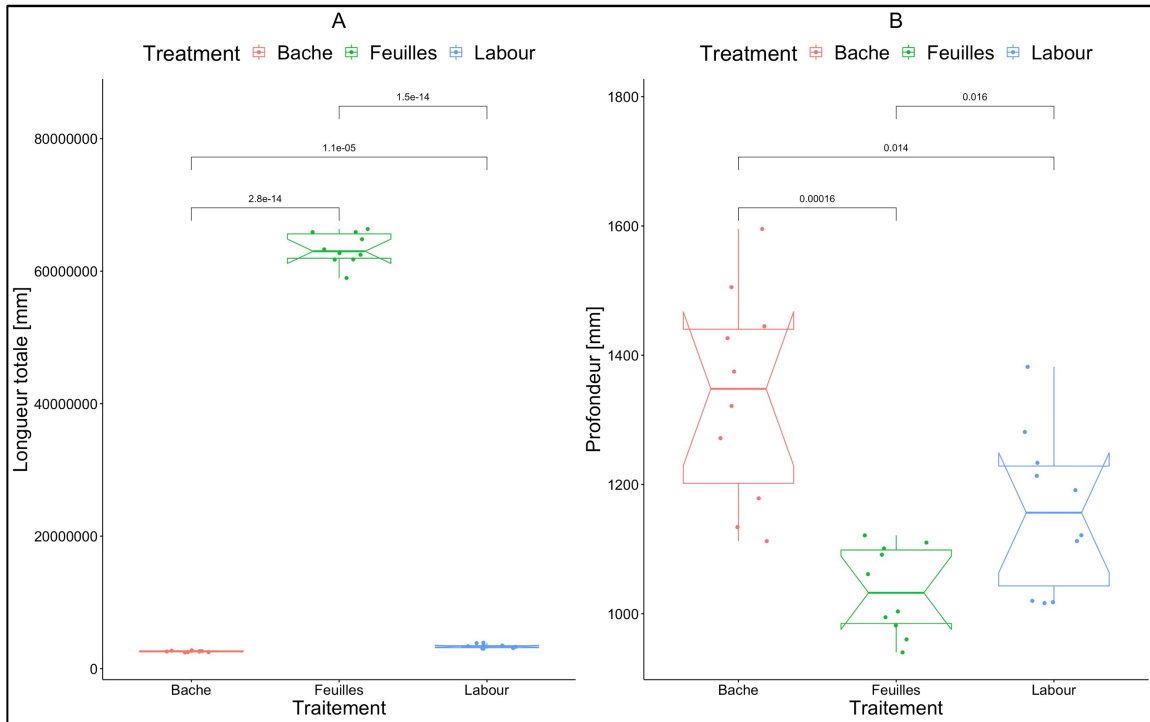


Figure 43 – Comparaison de la longueur totale (A) et de la profondeur (B) du système racinaire pour tous les traitements du potimarron

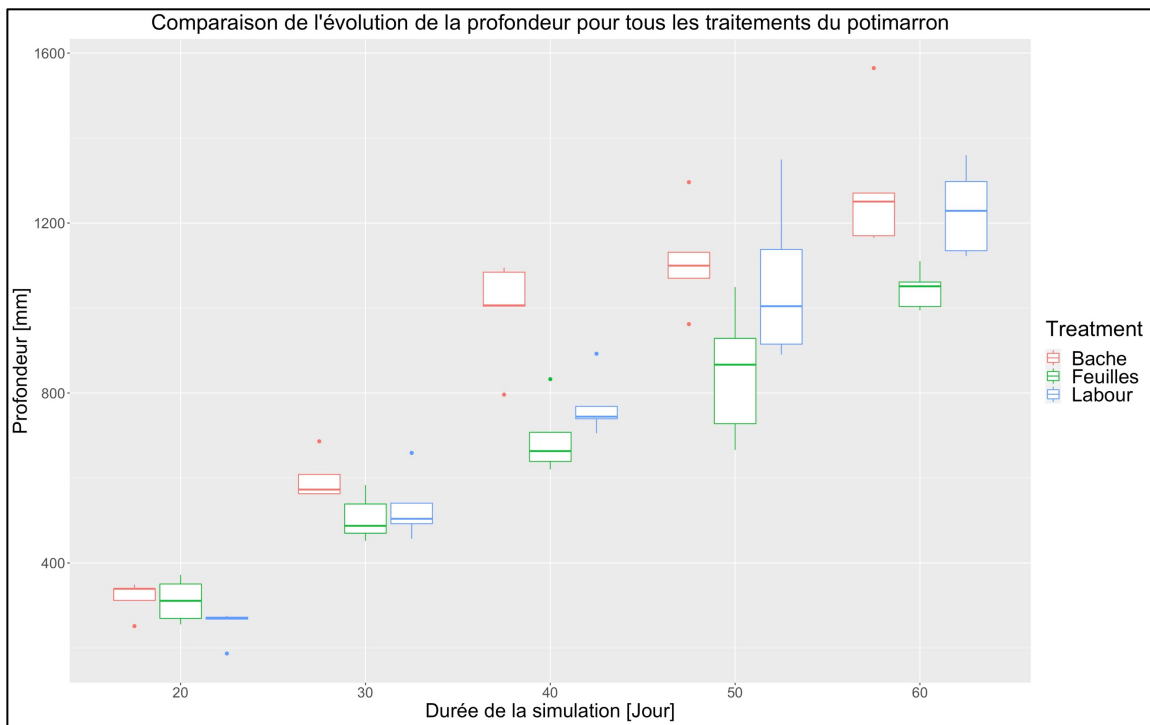


Figure 44 – Comparaison de l'évolution de la profondeur pour tous les traitements du potimarron

Discussion générale

Pour rappel, le premier objectif du travail était de rendre compte de la présence ou non d'un effet du traitement sur la croissance racinaire tant au point de vue architectural (par le biais de la modélisation et des sorties de celle-ci) que physiologique (par la comparaison au niveau des paramètres). Le second objectif était de voir dans quelles mesures ArchiSimple rend compte de ces observations.

La première partie revient sur la comparaison interspécifique réalisée à l'aide des paramètres obtenus en rhizotrons. L'effet d'espèce sera discuté dans un premier temps et la comparaison des résultats de la modélisation à partir de ces paramètres dans un second temps. Dans un troisième temps, l'exercice de validation sera discuté. La deuxième partie discutera des comparaisons inter-traitements effectuées et des résultats observés suite à celles-ci. La troisième partie discutera d'une comparaison paramétrique réalisée afin d'estimer les paramètres les plus sensibles du modèle. Enfin, quelques recommandations personnelles ainsi que des améliorations potentielles du travail seront présentées.

1. Comparaison interspécifique

1.1. Discussion de l'effet espèce

La comparaison interspécifique réalisée dans la section *Résultats et discussion* a montré des différences significatives, sur certains paramètres étudiés, entre l'épinard et les courges. Une absence de significativité est à noter entre les deux espèces de courges. Comme expliqué précédemment, cela n'est pas spécialement étonnant car les deux espèces font partie de la même famille des Cucurbitacées. Il a été montré par plusieurs recherches que ces deux espèces de cette famille présentent un développement racinaire très similaire (Ferriol & Picó, 2008). On a alors un effet de l'espèce notable, du moins dans cette expérience, qui n'est pas étonnant de par les différences que peuvent présenter les espèces au niveau de leurs systèmes racinaires.

Cet effet espèce n'est pas forcément très utile dans le cadre de cette étude car il était prévisible. Cependant, il est intéressant de noter que des espèces de la même famille vont avoir des paramètres relativement similaires. Les différences entre les paramètres des deux courges s'observent principalement sur les paramètres obtenus en rhizotrons (*EL*, *erSem*, *PDT*) et sont dues à plusieurs facteurs externes ayant pu influencer le développement des échantillons (erreurs de manipulations, solution nutritive, taux de germination, etc.).

1.2. Discussion de la modélisation interspécifique

La modélisation interspécifique réalisée dans la section *Résultats et discussion* a montré qu'ArchiSimple représente de manière réaliste les systèmes racinaires des rhizotrons en intégrant les effets des différents paramètres les plus sensibles du modèle. Les grandes densités de ramification observées chez les courges sont représentatives des expériences en rhizotrons. Les épinards, eux, étaient moins développés et moins ramifiés et ArchiSimple a très bien représenté cela.

1.3. Discussion de l'exercice de validation

L'exercice de validation réalisé dans la section précédente a montré de grandes différences entre les longueurs totales modélisées et celles obtenues dans les expériences en rhizotron. Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs origines différentes. La longueur totale est une variable influencée par de nombreux facteurs et il est intéressant de se demander si ArchiSimple a surévalué la longueur totale ou si les espèces cultivées en

champ furent particulièrement peu développées. Dans l'hypothèse où les différences viennent d'un problème de croissance des échantillons, cela peut être dû à des conditions de cultures difficiles (telles que la disponibilité en eau ou en nutriments), aux interactions avec des micro-organismes (tels que des nématodes, des insectes, etc.) ou encore à des effets environnementaux imprévus tels que des stress abiotiques. Il est probable que ces facteurs soient minimisés lors de la modélisation par ArchiSimple et aient eu un impact sur les conditions de cultures.

2. Comparaison inter-traitement

2.1. Absence d'effet traitement sur les paramètres

La comparaison inter-traitement réalisée précédemment a montré une absence totale d'effet traitement sur la valeur des différents paramètres du modèle étudiés. Cette absence d'effet sur les paramètres est bien évidemment à relativiser. Les quatre paramètres ayant été comparés sont, pour trois d'entre eux, des paramètres relatifs aux diamètres. Les diamètres ainsi que la densité des racines peuvent être influencés par de nombreux facteurs tels que le type de sol, la disponibilité en nutriments et en eau, le climat ou encore l'activité microbienne (Boundless, 2021). Le type de sol et le climat ne sont pas des facteurs à prendre en compte ici mais c'est plutôt la disponibilité en eau, en nutriments et l'activité microbienne qui pourraient influencer ces paramètres. Les observations sur les paramètres sont en accord avec les résultats de Wilkin et Legast (2022) qui ont montré qu'il n'y avait pas d'effet du traitement quant à la disponibilité en eau et celle en nutriments. Ces résultats n'affirment en aucun cas que cet effet traitement est complètement absent pour l'intégralité des autres paramètres du modèle non mesurés. Une étude comparative plus approfondie des paramètres aurait peut-être permis d'appuyer (ou de réfuter) cette absence d'effet traitement.

On observe cependant des différences de variabilité des valeurs mesurées pour les différents paramètres comparés. Ces différences s'observent plus chez les courges que chez l'épinard. Bien sûr, avec une absence de suivi des cultures, il est difficile d'identifier l'origine de cette variabilité tant elle pourrait être d'origine culturale, d'origine météorologique ou provenir du traitement directement.

Il est évident également que cette absence d'effet traitement sur la mesure des paramètres n'est pas représentative de l'impact de la conversion de prairie sur le développement racinaire. Probablement qu'un agriculteur réalisant une expérience similaire sur une autre prairie, avec des conditions météorologiques et de cultures différentes, obtiendra des résultats différents.

2.2. Discussion de la modélisation

2.2.1. Modélisation de l'épinard

Les observations de la modélisation de l'épinard présentées à la section *Résultats et discussion* ont montré des résultats très semblables entre tous les traitements (Figure 28) pour les trois périodes de récolte (à l'exception du traitement *Labour* au *T1*). L'absence d'effet traitement illustrée rejoint à la fois les résultats de comparaison des paramètres et les observations visuelles relevées lors de la récolte des échantillons.

2.2.2. Modélisation du butternut

Les résultats de modélisation pour les butternuts ont montré de légères différences entre les traitements (Figure 35). On y a observé que le traitement *Bâche* montre un système racinaire moins dense et moins profond que les autres. Cette distinction n'avait pas été observée visuellement lors de la récolte des échantillons. En reprenant les résultats de Wilkin et Legast, ceux-ci ont observé des seuils d'APL très élevés sous les traitements

Bâche. Le taux d'azote pourrait expliquer ces différences observables car celui-ci va jouer à la fois sur la densité du système racinaire et sur la profondeur (Hoque et al., 2010). Cet excès d'azote observé par Wilkin et Legast pourrait avoir été néfaste dans la croissance de ces butternuts. En effet, cette variété de courge est peu demandeuse en azote (Ferriol & Picó, 2008) et un excès tel que celui observé pourrait causer des problèmes de croissance et de vigueur de la plante (Wang et al., 2008).

2.2.3. Modélisation du potimarron

La modélisation du potimarron présente les résultats les plus variables parmi toutes les modélisations réalisées. On y observe des résultats très différents de ce qui avait été récolté à Lauzelle. Comme expliqué précédemment, le traitement *Témoin* est un cas à part car il a été cultivé dans des conditions bien différentes des autres traitements, et sa faible profondeur est probablement due à l'espace très restreint du pot dans lequel ceux-ci étaient cultivés. On peut en déterminer que ce traitement *Témoin* n'apporte pas énormément d'informations utiles à ce travail. Les différences de ramifications ont été expliquées par le paramètre *IPD* mais il est difficile d'expliquer les différences de profondeur observées tant elle peuvent être d'origine physiologique, pédologique ou paramétrique. Pour cette espèce, c'est le traitement *Bâche* qui possède le système racinaire le plus profond, ce qui vient à l'encontre des observations faites précédemment et remet en question les conséquences des hautes valeurs d'APL mesurées sous la bâche.

2.3. Effet traitement sur la longueur totale

Un effet du traitement a pu être observé sur la longueur totale du système racinaire pour les trois espèces et semble en accord avec les observations faites par Wilkin et Legast (2022). Plusieurs facteurs peuvent influencer la longueur totale d'un système racinaire : le type de sol, l'espèce, la disponibilité en eau et en nutriments, la température, la compaction du sol et les microorganismes (Boundless, 2021). Des différences au niveau de la disponibilité en azote, en agrégats (traduisant la compaction du sol), de la température ou encore de la capacité des micro-organismes à décomposer la MO ont pu être observées par Wilkin et Legast. L'effet traitement observable est également expliqué par le fait que la longueur totale est une caractéristique qui dépend d'un grand nombre de paramètres du modèle et est donc influencée par de multiples effets. Ainsi, bien que l'absence d'effet traitement sur chaque paramètre individuel soit observable, la combinaison de cette multitude de paramètres semble être influencée par le traitement ce qui explique cet effet sur la longueur totale.

2.4. Effet traitement modéré sur la profondeur

La comparaison inter-traitement a montré un effet significatif du traitement pour les deux espèces de courges (il a été considéré que cet effet était significatif pour le butternut bien que l'intégralité des traitements ne présentait pas une différence significative) mais une absence de cet effet pour l'épinard. Il est difficile d'estimer quelle tendance semble la plus réaliste. Pour avoir une précision à ce sujet, il aurait été intéressant de récolter plus d'échantillons de courge afin d'estimer si cette absence d'effet est due au nombre limité d'échantillons récoltés.

2.5. Généralisation de l'effet traitement

Afin de généraliser ces informations, il est intéressant d'observer que le traitement semble avoir un effet sur l'architecture racinaire (densité, profondeur et longueur totale) mais pas sur les processus physiologiques caractérisés par les paramètres. L'absence d'effet traitement sur la physiologie racinaire n'est pas étonnante d'après Pierre Bertin. L'essai n'ayant été installé qu'il y a peu (première conversion le 21 septembre 2021, moins

d'un an avant la récolte des premiers échantillons d'épinards), celui-ci ne s'est pas encore prouvé totalement efficace. Ainsi, il a été observé que la combinaison de paramètres qui, individuellement, ne présentent pas de différences significatives peut amener à des différences globales significatives. Cela s'explique par l'interaction que peuvent présenter les paramètres entre eux.

3. Comparaison paramétrique des expériences

Afin d'estimer les paramètres les plus sensibles d'ArchiSimple, un travail de comparaison des valeurs des paramètres entre les expériences en rhizotron et les expériences à Lauzelle a été réalisé. Ce travail se base sur les grandes différences visuelles observées lors de la modélisation des deux conditions, dues à plusieurs paramètres. De cette étude ressortent quatre paramètres : *dmax*, *IPD*, *RDM* et *TMD*.

Le paramètre *dmax* est fort différent entre les conditions expérimentales et généralement plus élevées à Lauzelle. Ce paramètre semble influencer fortement le modèle car il a été montré que la variation des diamètres des racines influence la construction du système racinaire ainsi que de nombreux processus fonctionnels (pénétration racinaire, solidité, transport de l'eau) (Pagès et al., 2014). L'*IPD* influence la densité du système racinaire et une grande variabilité a été observée à la fois entre les expériences et également entre les échantillons au sein de l'expérience. Le paramètre *RDM* est également fort différent entre les deux expériences. À nouveau, celui-ci est logiquement plus élevé pour les expériences de Lauzelle en raison de la plus grande valeur des diamètres. Le paramètre *TMD* a également de très grosses différences dues au fait que celui-ci a été laissé à la valeur par défaut d'ArchiSimple pour les expériences en rhizotron à cause de l'absence du passage à l'étuve.

Des simulations et modélisations supplémentaires ont également été réalisées afin d'estimer quels paramètres influençaient le plus le modèle ArchiSimple, à savoir les paramètres les plus sensibles. De cette étude, il ressort que les paramètres d'ArchiSimple les plus influents sont l'intégralité des paramètres liés aux diamètres (à savoir *dmin*, *dmax*, *IPD* et *RDM*) ainsi que le paramètre *EL*. Parmi ces paramètres, il a été estimé que très peu d'erreurs pouvaient se retrouver dans les valeurs des *dmin*, *dmax* et *RDM* car ce sont des paramètres simples d'obtention et fournis par SmartRoot a priori sans marge d'erreur. Cependant, les paramètres *EL* et *IPD* présentent plus d'incertitudes quant à leur valeur car ils s'obtiennent de manière plus complexe en intégrant plusieurs facteurs.

Ainsi, des simulations complémentaires à celles présentées précédemment ont été réalisées afin d'étudier la sensibilité du modèle par rapport à ces paramètres. Il a été observé que *dmin* et *RDM* n'influencent pas de manière marquante les résultats de la simulation. La paramètre *dmax* semble avoir une importance dans le modèle mais des variations de sa valeur ne semblent pas impacter grandement les résultats de la modélisation. Le paramètre *IPD* semble influencer énormément le modèle quant à la densité de ramification des systèmes racinaires modélisés. Afin d'observer un potentiel effet complémentaire de ce paramètre sur les résultats, une modélisation des expériences à Lauzelle a été réalisée en employant les valeurs des *IPD* mesurées en rhizotrons. Ainsi, une seule valeur d'*IPD* a été employée par espèce.

La Figure 45 représente le résultat de cette modélisation particulière. On y observe les mêmes tendances quant à la profondeur et les différences entre les traitements présentées dans les résultats de la modélisation pour les trois espèces (Figure 28, Figure 35 et Figure 42). On perçoit alors logiquement qu'aucune différences entre les traitements n'est observable quant à la densité des systèmes racinaires (relativement à leurs profondeur). Ainsi, on ne distingue pas d'effet supplémentaire du paramètre *IPD* dans la croissance des racines.

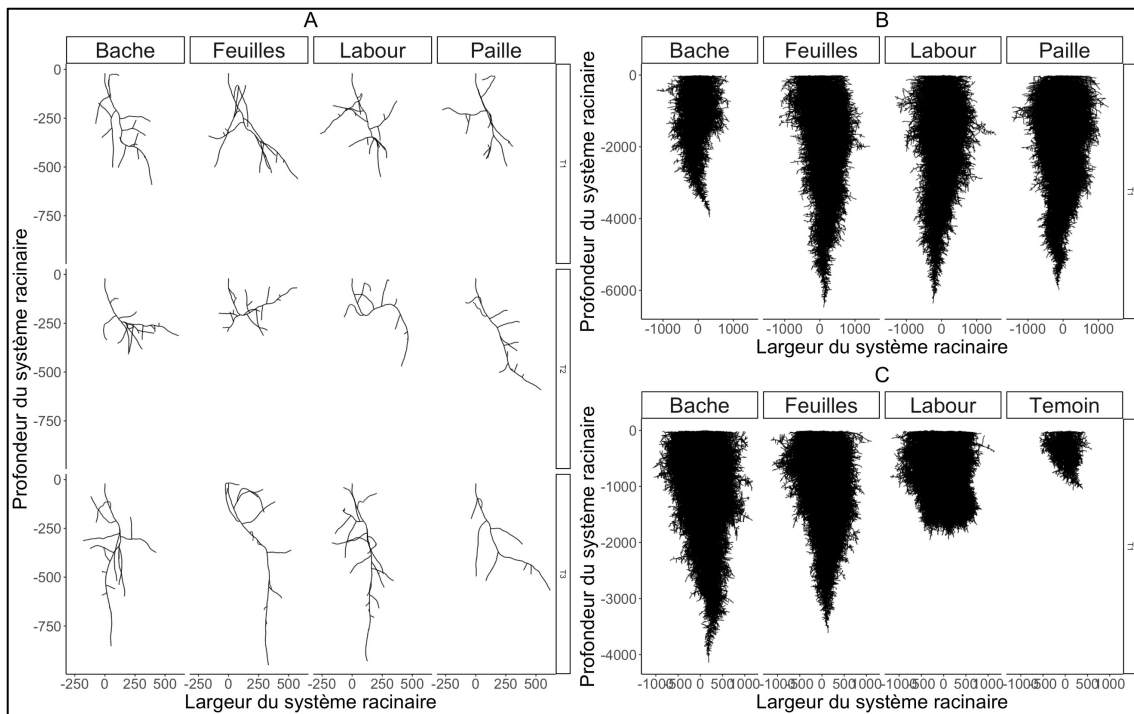


Figure 45 - Modélisation des expériences de Lauzelle avec l'IPD fixé pour l'épinard (A), le butternut (B) et le potimarron (C)

L'autre paramètre qui semble influencer de manière conséquente le modèle est le paramètre *EL*. Afin d'étudier son effet, des études complémentaires sur celui-ci ont été réalisées. Des modélisations additionnelles ont été effectuées en modifiant ce paramètre pour en voir l'impact. Globalement, lorsque la valeur du paramètre *EL* augmente, les profondeurs des systèmes racinaires augmentent en conséquence. Ces différences de valeur entre les espèces s'observent bien lorsque les modélisations des trois espèces sont comparées entre elles. Logiquement, la diminution de ce paramètre engendre des systèmes racinaires de plus petite profondeur. Cependant ce paramètre n'explique pas tous les effets observables et les distinctions entre les traitements qui avaient été observées précédemment. La paramètre *EL* ayant été fixé à une valeur par espèce, il est plus complexe de déterminer l'origine de ces différences. C'est certain que si ce paramètre avait pu être calculé pour les différents traitements, il aurait été plus simple d'expliquer les différences observées.

Comme énoncé précédemment, une méthode alternative employée par Loïc Pagès a également été étudiée. Celle-ci consistait à prendre le rapport entre le diamètre et la croissance pour l'intégralité des racines de chaque rhizotron. Avec cette méthode, les valeurs obtenues d'*EL* différaient de celles gardées et étaient plus petites. Cependant, trop de variabilité dans les jeux de données était observée et les résultats de la modélisation lors de la comparaison interspécifique ne furent pas satisfaisants. Ces relations ont cependant été représentées à la Figure 46. À nouveau, la droite bleue représente la droite de régression du modèle linéaire associé à cette relation et la droite noire représente une droite de comparaison passant par le point 0. On peut y observer la grande différence en nombre de racines entre les espèces.

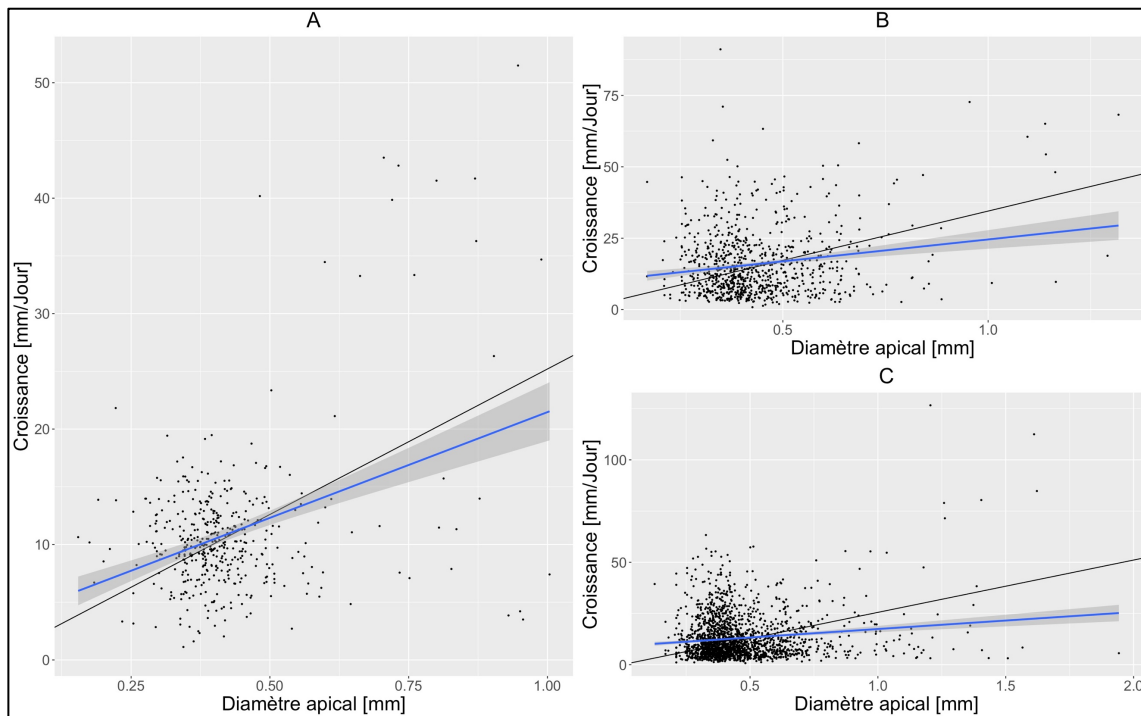


Figure 46 - Relation entre le diamètre et la croissance avec une méthode alternative pour l'épinard (A), le butternut (B) et le potimarron (C)

4. Recommandations

Les analyses ont montré plusieurs points intéressants à soulever dans le cas de la réalisation d'un travail similaire. Il serait profitable de réévaluer l'effet des différents traitements après plusieurs années d'un essai de conversion de prairies. Un effet traitement plus notable serait peut-être observé. Dans l'état actuel, peu de recommandations concernant le choix de modalité de conversion sont possibles. Si l'on s'intéresse à la croissance racinaire, je recommanderais cependant d'éviter une conversion de prairie par occultation à l'aide d'une bâche, un traitement qui a montré des valeurs d'APL beaucoup trop élevées. Les traitements par occultation organique (du moins un traitement à base de paille ou de feuilles mortes) semblent les plus intéressants au niveau racinaire. À nouveau, ces recommandations sont à relativiser car les résultats ne seront probablement pas similaires dans un autre environnement.

Concernant le mode opératoire, l'analyse des données a montré qu'il y a peu d'intérêts à récolter des échantillons à plusieurs pas de temps car lors de la première récolte, les échantillons étaient si petits qu'ils n'étaient pas intéressants. Très peu de différences ont été observées entre la deuxième et la troisième récolte. Je recommande ainsi une seule récolte pour l'obtention des paramètres, à réaliser idéalement entre 30 et 60 jours après le semis avant que les espèces récoltées soient en fleur, afin que les ressources soient encore principalement allouées à la croissance du système racinaire. Il convient également de se demander l'intérêt de calculer les diamètres des racines excavées présentant une croissance secondaire sachant qu'ArchiSimple ne s'intéresse qu'aux diamètres apicaux des racines. Il est ainsi idéal d'étudier des plantes n'ayant pas encore commencé leur croissance secondaire. Cependant, pour des espèces où cette croissance survient rapidement tels que des dicotylédones, l'étude peut s'effectuer en pensant bien à étudier les diamètres apicaux de ces plantes.

ArchiSimple semble rencontrer des difficultés à représenter le développement racinaire à des faibles valeurs du paramètre *simtime*. C'est pourquoi faire varier ce paramètre jusqu'à une valeur de 60 jours semble être une bonne idée. Il tient compte de faire correspondre les durées de simulations avec le temps de récolte des

échantillons afin d'avoir une modélisation la plus exacte possible. Cependant, il a été observé qu'à ce temps-là, la densité de ramification est telle que le résultat paraît « illisible ». Il convient de se demander si une récolte réalisée plus tôt permettrait d'observer une visualisation plus lisible et de mieux discerner des différences entre traitements.

5. Améliorations potentielles du travail

Plusieurs améliorations potentielles du travail peuvent être soulignées. Concernant le protocole de récolte des échantillons, il aurait été intéressant de récolter plus d'échantillons par traitements ou bien d'augmenter le nombre de traitements. L'expérience aurait pu également se faire sur d'autres espèces car les deux espèces courges sont concrètement fort similaires. Malheureusement, cela n'a pas pu être possible par manque de temps principalement. Il aurait été aussi intéressant de mesurer les masses sèches des échantillons de courge mais cela fut compliqué en raison de la taille des fruits et des systèmes caulinaires.

Concernant l'analyse des données, un travail plus en profondeur dans l'obtention des paramètres (notamment les paramètres laissés à leur valeur par défaut) aurait peut-être pu permettre d'observer des résultats différents. Il aurait été intéressant par exemple de passer également les rhizotrons à l'étuve afin d'obtenir des valeurs adaptées pour le paramètre *TMD*. Comme évoqué précédemment, l'obtention du paramètre *EL* s'est faite de manière simplifiée et un travail plus conséquent dans l'obtention d'un *EL* par traitement aurait permis d'obtenir d'autres observations intéressantes, surtout qu'il a été montré que ce paramètre est l'un des plus importants du modèle.

L'exercice de validation réalisé pourrait également être amélioré. En effet, il aurait été intéressant de réaliser un tel exercice pour plus de paramètres. Comparer les expériences de Lauzelle avec leurs modélisations respectives aurait également permis de valider l'exactitude des modélisations par rapport aux échantillons récoltés. Cela n'aurait pas été sans intérêt surtout que les échantillons récoltés se ressemblaient fortement et il était difficile d'observer des distinctions entre les traitements, là où des grandes différences ont été observées lors de la modélisation. Cet exercice de validation aurait peut-être pu permettre d'expliquer ces différences.

Conclusion et perspectives

De plus en plus de maraichers décident d'installer leurs cultures sur d'anciennes prairies permanentes, intéressantes pour leur taux de matière organique ainsi que pour l'absence de produits phytopharmaceutiques. Cependant il a été montré que la conversion de prairie accélérât le cycle du carbone ainsi que celui de l'azote, causant une minéralisation de l'azote associée à une perte de matière organique. Cette minéralisation peut causer une lixiviation de l'azote menant à des problèmes environnementaux. De plus, le PGDA interdit d'implanter des cultures maraichères dans les deux ans qui suivent cette conversion.

Bien que plusieurs études aient déjà vu le jour sur le sujet, peu se sont intéressées au développement racinaire de ces espèces maraichères implantées sur une prairie récemment convertie. C'est dans l'idée d'approfondir cette étude que ce mémoire a vu le jour. L'objectif était de comparer plusieurs modalités de conversion de prairie et l'impact de celles-ci sur le développement racinaire. Cette comparaison a été effectuée par le biais de la modélisation avec ArchiSimple. Le but était d'observer si le modèle rendait compte des différences observées expérimentalement. L'étude a été effectuée sur trois espèces, l'épinard, le butternut et le potimarron. Des expériences à la ferme expérimentale de Lauzelle ainsi qu'en rhizotrons dans les serres de Louvain-la-Neuve ont été réalisées.

Une première comparaison réalisée fut la comparaison interspécifique à partir des résultats obtenus en rhizotrons. L'analyse statistique a révélé de cette étude la présence d'un effet espèce tant au niveau paramétrique qu'au niveau de la modélisation. Peu de différences sont observables entre les deux espèces de courges dû au fait qu'elles appartiennent à la même famille végétale. Un exercice de validation a été effectué afin d'appuyer les résultats et la profondeur est bien estimée par le modèle tandis que la longueur totale semble être surévaluée par ArchiSimple.

Chaque espèce fut étudiée individuellement afin d'évaluer si un effet du traitement était présent ou non. Pour l'épinard, il a été montré que le traitement n'avait pas d'impact sur la valeur des paramètres obtenus lors des expériences. Les modélisations réalisées ont illustré cette absence d'effet. Grâce au modèle ArchiSimple, deux variables intéressantes ont pu être obtenues, la longueur totale et la profondeur du système racinaire. Il a été montré que le traitement impactait la longueur totale mais pas la profondeur du système racinaire.

Les courges furent étudiées selon le même procédé. À nouveau, pour les deux espèces, aucun impact significatif du traitement n'a pu être observé sur les différents paramètres du modèle. Cependant, la modélisation a montré des différences visuelles marquantes entre les traitements. L'origine de ces différences est cependant difficile à estimer. Des différences au niveau pédologiques ont été mises en évidence par l'étude de Wilkin et Legast (2022) mais n'expliquent pas toutes les observations. Au niveau paramétrique, peu de différences sont observables entre les traitements. Ces différences pourraient être d'origine physiologique mais il fut difficile de les estimer dans le cadre de ce travail. Pour les deux espèces de courges, le traitement a un effet sur la longueur totale et la profondeur.

De ces observations il semble difficile d'estimer la présence d'un réel effet traitement. D'une part, aucunes différences au niveau paramétrique n'ont été observées. Lors de la récolte des échantillons, peu de différences visibles permettaient de distinguer les traitements entre eux. Cependant, ArchiSimple représente des différences assez flagrantes pour les espèces de courges et le traitement semble avoir un effet sur les deux variables simulées. Il a été montré que c'était la combinaison de paramètres qui pouvait amener à des différences globales significatives dues aux interactions que peuvent présenter les paramètres entre eux.

Un travail d'approfondissement a également été réalisé afin d'estimer la sensibilité du modèle quant à ses paramètres. De cette étude ressort que les paramètres les plus influents sont les paramètres liés au diamètre, et principalement parmi ceux-ci le diamètre maximal, le diamètre minimal et la distance inter-ramification. Un autre paramètre qui semble influencer grandement le modèle est le paramètre caractérisant la relation entre le diamètre et la croissance. Des modélisations additionnelles ont été réalisées afin de manipuler le modèle et en obtenir ces conclusions.

Cette étude a montré dans la mesure du possible l'effet de différents traitements de conversion de prairie sur le système racinaire de trois plantes maraichères. Bien que deux de ces trois espèces furent fortement similaires, un effet de l'espèce, peu surprenant, a été noté. Cependant, un effet du traitement reste difficile à quantifier. Il se peut que cela soit dû à la quantité restreinte de plantes récoltées et l'intérêt de refaire une telle expérience sur un temps plus long permettant de récolter une quantité conséquente d'échantillons apporterait peut-être des clarifications. Il convient de préciser également que l'essai est encore très récent et que l'effet des traitements appliqués au sol n'a peut-être pas encore atteint son plein potentiel. L'intérêt de refaire un tel travail dans quelques années sur le même essai reste sans aucun doute primordial. Quant au modèle ArchiSimple, il a été montré que celui-ci répondait très bien aux changements paramétriques. Cependant, il reste complexe de comprendre pourquoi le modèle représente de si grosses différences visuelles la plupart du temps non observées sur le terrain.

Références bibliographiques

- Bertin, P. (2021). *LBIRA2109—Systèmes agraires (Faculté des bioingénieur, T. LBIRA2109)*.
- Biielders, C. (2018). *LBRES2105—Soil erosion and conservation (Faculté des bioingénieur, T. LBRES2105)*. [LBRES2105], UCLouvain.
- Biielders, C., Defourny, P., & Draye, X. (2021). *LBRAI2221—Agriculture de précision, géomatique agricole et mécanisation (Faculté des bioingénieur, T. LBRAI2221)*.
- Biologie Végétale. (2019). Racines. *Biologie végétale*. <https://biologievegetale.be/morphologie-vegetale/angiospermes/angiospermes-organographie/racines/>
- Biowallonie. (2022). *Chiffres du Bio*. Biowallonie. <https://www.biowallonie.com/chiffres-du-bio/>
- Blanchard. (2022). *Utiliser une bâche noire pour désherber et préparer le sol*. <https://binette-et-cornichon.com/a/desherber-bache/>
- Boundless. (2021). *General Biology*.
- Chambre d’agriculture d’Aquitaine. (2015). *Optimiser sa production en maraichage biologique*.
- Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., Evans, S. E., Frey, S. D., Giardina, C. P., Hopkins, F. M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M. U. F., Lavelle, J. M., Leifeld, J., Parton, W. J., Megan Steinweg, J., Wallenstein, M. D., Martin Wetterstedt, J. Å., & Bradford, M. A. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates – synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17(11), 3392-3404. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x>
- Couvreur, V., Faget, M., Lobet, G., Javaux, M., Chaumont, F., & Draye, X. (2018). Going with the Flow : Multiscale Insights into the Composite Nature of Water Transport in Roots. *Plant Physiology*, 178(4), 1689-1703. <https://doi.org/10.1104/pp.18.01006>
- David’s Statistics. (2016). *David’s Statistics*.
- EFSA. (2022). *Glyphosate | EFSA*. <https://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/glyphosate>
- Ferriol, M., & Picó, B. (2008). Pumpkin and Winter Squash. In J. Prohens & F. Nuez (Éds.), *Vegetables I: Asteraceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae, and Cucurbitaceae* (p. 317-349). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30443-4_10
- Fourrage Mieux. (2020). *Qu’est ce que la Prairie ?* <https://www.fourragesmieux.be/prairie.html>
- Galarnyk, M. (2023). Understanding Boxplots. *KDnuggets*. <https://www.kdnuggets.com/understanding-boxplots.html>
- Gamm vert. (2018). *Qu’est-ce que la perlite ?* Gamm vert. <https://www.gammvert.fr/conseils/conseils-de-jardinage/qu-est-ce-que-la-perlite>
- GRAW-HILL, M. (2002). *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms* (6e édition). McGraw-Hill Professional.

Hardy, B., & Godden, B. (2018). *Cultures maraîchères après destruction de prairie permanente : Rappel de la législation et bonnes pratiques agronomiques*.

Hardy, B., Jamar, L., & Godden, B. (2017). *Cultures maraîchères après destruction de prairie permanente : Risques environnementaux et intérêts agronomiques*.

Heens, B. (2013). *Fertilisation azotée des légumes industriels*.

Heymans, A., Couvreur, V., LaRue, T., Paez-Garcia, A., & Lobet, G. (2020). GRANAR, a Computational Tool to Better Understand the Functional Importance of Monocotyledon Root Anatomy1 [OPEN]. *Plant Physiology*, 182(2), 707-720. <https://doi.org/10.1104/pp.19.00617>

Hoque, M., Ajwa, H., Othman, M., Smith, R., & Cahn, M. (2010). *Yield and Postharvest Quality of Lettuce in Response to Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers*.

ImageJ. (2022). *ImageJ*. <https://imagej.net/ij/>

Insee. (2022). *Définition—Déciles* | Insee. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1265>

Journal du Net. (2020, avril 21). *C++ : Présentation du langage de programmation*. <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1445316-c-definition-et-presentation-de-ce-langage-de-programmation/>

Lefranc, A. (2005, février 28). *Le gravitropisme des végétaux*. Planet-Vie. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/developpement/controle-du-developpement/le-gravitropisme-des-vegetaux>

Lobet, G., Pagès, L., & Draye, X. (2011). A Novel Image-Analysis Toolbox Enabling Quantitative Analysis of Root System Architecture. *Plant Physiology*, 157(1), 29-39. <https://doi.org/10.1104/pp.111.179895>

MDN. (2022). *Introduction à XML - XML : Extensible Markup Language* | MDN. https://developer.mozilla.org/fr/docs/Web/XML/XML_introduction

Microscopie des plantes. (2022, mars 3). *Site de Michèle Crevecoeur : Méristèmes primaires*. <https://www.unige.ch/sciences/biologie/bioveg/crevecoeur/liens/meristememes-primaires/>

Morelock, T. E., & Correll, J. C. (2008). Spinach. In J. Prohens & F. Nuez (Éds.), *Vegetables I: Asteraceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae, and Cucurbitaceae* (p. 189-218). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30443-4_6

Pagès, L., Bécel, C., Boukcim, H., Moreau, D., Nguyen, C., & Voisin, A.-S. (2014). Calibration and evaluation of ArchiSimple, a simple model of root system architecture. *Ecological Modelling*, 290, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.014>

Pedersen, A., Zhang, K., Thorup-Kristensen, K., & Jensen, L. S. (2010). Modelling diverse root density dynamics and deep nitrogen uptake—A simple approach. *Plant and Soil*, 326(1), 493-510. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0028-8>

Personeni, E., Nguyen, C., Marchal, P., & Pagès, L. (2007). Experimental evaluation of an efflux–influx model of C exudation by individual apical root segments. *Journal of Experimental Botany*, 58(8), 2091-2099. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm065>

- Picque, A. (2016, février 23). *Évaluation des impacts du glyphosate sur la santé humaine*. <https://www.semanticscholar.org/paper/%C3%89valuation-des-impacts-du-glyphosate-sur-la-sant%C3%A9-Picque/e69b2ebe9191b8c2cc90b4e1ce082608c023c7f2>
- Pleinchamp. (2022). *L'homologation du glyphosate prorogée jusqu'au 15 décembre 2023*. <https://www.pleinchamp.com/actualite/l-homologation-du-glyphosate-prorogee-jusqu-au-15-decembre-2023>
- Poepplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B., Schumacher, J., & Gensior, A. (2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*, 17(7), 2415-2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>
- Portail de l'agriculture wallonne. (2022). *Eco-régime prairies permanentes conditionnée à la charge en bétail—Portail de l'agriculture wallonne*. <https://agriculture.wallonie.be/eco-regime-prairies-permanentes-conditionnee-a-la-charge-en-betail>
- PROTECT'eau. (2022a). *Azote potentiellement lessivable : Le principe | PROTECT'eau*. <https://www.protecteau.be/fr/azote-potentiellement-lessivable-le-principe>
- PROTECT'eau. (2022b). *Destruction de prairies permanentes | PROTECT'eau*. <https://www.protecteau.be/fr/destruction-de-prairies-permanentes>
- PROTECT'eau. (2022c). *Le PGDA | PROTECT'eau*. <https://www.protecteau.be/fr/le-pgda>
- Riera, A., Antier, C., & Baret, P. (2020). La filière légumière en Région wallonne : État des lieux et scénarios à horizon 2050. *Sytra*. <https://sytra.be/fr/publication/filiere-legumiere-wallonie/>
- Schnepf, A., Leitner, D., Landl, M., Lobet, G., Mai, T. H., Morandage, S., Sheng, C., Zörner, M., Vanderborcht, J., & Vereecken, H. (2018). CRootBox : A structural–functional modelling framework for root systems. *Annals of Botany*, 121(5), 1033-1053. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx221>
- Smith, G. S., Johnston, C. M., & Cornforth, I. S. (1983). Comparison of Nutrient Solutions for Growth of Plants in Sand Culture. *The New Phytologist*, 94(4), 537-548.
- SPW. (2022). *2021, en chiffres... - État de l'Agriculture Wallonne*. Etat de l'Agriculture Wallonne. http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorsheets/EAW-A_I_a_2.html
- SPW Agriculture. (2022). *WalOnMap*. <http://geoportail.wallonie.be/walonmap>
- Statbel. (2022). *Chiffres clés de l'agriculture 2022 | Statbel*. <https://statbel.fgov.be/fr/chiffres-cles-de-lagriculture-2022>
- Theau, J.-P., & Choisit, J. P. J. P. (2016). *Prairie permanente : Définition*. <https://doi.org/10.17180/46G7-HZ56>
- Tidyverse. (2022). *Tidyverse*. <https://www.tidyverse.org/>
- Trachsel, S., Kaepler, 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(1), 75-87. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0623-8>

UCLouvain. (2022). *Le maraichage—Ferme de Lauzelle*. UCLouvain.
<https://uclouvain.be/fr/facultes/agro/ferm/maraichage-ferme-de-lauzelle.html>

Vandenbergh, C., & Marcoen, J. (2004). Transposition de la Directive Nitrate (CE) en Région wallonne : Azote potentiellement lessivable de référence pour les sols cultivés en Région wallonne. *BASE*.
<https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=13988>

Wang, Z.-H., Li, S.-X., & Malhi, S. (2008). Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(1), 7-23. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3084>

Wilkin, A., & Legast, H. (2022). *Conversion de prairies permanentes pour le maraichage : Risque environnemental et influence sur les propriétés chimiques, biologiques et physiques du sol*.

Wilmus, M. (2021). *Bilan en carbone et azote en culture maraîchère après prairie permanente : Étude de trois espèces légumières*.

Annexes

Annexe 1 : Exigences du maraichage

Le maraichage est une production agricole très demandeuse en temps de travail. En été, la pratique peut demander jusqu'à 70 heures de travail par semaine (Chambre d'agriculture d'Aquitaine, 2015). Elle est très demandeuse et nécessite une planification du travail réfléchie et organisée (rotations, labour, traitement des adventices, récolte, etc.).

Réaliser une planification des cultures est une première étape essentielle. Il faut prendre en compte les besoins en légumes (qui dépendent de la demande sur le marché) mais également sa capacité à organiser la surface de son exploitation (Chambre d'agriculture d'Aquitaine, 2015). L'organisation nécessite également une grande connaissance des différents itinéraires phytotechniques, chaque culture possède sa propre exigence.

En agriculture biologique, un outil essentiel est la rotation, c'est-à-dire la succession dans le temps de cultures sur une même parcelle. Réaliser cette rotation a plusieurs intérêts (Chambre d'agriculture d'Aquitaine, 2015) :

- Travailler le sol à des profondeurs différentes
- Minimiser l'érosion en ayant toujours une culture en place
- Gérer la fertilité du sol
- Réduire l'incidence des maladies sur le sol
- Limiter la profusion des mauvaises herbes

La rotation optimale respecte un intervalle de quatre années entre deux cultures appartenant à la même famille. L'alternance d'une culture exigeante en éléments nutritifs et d'une culture peu exigeante est à recommander ainsi que l'alternance entre des cultures possédant un enracinement superficiel et profond (Chambre d'agriculture d'Aquitaine, 2015).

Concernant la fertilisation azotée des légumes, celle-ci est très peu demandeuse en engrais azotés (Riera et al., 2020). Sur l'intégralité de l'utilisation d'engrais azotés en Wallonie, 98% de ceux-ci sont utilisés en grandes cultures ou en prairies et seulement 2% pour le reste des filières wallonnes y compris la filière maraichère (Riera et al., 2020). Il est important de noter que cette utilisation réduite est bien sûr proportionnelle à la faible surface agricole des productions maraichères par rapport aux grandes cultures. Cette faible valeur peut s'expliquer chez certains légumes par la nature de ceux-ci. En effet, certains légumes comme le pois ou les haricots sont des légumineuses et ont ainsi la capacité de fixer l'azote de l'air (Riera et al., 2020). Cette fixation de l'azote permet d'assurer chez le pois jusqu'à 75% de ses besoins azotés (soit environ 200 kg N/ha) (Heens, 2013). Chez les espèces non-légumineuses telles que la carotte, les besoins azotés ont été estimés à 120 kg N/ha (Heens, 2013). Des études ont montrés qu'un apport d'azote n'augmenterait pas significativement le rendement de cette dernière (Heens, 2013). La culture de l'épinard est très demandeuse en azote. Il s'agit d'un élément clé à doser de manière contrôlée car un surplus de fertilisation cause une accumulation de nitrates dans le feuillage pouvant dépasser les normes de commercialisation (Heens, 2013). Concernant les besoins de l'épinard, ceux-ci ont été estimés à 200 kg N/ha (Heens, 2013).

La lutte contre les adventices et maladies est également un aspect à maîtriser. En agriculture biologique, l'interdiction d'utiliser des produits chimiques rend la tâche plus complexe. Un travail préventif pour lutter contre les maladies est à réaliser tel qu'un choix préalable de variétés résistantes aux maladies ou encore une bonne préparation du sol avec alignement des plans suffisants (Chambre d'agriculture d'Aquitaine, 2015). Pour la gestion des adventices, plusieurs techniques culturales telles que des rotations longues, des faux semis ou l'utilisation d'outils agricoles, comme une bineuse ou une herse étrille permettent de s'en débarrasser (Bertin, 2021).

Le sol doit également être suffisamment travaillé pour permettre une bonne montée en graines des plantes maraichères. Ce travail a pour objectif d'aérer le sol permettant une bonne infiltration de l'eau et favorisant le développement des racines. Il se réalise avec un rotoculteur, un chisel ou une charrue sur une profondeur de vingt centimètres (Bielders et al., 2021).

Annexe 2 : Table de lavage utilisée



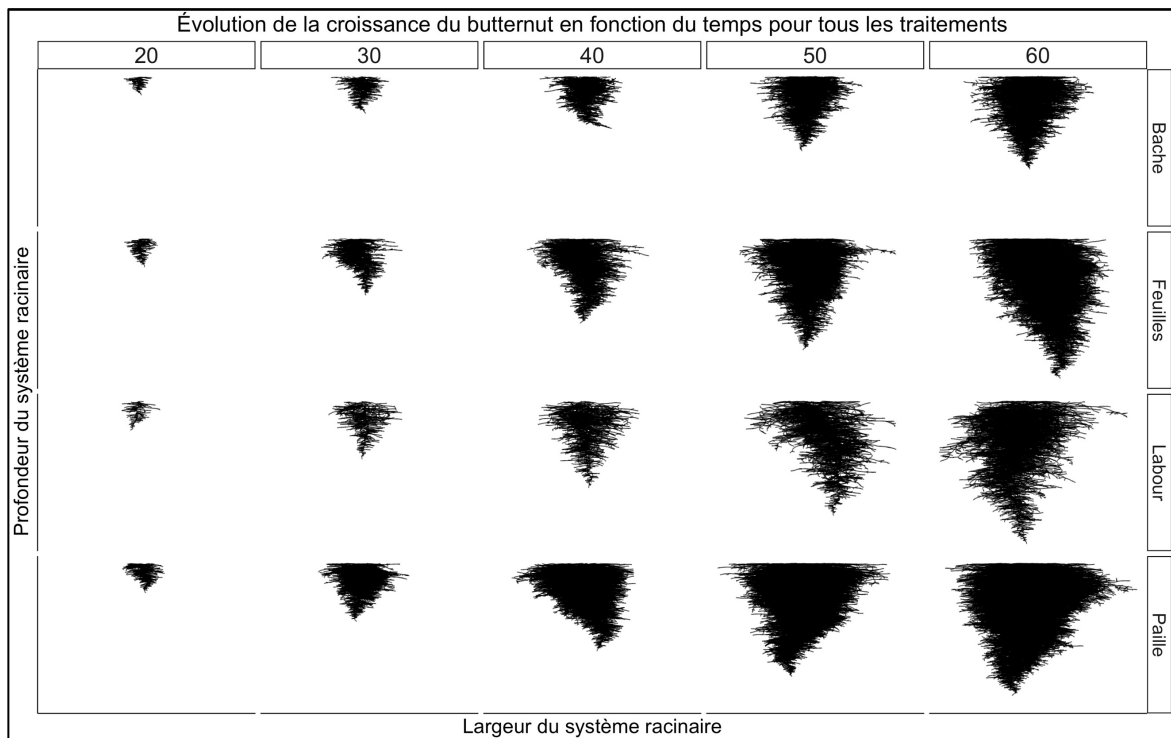
Annexe 3 : Composition de la solution d'Hoagland (Smith et al., 1983)

Composants	Concentration	mL de composant /1L	mL de composant par 25L
2M KNO₃	202 g/L	2,5	31,25
2M Ca(NO₃)₂ x 4 H₂O	236 g/0,5L	2,5	31,25
2M MgSO₄ x 7 H₂O	493 g/L	1	12,5
1M NH₄NO₃	80 g/L	1	12,5
Mineurs:			
H₃BO₃	2,86 g/L		
MnCl₂ x 4 H₂O	1,81 g/L		
ZnSO₄ x 7 H₂O	0,22 g/L	1	12,5
CuSO₄	0,051 g/L		
H₃MoO₄ x H₂O ou Na₂MoO₄ x 2 H₂O	0,09 g/L 0,12 g/L		
1M KH₂PO₄ (pH à 6 avec 3M KOH)	136 g/L	0,5	6,25
Fer (Chélate de fer Sprint 138)	15 g/L	1,5 x 2 = 3	37,5

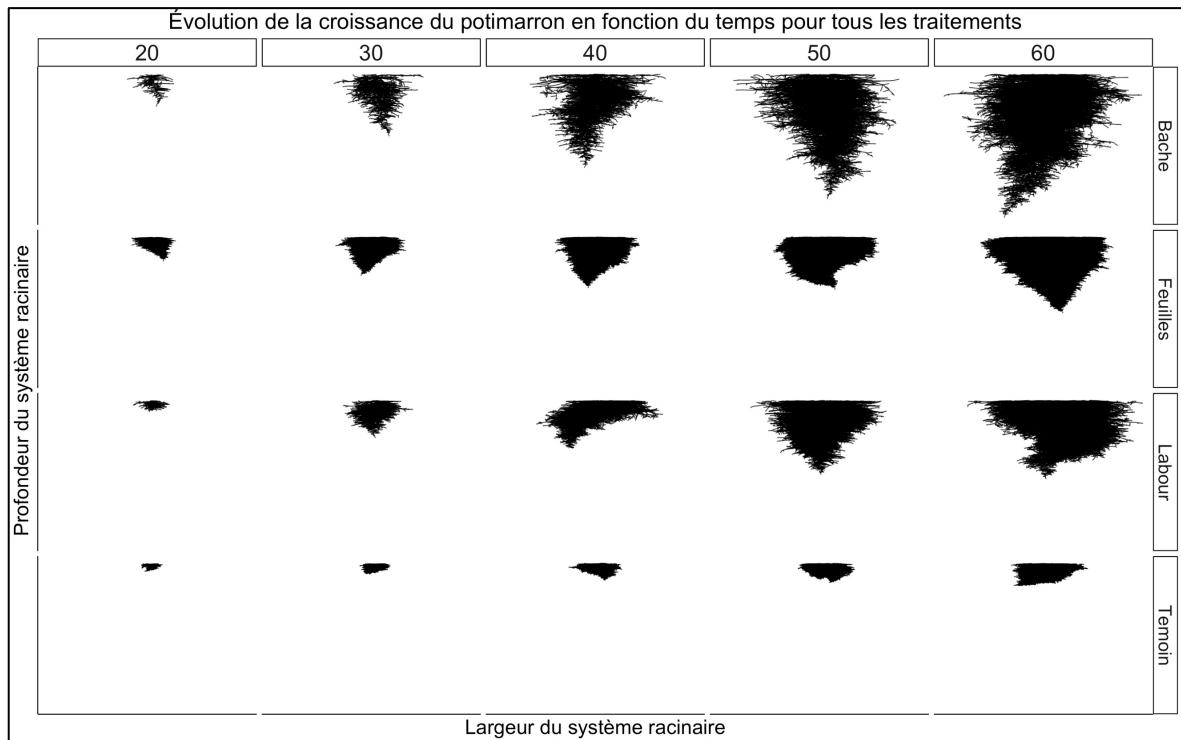
Annexe 4 : Scanner utilisé dans le cadre des expériences



Annexe 5 : Évolution de la croissance du butternut en fonction du temps pour tous les traitements



Annexe 6 : Évolution de la croissance du potimarron en fonction du temps pour tous les traitements



Étude du développement racinaire de cultures maraichères post-conversion de prairie selon différentes modalités de culture.

Présenté par Nicolas Heinrich-Thuet

Les prairies permanentes sont de plus en plus utilisées par les maraichers afin d'y implanter des cultures maraichères. Cette conversion de prairie accélère le cycle du carbone et de l'azote et peut avoir des conséquences néfastes. L'excès d'azote libéré peut être lixivié si celui-ci n'est pas correctement prélevé.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier le développement racinaire de plantes maraichères suite à différentes modalités de conversion de prairies. Les trois espèces étudiées sont l'épinard, le butternut et le potimarron. Une approche par modélisation à l'aide du modèle ArchiSimple est employée lors de cette étude. Des expériences sont réalisées à la fois en rhizotrons dans les serres de Louvain-la-Neuve mais également sur un essai agricole situé à la ferme de Lauzelle, une ancienne prairie convertie en maraichage.

Les résultats de ce travail montrent sans surprise de grandes différences racinaires entre les épinards et les deux espèces de courges. Il a été établi que la modélisation à l'aide d'ArchiSimple ne met pas en évidence un effet du traitement sur le développement racinaire. Aucun effet n'a également été observé sur la valeur mesurée des différents paramètres du modèle. Cependant, la modélisation permet d'obtenir des informations supplémentaires sur les systèmes racinaires telles que la longueur totale ou encore la profondeur de ceux-ci. Il a été montré qu'un effet du traitement pouvait être observé sur ces deux variables. D'une manière générale, on constate un effet du traitement sur l'architecture racinaire (densité, profondeur, longueur totale) mais pas sur les paramètres physiologiques caractérisés par les paramètres d'ArchiSimple. L'essai étant encore récent, il n'est pas sans intérêt de réitérer un tel travail dans plusieurs années afin d'y discerner des différences plus marquantes.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro