

Faculté des bioingénieurs

Étude de la diversité racinaire inter-variétale du froment (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*) et analyse des relations entre traits racinaires

Auteur : Emile Davio

Promoteur : Guillaume Lobet

Lecteurs : Adrien Heymans, Dominique Mingeot

Année académique 2024-2025

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : Sciences agronomiques

Remerciements

Pour commencer, je souhaite remercier mon promoteur, Guillaume Lobet, pour son encadrement tout au long de cette année. Je le remercie pour son total soutien lors des défis rencontrés, ainsi que pour sa bienveillance, sa sympathie et son naturel, propices aux échanges et aux apprentissages.

I would also like to thank Lucia and Corentin for their valuable time, for sharing their wide musical taste with me, for helping me carry out my experiment and for answering the questions I had.

Je tiens également à remercier les membres des serres. En particulier, un grand merci à Thomas pour son aide et ses enseignements, notamment pour le montage des rhizotrons, et à François pour les différents coups de main qu'il a pu me donner.

Ensuite, je tiens à remercier mes ami.e.s qui ont été présent.e.s tout au long de cette année et qui ont ainsi contribué à la rendre plus lumineuse. En particulier, je tiens à remercier mon cher ami Bastien, pour être venu m'assister gaiement lors de la mise en place de mon expérience. Je remercie également Eline, pour m'avoir accompagné tout au long de ce mémoire, jusqu'à y contribuer directement, et pour tous les moments pétillants que nous avons pu partager cette année.

Enfin, je remercie sincèrement mes parents et ma famille pour leur confiance et leur soutien. Merci spécialement à mon père pour ses relectures attentives.

Pour finir, je remercie également Adrien Heymans et Dominique Mingeot d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Table des matières

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux	ii
Liste des abréviations	ii
1. Introduction.....	1
2. État de l'art.....	2
2.1. Contexte général	2
2.1.1. La grande accélération.....	2
2.1.2. Répercussions sur le système Terre	2
2.1.3. Conséquences agricoles et adaptations.....	3
2.2. Le blé	4
2.2.1. L'importance du blé	4
2.2.2. Taxonomie du blé.....	4
2.2.3. Répartition géographique du froment	6
2.3. Diversité végétale.....	7
2.3.1. Notions de diversité végétale	7
2.3.2. L'évolution de la diversité du froment	7
2.3.3. Potentiel des <i>landraces</i>	8
2.4. Architecture racinaire du froment.....	9
2.4.1. Topologie du système racinaire	10
2.5. La prise d'eau par la plante.....	11
2.5.1. Les flux hydriques dans la plante.....	11
2.5.2. L'absorption de l'eau.....	12
2.6. Construction du système racinaire	13
2.7. Idéotype racinaire.....	14
2.8. Traits racinaires	15
2.8.1. Traits structurels	15
2.8.2. Traits fonctionnels hydrauliques	18
3. Objectifs.....	20
4. Matériel et méthodes	21
4.1. Matériel végétal	21

4.2.	Dispositif expérimental.....	22
4.2.1.	Rhizotrons	22
4.3.	Mesures et observations.....	25
4.3.1.	Mesures dynamiques	25
4.3.2.	Mesures statiques	25
4.4.	Numérisation et traitement d'image.....	26
4.5.	Analyse des données.....	29
4.5.1.	Structure des données	29
4.5.2.	Traitement statistique.....	29
4.6.	Modélisation	30
4.6.1.	CRootBox	30
4.6.2.	MARSHAL.....	31
4.7.	Outil de rédaction	31
5.	Résultats	32
5.1.	Comparaison phénotypique entre variétés de froment.....	33
5.1.1.	Au niveau des organes de la plante.....	33
5.1.2.	Au niveau des traits racinaires.....	34
5.2.	Modélisation et capacité fonctionnelle des systèmes racinaires	37
5.2.1.	Architectures modélisées par variété avec CRootBox.....	37
5.2.2.	Comparaison de la conductance totale du système racinaire (Krs)	39
5.2.3.	Évolution de la conductance du système racinaire	39
5.3.	Relations entre traits racinaires	41
5.3.1.	Relation entre la vitesse d'élongation et la LAUZ des racines primaires.....	41
5.3.2.	Relation entre la vitesse d'élongation et le diamètre des racines primaires	41
5.3.3.	Évolution du diamètre le long de la racine	42
5.3.4.	Analyse en composantes principales des racines primaires	43
6.	Discussion.....	45
6.1.	Analyse des organes foliaires et racinaires.....	45
6.2.	Analyse des traits racinaires structurels	46
6.2.1.	Vitesse d'élongation.....	46
6.2.2.	Diamètre des racines	46

6.2.3.	Ramification de la racine principale	47
6.3.	Analyse des traits racinaires fonctionnels par modélisation	48
6.3.1.	Comparaison de la conductance totale du système racinaire	48
6.3.2.	Évolution de la conductance racinaire.....	49
6.3.3.	Intérêt de la modélisation	50
6.4.	Analyse des relations entre traits racinaires.....	50
6.4.1.	Indicateurs prédictifs de la vitesse d'élongation.....	50
6.4.2.	Évolution du diamètre le long de la racine	52
6.5.	Perspectives	53
7.	Conclusion	54
8.	Bibliographie.....	56
9.	Annexes	69
	Annexe A : Informations complètes sur les accessions utilisées	69
	Annexe B : Paramètres VueScan.....	70
	Annexe C : Macro utilisée dans ImageJ	71
	Annexe D : Paramètres d'entrée de CRootBox.....	72
	Annexe E : Résultats obtenus pour CRootBox	73

Liste des figures

Figure 1 - Tendances socio-économiques sur la période 1750 - présent (Longaretti, 2021)	2
Figure 2 - Origine génomique du blé tendre (Lobet, 2024)	5
Figure 3 - Pays producteurs de blé en 2023 (OurWorldinData, 2025)	6
Figure 4 - Origine des accessions de la Collection de blé tendre A.E. Watkins (Wingen et al., 2014)	9
Figure 5 - Nomenclature du système racinaire d'une monocotylédone (Lobet, 2024)	10
Figure 6 - Propriétés du système racine - sol (Lobet et al., 2014)	12
Figure 7 - Longueur de la zone apicale non ramifiée (LAUZ) (Willaume et Pagès, 2011)	16
Figure 8 - Relations entre le diamètre apical et le taux de croissance pour les 6 espèces différentes. (A) Musa, (B) Pisum sativum, (C) Prunus persica, (D) Teucrium botrys, (E) Thlaspi perfoliata, (F) Zea mays (Pagès et al., 2014)	17
Figure 9 - Relation entre le LAUZ et le taux d'élongation chez le maïs (Pellerin & Tabourel, 1995)	18
Figure 10 - Constituants d'un rhizotron et assemblage (Auteur inconnu, n.d.)	23
Figure 11 - Montage d'un rhizotron utilisé dans ce mémoire	23
Figure 12 - Disposition aléatoire des rhizotrons dans le phytotron	24
Figure 13 - Mesures de la croissance racinaire sur un transparent	25
Figure 14 - Numérisation des racines	26
Figure 15 - Sélection racinaire dans SmartRoot	26
Figure 16 - Amélioration du contraste et effet sur le diamètre	27
Figure 17 - Superposition des racines latérales	27
Figure 18 - Identification d'une racine latérale (en vert) par rapport aux autres racines pré- émergentes encore contenues dans l'épiderme	28
Figure 19 - Systèmes racinaires des variétés Archer, W0413, W0672 et W1042 (de gauche à droite) le dernier jour de l'expérimentation. À titre d'échelle, la membrane bleue sur la photo mesure 15 cm de largeur.	32
Figure 20 - Nombre de feuilles au 15ème jour pour chaque variété	33
Figure 21 - Nombre de racines séminales pour chaque variété	33
Figure 22 - Vitesse d'élongation moyenne des racines séminales (cm/jour) pour chaque variété	34
Figure 23 - Diamètre des racines séminales (cm) pour chaque variété	35
Figure 24 - Diamètre des racines latérales (cm) pour chaque variété	35

Figure 25 - LAUZ des racines séminales (cm) pour chaque variété.....	36
Figure 26 - Densité de ramification latérale des racines primaires (nb/cm) pour chaque variété. 36	
Figure 27 - Modélisation structurelle du système racinaire des variétés Archer (a), W0413 (b), W0672 (c) et W1042 (d) avec un temps de simulation de 15 jours.	38
Figure 28 - Conductance du système racinaire ($\text{cm}^3 \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$) pour chaque variété.....	39
Figure 29 - Évolution de la conductance du système racinaire (Krs) des variétés Précoc de Gembloux (rouge) et W0672 (bleu) allant de 1 à 61 jours.....	40
Figure 30 - Relation entre la croissance moyenne et le LAUZ des racines primaires.....	41
Figure 31 - Relation entre le diamètre moyen et la vitesse d'élongation des racines primaires	41
Figure 32 - Évolution du diamètre des racines séminales le long de la racine (0=base, 1=apex). 42	

Liste des tableaux

Tableau 1 - Accessions de la collection Watkins utilisées pour ce mémoire.....	21
Tableau 2 - Accessions de la collection INRAE utilisées pour ce mémoire	21
Tableau 3 - Paramètres de CRootBox estimés expérimentalement.....	30
Tableau 4 - Valeurs calculées des paramètres implémentés dans CRootBox de la variété Précoc de Gembloux (SE pour séminale ; Lat pour latérale)	37
Tableau 5 - Valeurs propres des composantes principales	43

Liste des abréviations

ACP – Analyse en composantes principales
Kr – Conductivité hydraulique radiale
Krs – Conductance totale du système racinaire
Kx – Conductance hydraulique axiale
IQR – Écart interquartile
LAUZ – Longueur de la zone apicale non ramifiée
Pdg – Précoc de Gembloux (Variété)

1. Introduction

Le dérèglement climatique bouleverse l'état actuel du monde. Son impact profond sur les ressources en eau entraîne des répercussions directes sur le secteur agricole, notamment l'augmentation de la fréquence des sécheresses (Cook et al., 2014). Il apparaît donc nécessaire de développer des stratégies d'adaptation renforçant la résilience des cultures. Dans cette optique, l'amélioration de l'acquisition d'eau et de nutriments par les systèmes racinaires pourrait jouer un rôle majeur dans cette transition vers des cultures plus résilientes (Wasson et al., 2012).

Parmi les cultures, le blé se distingue par sa place centrale dans la sécurité alimentaire mondiale. Il fournit environ 20 % des calories et des protéines consommées dans le monde (Asseng et al., 2015). Ses rendements pourraient toutefois diminuer d'environ 6 % par degré de réchauffement climatique (Erenstein et al., 2022). Cette situation menace la sécurité alimentaire de certaines régions du monde.

Face à ce risque, une approche prometteuse consiste à orienter la sélection variétale vers des cultivars dont le système racinaire est mieux adapté aux conditions environnementales spécifiques (Lynch, 2019). À cet égard, le réservoir génétique des *landraces* représente une ressource précieuse et encore largement sous-exploitée (Lopes et al., 2015). En effet, l'étude récente de Cheng *et al.* (2024) a montré que les variétés modernes n'exploitent qu'une faible partie de la diversité génétique présente dans les variétés anciennes de blé. Cette diversité offre pourtant un potentiel considérable pour améliorer les cultures et les adapter à des environnements variés (Lopes et al., 2015).

Le phénotypage des *landraces* constitue ainsi une étape essentielle pour identifier les traits racinaires favorables à l'adaptation aux stress (Cheng et al., 2024). En caractérisant leur diversité phénotypique, il devient possible d'orienter plus efficacement la sélection vers des idéotypes racinaires plus résilients.

Cependant, malgré les avancées méthodologiques récentes, l'étude des systèmes racinaires demeure limitée par la difficulté d'observer et d'analyser les racines *in situ*. Cette contrainte freine l'acquisition de données fiables, notamment pour les traits dynamiques (Pagès et al., 2010). Dans ce contexte, l'analyse des relations entre traits racinaires pourrait permettre de prédire certaines caractéristiques difficiles à mesurer à partir de traits plus accessibles.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire, qui s'intéresse à la diversité phénotypique des *landraces* ainsi qu'aux relations existantes entre traits racinaires.

2. État de l'art

2.1. Contexte général

2.1.1. La grande accélération

De tout temps, les êtres humains ont perturbé leur environnement pour s'y adapter et y survivre. Déforestation, chasse excessive et surpopulation localisée étaient déjà l'apanage de l'Homo erectus durant la préhistoire. Cependant, depuis les années 1950, l'altération de l'environnement par l'Homme n'a cessé de s'accélérer et de s'approfondir. Ce phénomène, désormais connu sous le nom de grande accélération (*great acceleration*), provoque des bouleversements sociaux et environnementaux d'une profondeur jamais égale.

La grande accélération désigne un ensemble de développements socio-économiques dont la croissance, depuis le début de l'ère industrielle, est devenue fulgurante (e.g. la population totale, le PIB réel, la consommation d'énergie primaire, la consommation d'engrais, etc.) (Steffen et al., 2015).

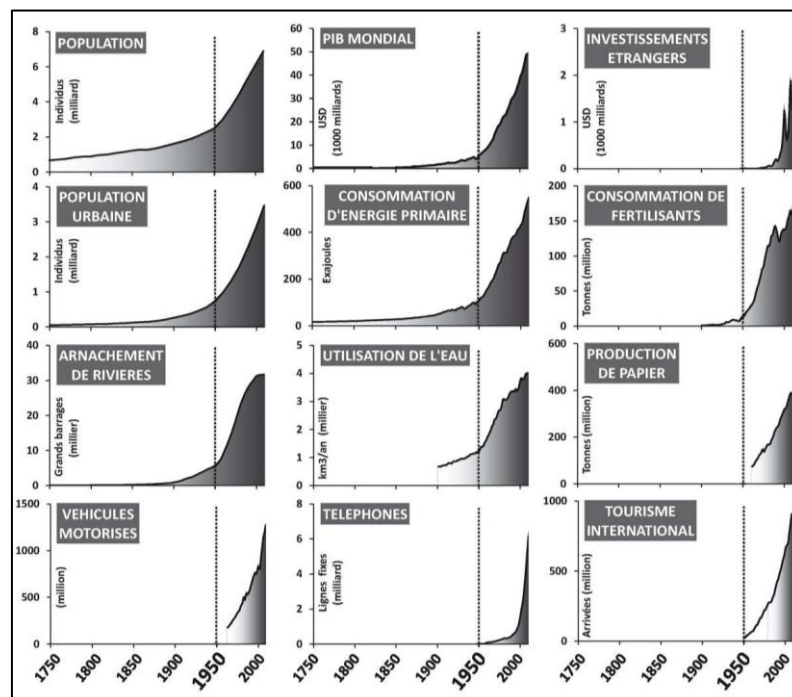


Figure 1 - Tendances socio-économiques sur la période 1750 - présent
(Longaretti, 2021)

2.1.2. Répercussions sur le système Terre

Ces bouleversements sociétaux engendrent leur lot de répercussions sur le système Terre : augmentation significative de la concentration de gaz à effet de serre, acidification des océans, extinction massive du vivant et hausse de la température terrestre (IPCC et al., 2023; Ripple et al., 2024; WWF et al., 2024). Selon le dernier rapport annuel de l'Organisation météorologique mondiale, cette hausse des températures globales a atteint, en 2024, un niveau record de plus de

1,5°C par rapport à l'époque préindustrielle (WMO, 2025). Si la trajectoire actuelle reste inchangée, cette hausse devrait atteindre un pic de +3,1°C d'ici la fin du siècle (UNEP, 2024).

Le réchauffement de l'atmosphère terrestre a de nombreuses incidences telles que l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, la fonte des glaciers et l'extinction d'espèces (IPCC et al., 2023). De plus, cette hausse des températures affecte profondément les ressources en eau à l'échelle mondiale. Par exemple, le dérèglement climatique devrait augmenter la fréquence des sécheresses et l'intensité des précipitations au cours du XXI^e siècle (Cook et al., 2014; Pendergrass & Hartmann, 2014).

2.1.3. Conséquences agricoles et adaptations

Ces modifications majeures du cycle de l'eau ont des répercussions profondes sur la société humaine, et particulièrement sur le secteur de la production agricole. Elles engendrent une instabilité croissante des systèmes de production, marqués par des pertes de récolte plus nombreuses et une baisse généralisée des rendements (Hatfield et al., 2011). Par conséquent, ces fluctuations menacent la sécurité alimentaire de certaines régions du monde (Wheeler & von Braun, 2013).

Pour maintenir la viabilité de la production alimentaire dans un système traversé par de profondes perturbations, le secteur agricole a besoin de devenir plus robuste face aux aléas climatiques et de renforcer sa capacité d'adaptation. Plusieurs leviers complémentaires peuvent être mobilisés pour y parvenir : améliorer l'efficacité de l'utilisation et du transport de l'eau, adapter le calendrier ou l'emplacement des cultures ou encore introduire de nouvelles variétés plus tolérantes aux stress abiotiques (Howden et al., 2007).

2.2. Le blé

2.2.1. L'importance du blé

Depuis des millénaires, les céréales constituent un pilier fondamental de l'alimentation humaine, jouant un rôle structurant dans l'organisation des sociétés (Maqbool et al., 2022). Elles ont notamment permis de fournir une base alimentaire stable aux populations préhistoriques, favorisant ainsi l'émergence des premières civilisations. Aujourd'hui, plus de 50 % des apports caloriques journaliers dans le monde proviennent de leur consommation (Sarwar, 2013).

Parmi ces céréales, le blé se distingue comme la source alimentaire principale à l'échelle mondiale (Igrejas & Branlard, 2020). Il joue un rôle central dans la nutrition humaine, représentant environ 20 % des calories et des protéines consommées dans le monde (Erenstein et al., 2022).

Le blé est utilisé de multiples façons en fonction de sa destination finale. La majeure partie du blé récolté est moulue en farine, destinée à diverses préparations alimentaires. La mouture génère également des coproduits, tels que le son, valorisés principalement dans l'alimentation animale. Enfin, le blé peut aussi être utilisé pour la production d'amidon ou la fabrication de bioéthanol.

Le blé occupe actuellement la première place mondiale en termes de surface cultivée devant le maïs et le riz (FAO, 2023). En 2023, la production globale s'élevait à 799 millions de tonnes, soit une augmentation de 225 % en 50 ans (FAO, 2023). Cette progression s'explique par deux facteurs principaux : une large extension des surfaces cultivées et une amélioration significative des rendements, atteignant aujourd'hui jusqu'à 12 t/ha. Cette hausse de productivité est principalement liée à l'amélioration génétique des cultivars, à une utilisation accrue des fertilisants et à l'optimisation des pratiques agricoles (Feldman & Levy, 2023).

Les cinq principaux producteurs de blé sont, dans l'ordre décroissant, la Chine, l'Union européenne, l'Inde, la Russie et les États-Unis (FAO, 2023).

Face à la croissance démographique, la demande mondiale en blé devrait augmenter de 60 % d'ici 2050 (Tadesse et al., 2017). La production, quant à elle, devrait être affectée par le dérèglement climatique. Les estimations suggèrent une diminution de 6 % de la production mondiale pour chaque degré Celsius supplémentaire de réchauffement (Asseng et al., 2015).

2.2.2. Taxonomie du blé

Le terme blé désigne l'ensemble des espèces appartenant au genre *Triticum*. Il inclut notamment le froment (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*), le blé dur (*Triticum durum*) ainsi que d'autres espèces comme l'épeautre (*Triticum aestivum* subsp. *spelta*).

La grande majorité des cultivars modernes correspond au froment qui représente près de 95 % du blé cultivé dans le monde (Mastrangelo & Cattivelli, 2021). Le froment est également connu sous le nom de blé tendre ou de blé panifiable. Compte-tenu de la prépondérance de l'espèce froment, c'est l'étude de celle-ci qui sera privilégiée dans le cadre du présent travail.

Le froment est une graminée monocotylédone annuelle appartenant à la famille des Poaceae et à la sous-famille des Pooideae.

Il est apparu il y a environ 9 000 ans (Shewry, 2009). Cette espèce hexaploïde résulterait de deux événements successifs d'allopolyploïdisation : d'abord, une tétraploïdisation consécutive à l'hybridation entre *Triticum urartu* Tumanian ex Gandilyan (AA) et *Aegilops speltoides* Tausch (BB); ensuite, une hexaploïdisation par croisement avec *Aegilops tauschii* Coss (DD), un diploïde sauvage (Feldman & Levy, 2009; Pont et al., 2019).

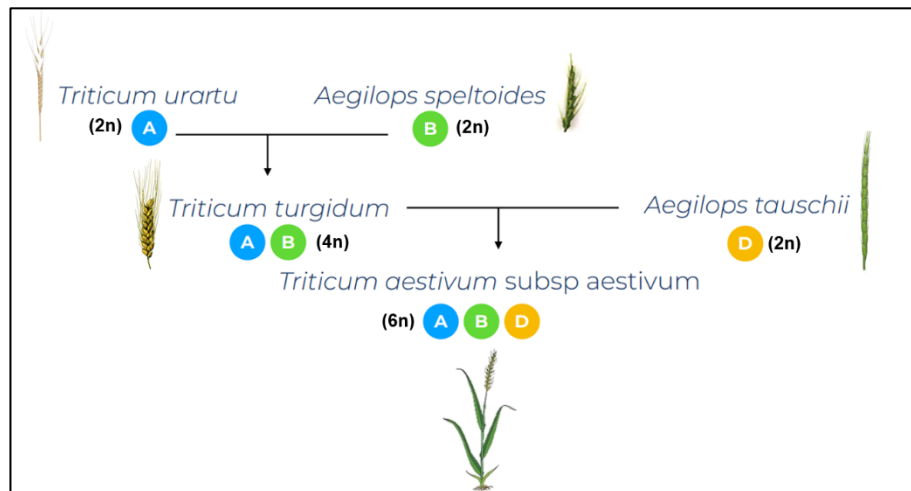


Figure 2 - Origine génomique du blé tendre (Lobet, 2024)

Le froment se caractérise par un rendement élevé, une grande adaptabilité à des conditions climatiques variées ainsi que de bonnes qualités nutritionnelles. En effet, le grain de froment contient la plupart des nutriments essentiels aux humains. Il contient des glucides (70-80 %), des protéines (8-15 %), des graisses (1,5-2 %), des minéraux (1,5-2 %) et des vitamines (Feldman & Levy, 2023). Le froment possède également une teneur élevée en gluten dans son endosperme, ce qui le rend particulièrement adapté à la fabrication du pain. Enfin, sa faible teneur en eau facilite le transport et le stockage à long terme, ce qui en fait une culture particulièrement bien adaptée aux filières agroalimentaires (Feldman & Levy, 2023).

Les cultivars de froment se répartissent en deux grandes catégories selon leur besoin en vernalisation avant la floraison : les variétés d'hiver et les variétés de printemps. Les variétés d'hiver nécessitent une exposition au froid pendant 6 à 12 semaines (Simmonds et al., 2025). Pour répondre à cette exigence, elles sont généralement semées entre octobre et novembre. À l'inverse, les variétés de printemps n'ont pas besoin de vernalisation et tolèrent moins bien les basses températures. Elles sont généralement semées entre février et avril. Dans le cadre de ce mémoire, le froment d'hiver est étudié.

Le blé dur (*Triticum durum*) constitue la deuxième espèce de blé la plus cultivée. Il s'agit d'un blé tétraploïde (AABB). Il se distingue par des grains vitreux riches en protéines. Sa teneur en gluten est plus faible, ce qui en fait la matière première idéale pour la production de pâtes, de pains plats et de semoule. Il est principalement cultivé dans des environnements semi-arides, en particulier dans les régions méditerranéennes, l'Australie, l'Inde et la Russie. (Feldman & Levy, 2023; Mastrangelo & Cattivelli, 2021).

2.2.3. Répartition géographique du froment

Le froment est une céréale originaire du Croissant Fertile. Il s'agit de la première espèce céréalière à avoir été domestiquée au Moyen-Orient (Charmet, 2011).

Le froment présente un rendement élevé dans un large éventail d'environnements, s'étendant de 67°N dans le nord de l'Europe à 45°S en Argentine (Feldman & Levy, 2023). Cette large distribution géographique s'explique par sa capacité à tolérer une grande diversité de températures et de conditions hydriques (Awika, 2011).

Cette adaptabilité s'appuie sur une diversité de cultivars sélectionnés dans des environnements spécifiques. L'une des principales stratégies intrinsèques d'adaptation du blé repose sur la variation de sa phénologie ainsi que de certains traits morphologiques, notamment ceux qui influencent l'architecture de la plante (Hyles et al., 2020).

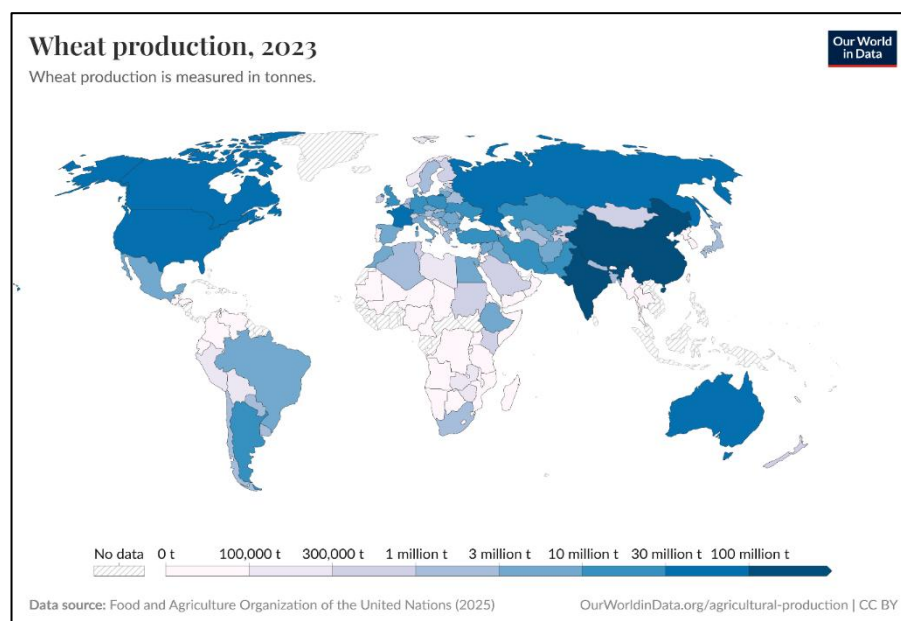


Figure 3 - Pays producteurs de blé en 2023 (OurWorldinData, 2025)

2.3. Diversité végétale

2.3.1. Notions de diversité végétale

La diversité des plantes cultivées peut être appréhendée à travers plusieurs niveaux complémentaires en fonction des critères retenus. On distingue généralement trois grands types de diversité, interdépendants les uns des autres.

Tout d'abord, la diversité écologique, qui s'intéresse à la composition et à la diversité des communautés végétales coexistant dans un même écosystème. Ensuite, la diversité spécifique, qui désigne le nombre d'espèces différentes présentes dans un milieu donné. Enfin, la diversité intraspécifique, qui correspond aux variations existant entre individus au sein d'une même espèce (MNHN, 2025).

Cette diversité intraspécifique peut être abordée selon deux dimensions. Elle est dite génétique lorsqu'elle renvoie à la variabilité des génomes entre individus. Elle est dite phénotypique quand elle s'exprime par des différences observables dans les traits morphologiques, physiologiques ou comportementaux des plantes. Un lien étroit mais complexe unit ces deux dimensions. Selon la compréhension actuelle, le phénotype résulte de l'interaction dynamique entre de multiples gènes et une diversité de facteurs environnementaux (Orgogozo et al., 2015).

2.3.2. L'évolution de la diversité du froment

La diversité des blés cultivés a connu de profondes transformations au cours des 10 000 dernières années.

Dans un premier temps, la domestication de l'amidonniér sauvage (*Triticum dicoccoides*), l'ancêtre de tous les blés cultivés, suivie par la sélection du blé dur et du blé panifiable, a entraîné une réduction considérable de leur diversité génétique (Jaradat, 2013). D'après Jaradat (2013), le processus de domestication aurait conduit à une perte de diversité estimée à 84 % pour le blé dur et 69 % pour le blé tendre.

Par la suite, la base génétique du blé s'est progressivement enrichie sous l'effet combiné de la sélection naturelle et des pratiques agricoles traditionnelles (Feldman & Levy, 2023; Jaradat, 2013). Par exemple, les agriculteurs traditionnels cultivaient souvent un mélange de génotypes au sein d'un même champ, ce qui favorisait l'hybridation et l'introgression de gènes entre individus (Feldman & Levy, 2023).

Ces pratiques, associées à la capacité d'autopollinisation du blé, ont facilité l'émergence et la sélection progressive de génotypes localement adaptés, contribuant à une diversification génétique importante (Feldman & Levy, 2023). C'est comme cela qu'ont émergé les *landraces* : des variétés traditionnellement cultivées, génétiquement diverses, qui se sont adaptées localement aux conditions climatiques, pédologiques et culturelles spécifiques.

Ensuite, à partir de la fin du XIX^e siècle, l'essor de l'amélioration génétique des plantes a profondément transformé les systèmes de culture. Des cultivars modernes à haut rendement ont progressivement été développés et diffusés, conduisant à des champs de blé génétiquement

uniformes. Cette transition vers des monocultures de géotypes purs, plus productives mais moins diversifiées, s'est accompagnée d'une érosion génétique importante (Feldman & Levy, 2023).

Jaradat (2013) estime que jusqu'à 75 % de la diversité génétique des plantes cultivées, y compris le blé, a disparu au cours du siècle dernier, sous l'effet du remplacement de nombreuses variétés locales par des cultivars performants adaptés à des conditions et à des caractéristiques agronomiques spécifiques ainsi que de l'appauvrissement de la base génétique utilisée pour la sélection (McGrail & McNear, 2021). L'adoption massive du blé semi-nain illustre bien ce phénomène : environ 70 % des cultivars de blé d'hiver cultivés aujourd'hui présentent ce phénotype (Evans, 1998).

Or, cette perte de diversité génétique constitue un enjeu préoccupant, particulièrement à la lumière des changements climatiques actuels et des fluctuations environnementales croissantes (Feldman & Levy, 2023).

La perte de diversité génétique compromet la conservation de nombreux traits d'intérêt, en particulier ceux liés à la qualité nutritionnelle, à la résistance aux maladies et à la tolérance aux stress biotiques et abiotiques (Feldman & Levy, 2023; Jaradat, 2013).

2.3.3. Potentiel des *landraces*

Pour faire face à l'érosion génétique constatée chez les cultivars modernes et identifier des traits favorables à l'adaptation aux stress, le réservoir génétique des variétés de pays (*landraces*) constitue une ressource importante et encore largement sous-exploitée (Lopes et al., 2015).

Une étude récente de Cheng *et al.* (2024) met en évidence ce potentiel. En re-séquençant l'ensemble des génomes de la collection de blés anciens de Watkins, les auteurs ont mis en évidence une structure génétique riche composée de sept groupes ancestraux distincts. Afin de retracer l'origine génétique des blés modernes, ils ont également séquencé 208 cultivars issus de 25 pays, représentatifs de la diversité variétale actuelle, puis comparé leur profil génétique à celui des Watkins. Cette analyse a révélé que les blés modernes ne dérivent que de deux de ces groupes, laissant ainsi de côté une vaste portion de diversité génétique encore inexploitée mais précieuse pour l'amélioration variétale.

Cette diversité génétique présente chez les *landraces* se traduit notamment par une résilience accrue aux variations environnementales ainsi qu'une combinaison de traits morpho-physiologiques favorisant l'adaptabilité. À ce titre, les *landraces* se révèlent souvent mieux adaptées que les variétés modernes face aux stress abiotiques (Jaradat, 2013).

Leur intégration dans les programmes d'amélioration constitue ainsi une stratégie pertinente pour développer de nouvelles variétés à la fois productives et plus stables, notamment dans un contexte de variabilité climatique croissante (Cheng et al., 2024; Jaradat, 2013).

Pour réhabiliter cette diversité génétique longtemps négligée, les collections de *landraces* de blé constituent un patrimoine précieux. Plusieurs collections ont été établies à travers le monde, parmi lesquelles la collection de blé tendre d'Europe centrale (Cseh et al., 2021), la collection espagnole de blé tendre (Pascual et al., 2020), ou encore la collection de *landraces* de blé tendre d'A.E. Watkins (Wingen et al., 2014). Établie dans les années 1930, cette collection particulièrement diversifiée sur les plans phénotypique et génétique regroupe 826 accessions provenant de différentes régions du monde (Figure 4) (Wingen et al., 2014). Cette collection a notamment été mobilisée dans le cadre de ce mémoire ainsi que dans l'étude de Cheng *et al.* (2024).

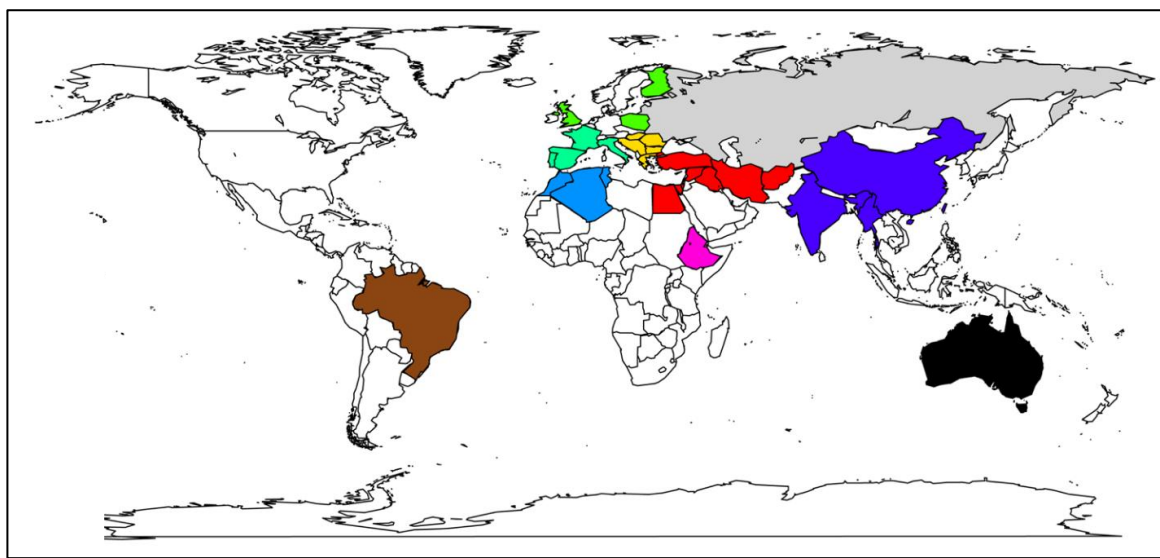


Figure 4 - Origine des accessions de la Collection de blé tendre A.E. Watkins (Wingen et al., 2014)

En complémentarité des *landraces*, les espèces sauvages apparentées au blé (*wild wheat relatives*), appartenant au genre *Triticeae*, offrent également des opportunités intéressantes pour enrichir le patrimoine génétique des cultivars. L'exploitation de ce matériel génétique élargi représente aujourd'hui l'une des meilleures options disponibles pour répondre aux besoins futurs en matière de rendement, tout en renforçant la résilience génétique des variétés cultivées (Feldman & Levy, 2023).

2.4. Architecture racinaire du froment

Les racines jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus vitaux pour les plantes. Elles permettent l'absorption de l'eau et des nutriments ainsi que l'ancrage et le soutien mécanique de la plante. De plus, elles assurent également une fonction de stockage et sont l'interface entre la plante et la rhizosphère (Smith & De Smet, 2012).

Malgré cela, le système racinaire a souvent été négligé dans les programmes de sélection variétale. Cela s'explique par la difficulté pratique d'examiner la « partie cachée » de la plante (Ober et al., 2021). En effet, les racines sont des organes fins et fragiles et sont intimement ancrées dans un sol opaque, cohésif et dense (Pagès et al., 2010). Par conséquent, la diversité des systèmes racinaires demeure encore largement méconnue.

Or, une meilleure compréhension du système racinaire pourrait améliorer la productivité des cultures, notamment en augmentant l'efficacité d'utilisation des ressources, et renforcer la tolérance des plantes aux stress abiotiques et biotiques grâce à la sélection végétale et à des pratiques innovantes de gestion des cultures (Bishopp & Lynch, 2015; Collet, 2022; Lynch, 2022; Wasaya et al., 2018).

L'architecture du système racinaire englobe la forme et l'agencement spatial du système racinaire d'une plante dans le sol, déterminant ainsi sa capacité à l'explorer de manière efficace (P. Pais et al., 2022). Elle résulte des interactions entre des processus de croissance endogènes génétiquement déterminés et des contraintes exogènes imposées par l'environnement (Takahashi & Pradal, 2021).

2.4.1. Topologie du système racinaire

L'architecture du système racinaire peut être décrite comme une organisation d'une racine primaire, de racines séminales, de racines nodales et de leurs racines latérales (Figure 5) (Zobel & Waisel, 2010).

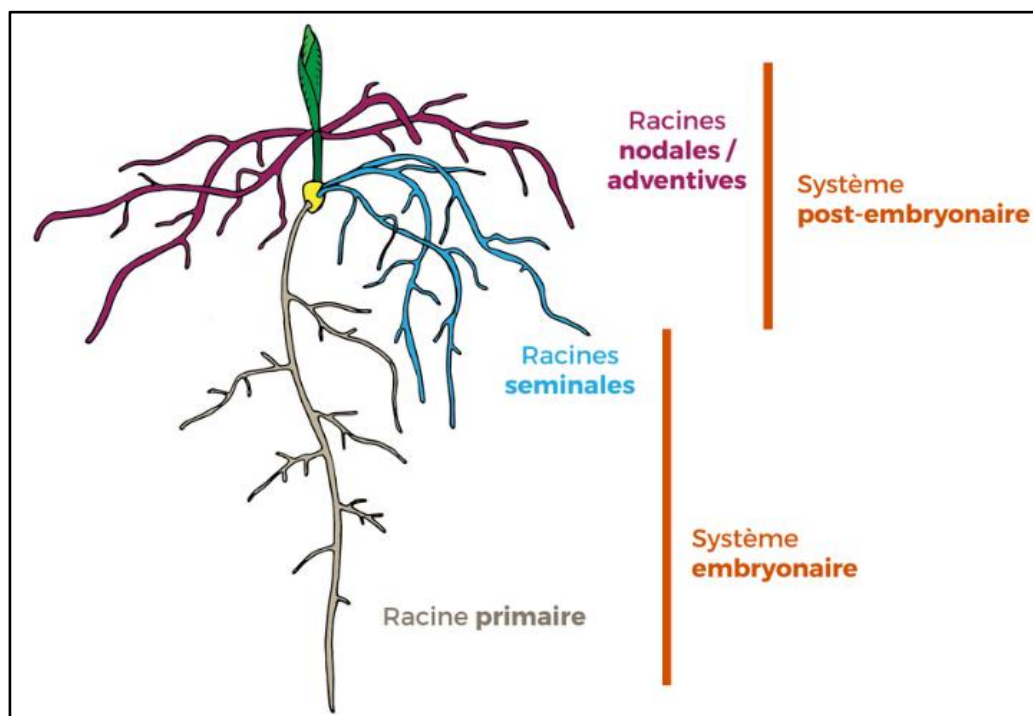


Figure 5 - Nomenclature du système racinaire d'une monocotylédone (Lobet, 2024)

Ces racines sont classées en deux catégories : les racines embryonnaires, qui émergent de la graine, et les racines post-embryonnaires (Cope et al., 2024).

Le système embryonnaire est composé de la racine primaire, qui est la première racine émergente, et des racines séminales. Elles jouent un rôle fondamental dans le développement juvénile des plantes, en assurant l'acquisition précoce de l'eau et des nutriments. Le nombre de racines embryonnaires chez le froment est généralement compris entre 3 et 7, et maximum 10 (Collet, 2022).

Le système post-embryonnaire se compose des racines nodales. Ce sont des racines adventives émergentes des nœuds de la tige du blé, formant l'essentiel du système racinaire mature. Elles apparaissent généralement lorsque la quatrième feuille du froment apparaît (Kirby, 2002).

Chacune de ces deux catégories présente en outre des racines latérales, soit des racines qui se développent à partir des racines déjà existantes. Cette ramification joue un rôle crucial en augmentant la surface du système racinaire, ce qui permet à la plante d'exploiter des réserves d'eau et de nutriments situées à distance et d'améliorer son ancrage dans le sol (Smith & De Smet, 2012). Les racines séminales et nodales peuvent développer jusqu'à trois niveaux de racines latérales (Ober et al., 2021).

De plus, à une échelle microscopique, les racines possèdent des poils absorbants qui favorisent l'absorption de l'eau et des nutriments (Smith & De Smet, 2012).

2.5. La prise d'eau par la plante

2.5.1. Les flux hydriques dans la plante

L'eau est un élément vital pour la croissance et le bon fonctionnement des plantes. Elle joue un rôle central dans de nombreux processus physiologiques, notamment la photosynthèse, qui permet aux plantes de convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique indispensable à leur survie.

Les flux hydriques dans les plantes reposent sur un mécanisme passif entraîné par des différences de potentiel hydrique entre les différents compartiments du système sol-plante-atmosphère. La circulation de l'eau est régulée par la conductivité hydraulique de chaque interface qui détermine la facilité avec laquelle l'eau peut s'y déplacer (Lobet et al., 2014).

Le transport de l'eau s'effectue selon le mécanisme de cohésion-tension (Steudle, 2001). Ce mécanisme fonctionne comme suit : l'eau s'évapore sous forme de vapeur à travers les stomates des feuilles, ce qui provoque une perte d'eau au niveau des tissus internes et une augmentation de la tension dans le xylème foliaire. Cette tension est transmise vers le bas, le long de la colonne d'eau continue dans le xylème, jusqu'aux racines selon le principe de cohésion - tension. Lorsque la tension dans la plante devient plus importante que le potentiel hydrique du sol, un flux d'eau est induit depuis le sol vers les racines (Lobet et al., 2014).

2.5.2. L'absorption de l'eau

L'absorption de l'eau est le point de départ des flux hydriques au sein d'une plante. Ce processus se décompose en trois grands composants (Figure 6).

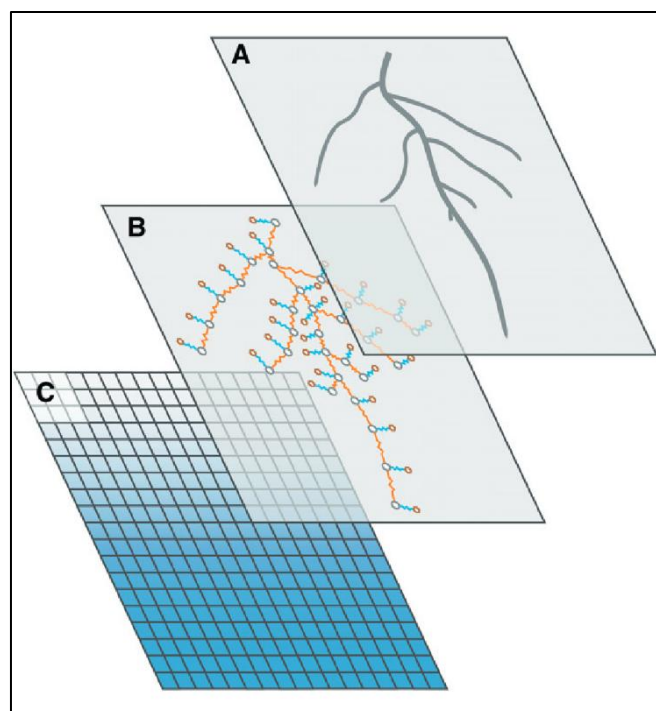


Figure 6 - Propriétés du système racine - sol (Lobet et al., 2014)

Premièrement, la géométrie spatiale du système racinaire est un facteur clé pour l'accès à l'eau car elle détermine l'étendue du sol exploré par la plante (Figure 6a). Plus les racines sont bien réparties, plus le volume de sol pouvant fournir de l'eau est important (Lobet et al., 2014).

Deuxièmement, l'architecture hydraulique racinaire joue également un rôle majeur (Figure 6b). Chaque segment de racine possède des propriétés hydrauliques propres, telles que la conductance axiale (K_x , représentée en orange) et la conductivité radiale (K_r , en bleu). Ces paramètres influencent la conductance globale du système racinaire et la répartition de l'absorption d'eau dans le sol. Cela crée des zones préférentielles d'absorption, réparties de manière hétérogène dans le profil racinaire. Ces zones se situent généralement à quelques centimètres derrière l'apex racinaire, là où les xylèmes sont fonctionnels et où les structures hydrophobes ne sont pas encore formées (Lobet et al., 2014). Des traits structurels peuvent également influencer ces propriétés hydrauliques. Par exemple, Heymans *et al.* (2022) ont mis en évidence la forte influence du rayon racinaire sur la conductivité radiale.

Troisièmement, la distribution et la quantité d'eau absorbée dépendent aussi fortement de la répartition de l'eau dans le sol lui-même (Figure 6c). L'eau disponible pour la plante est influencée par l'humidité locale du sol, ce qui définit la réserve utile en eau que les racines peuvent réellement capter (Lobet et al., 2014).

2.6. Construction du système racinaire

La construction du système racinaire peut être divisée en trois grandes étapes successives. L'ensemble de ces processus est régulé hormonalement et dépend étroitement des conditions environnementales.

Premièrement, il y a la création des axes racinaires principaux. Des racines émergent soit directement de la graine, soit à partir d'autres organes. Contrairement aux dicotylédones, plusieurs axes primaires se développent chez les monocotylédones et ces axes ne présentent pas de croissance secondaire (Lobet, 2025).

Deuxièmement, ces axes racinaires croissent à partir de leur apex. Cette croissance est assurée par le méristème apical, une région située à l'extrémité des racines, constituée de cellules indifférenciées. C'est par la division de ces cellules que la racine s'allonge (Lobet, 2025). La croissance racinaire est dite indéterminée, ce qui signifie que le système racinaire continue de se développer tout au long de la vie de la plante. Par ailleurs, l'élongation racinaire est dirigée par différents tropismes, qui sont classés selon la nature du stimulus. Il existe par exemple le gravitropisme, en réponse à la gravité, l'hydrotropisme, en direction des sources d'eau, et le chemotropisme, vers les nutriments (Lobet, 2025). Ces mécanismes tropiques jouent un rôle central dans la capacité d'exploration efficace du sol. En ajustant la direction de croissance des racines selon les conditions locales, ils permettent à la plante d'optimiser l'acquisition des ressources sans dépenses énergétiques inutiles (Izzo & Aronne, 2021).

Troisièmement, des axes secondaires se forment. La production de racines latérales suit un schéma acropétale, c'est-à-dire que le développement progressif s'effectue de la base vers le sommet de l'axe (Lobet, 2025). La ramification racinaire est un processus essentiel, car elle contribue à l'ancrage mécanique de la plante tout en augmentant le volume de sol exploré, améliorant ainsi l'accès aux ressources (J. A. Atkinson et al., 2014).

Le développement du système racinaire varie selon les génotypes et présente une forte plasticité. En effet, la plante adapte son système racinaire en fonction des conditions du sol en modifiant sa croissance et ses ramifications (Lynch, 2012). Cette plasticité implique que l'architecture racinaire est fortement influencée par le type de substrat, les interactions avec la rhizosphère, les conditions environnementales ainsi que par le statut physiologique de la plante elle-même. Cette propriété confère aux plantes une meilleure capacité d'adaptation à leur environnement, mais rend l'étude et la compréhension du système racinaire d'autant plus complexe (Collet, 2022).

2.7. Idéotype racinaire

La sélection variétale a traditionnellement reposé sur deux approches principales : l'élimination des individus défectueux (*defect elimination*) et la sélection directe pour le rendement (*selection for yield*). En complément de ces stratégies, Donald (1968) a introduit une approche innovante consistant à sélectionner des plantes présentant un ensemble de caractéristiques morpho-physiologiques idéales pour un environnement donné. Ce concept, désormais bien établi, est connu sous le nom d'idéotype et peut s'appliquer aux systèmes racinaires (Donald, 1968).

Identifier et caractériser ces idéotypes permet de mieux cibler les traits racinaires à sélectionner dans le cadre de l'amélioration variétale. Toutefois, cet objectif est loin d'être évident. En effet, les idéotypes racinaires varient selon l'objectif visé et les scénarios environnementaux envisagés (Tardieu et al., 2017).

Différents idéotypes ont déjà été proposés dans la littérature. Les plus populaires ont été formulés par Lynch et se caractérisent différemment selon la ressource à cibler :

- L'idéotype "*Topsoil foraging*" est conçu pour maximiser l'absorption des nutriments peu mobiles, comme le phosphore, présents dans les couches superficielles du sol. Il se caractérise par un grand nombre de racines axiales, une forte densité de racines latérales et une abondance de poils absorbants (Lynch, 2019).
- L'idéotype "*Steep, cheap and deep*" vise à optimiser l'accès aux ressources mobiles, comme l'eau ou l'azote, situées plus en profondeur (Lynch, 2013). Il repose sur des racines longues à faible coût énergétique, avec des angles d'insertion prononcés, un faible nombre de racines nodales, une densité latérale réduite et une plasticité architecturale limitée (Lynch, 2019).

Wasson *et al.* (2012) ont également mis en évidence plusieurs traits racinaires susceptibles d'améliorer la capacité du froment à absorber l'eau lorsqu'elle est disponible. Parmi ceux-ci, on retrouve notamment un enracinement plus profond, une densité racinaire accrue dans les couches moyennes et profondes du sol, mais réduite en surface, ainsi qu'une croissance accrue des poils absorbants et une augmentation du diamètre des vaisseaux du xylème (Wasson et al., 2012).

La sélection d'idéotypes racinaires doit toutefois être adaptée aux contraintes propres à chaque environnement (Wasson et al., 2012). En effet, il est peu probable qu'un seul génotype ou qu'une combinaison fixe de traits soit optimale dans toutes les situations. Les stratégies de sélection doivent donc être spécifiquement conçues pour répondre aux conditions environnementales et aux contextes de production visés (Bernardo et al., 2025).

Dans cette optique, l'identification d'idéotypes pertinents repose sur l'analyse fine des traits racinaires individuels et de leur comportement face aux stress biotiques et abiotiques (Bagale et al., 2025).

2.8. Traits racinaires

Les traits racinaires sont des caractéristiques mesurables qui peuvent varier entre les plantes (Bagale et al., 2025). De nombreux traits racinaires peuvent être étudiés pour mieux comprendre les mécanismes structurels et fonctionnels du système racinaire.

Les traits racinaires peuvent être classés en traits structurels, correspondant aux caractéristiques architecturales des racines, et en traits fonctionnels, qui reflètent leurs capacités de fonctionnement. Ces deux catégories de traits sont intrinsèquement liées : un trait structurel, tel que le diamètre racinaire, peut directement influencer certains traits fonctionnels.

2.8.1. Traits structurels

Les traits structurels peuvent présenter des niveaux de complexité variables pour leur mesure. Certains peuvent être évalués ponctuellement de manière relativement simple, tandis que d'autres nécessitent un suivi dynamique, ce qui rend l'acquisition des données plus contraignante. Dans de nombreux cas, le temps disponible ou les limitations matérielles peuvent restreindre la capacité à effectuer ces mesures.

Mesures statiques

Diamètre racinaire

Le diamètre des racines constitue un trait fondamental, à la fois pour la structuration du système racinaire et pour sa fonctionnalité, notamment en matière de prise d'eau.

Il s'agit d'un trait plastique, influencé par des facteurs environnementaux tels que la structure du sol, la température ou la disponibilité en eau et en nutriments. (Rich & Watt, 2013).

Le diamètre racinaire représente un paramètre clé conditionnant l'efficacité hydraulique et la capacité d'absorption d'eau du système racinaire. Selon Heymans et al. (2022), le rayon racinaire est le trait ayant l'impact le plus marqué sur l'absorption d'eau des phénotypes *in silico* chez le maïs, surpassant l'activité des aquaporines et le développement de la barrière apoplastique.

De plus, le diamètre est directement lié à l'investissement en biomasse de la plante dans ses racines. En effet, à longueur égale, la biomasse d'un segment racinaire varie en proportion du carré de son diamètre. Ainsi, à investissement équivalent, une plante peut développer une plus grande longueur totale de racines en produisant des racines plus fines (Q. Wu et al., 2016).

Enfin, le diamètre est fréquemment assumé constant depuis son émergence tout au long du développement racinaire (Q. Wu et al., 2016). Cette hypothèse pourrait toutefois s'avérer incorrecte. De fait, certaines études démontrent une fluctuation du diamètre apical durant l'élongation. J. Wu *et al.* (2015) ont démontré que le diamètre décroît de manière acropétale chez le maïs.

Longueur racinaire

La longueur racinaire est l'un des traits les plus couramment étudiés. Elle reflète notamment le coût économique associé au développement du système racinaire (Ryser, 2006). Ce trait joue un rôle essentiel car il détermine en grande partie le volume de sol exploité par la plante, et donc son potentiel d'absorption en eau et en nutriments. Par ailleurs, la longueur racinaire constitue souvent la base de nombreux calculs fonctionnels, en particulier dans les modèles de croissance ou d'absorption (D. Atkinson, 2000).

LAUZ

La longueur de la zone apicale non ramifiée (LAUZ) correspond à la distance séparant l'extrémité de la racine du point d'émergence de la dernière racine latérale (Gao et al., 2015). De nombreux modèles racinaires supposent que les racines latérales apparaissent à une distance constante derrière la pointe racinaire. Dans ce cadre, la LAUZ est considérée comme constante (Pellerin & Tabourel, 1995).

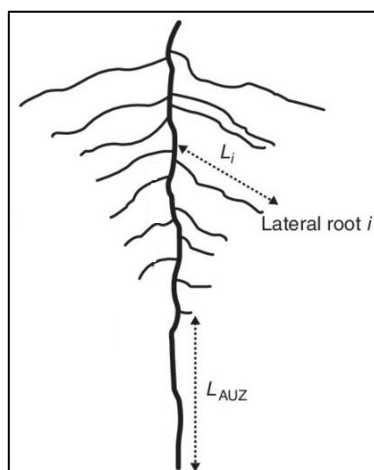


Figure 7 - Longueur de la zone apicale non ramifiée (LAUZ)
(Willaume et Pagès, 2011)

Nombre de racines

Ce paramètre permet d'estimer le volume racinaire et donne une indication sur la capacité de production hormonale du système racinaire (D. Atkinson, 2000). Pour une monocotylédone, le calcul peut être réalisé sur les racines séminales, les racines nodales ou encore les latérales.

Densité de ramification latérale

La densité de ramification latérale est également un trait racinaire important. Il détermine l'intensité de l'exploitation du sol par la plante (D. Atkinson, 2000). Il est possible qu'elle soit liée au diamètre des racines. Cependant, cette relation entre ramification et diamètre reste incertaine, avec des résultats contradictoires selon les études (Chang'a et al., 2021). Un lien entre le gène codant pour la densité de racines latérales et la croissance racinaire a tout de même été observé expérimentalement (Placido et al., 2020).

Mesures dynamiques

Vitesse d'élongation racinaire

La vitesse d'élongation correspond à l'augmentation de la longueur d'une racine individuelle au cours du temps. Elle constitue un trait essentiel dans de nombreux modèles racinaires car elle permet d'analyser de manière dynamique la construction des systèmes racinaires.

Différentes méthodes de mesure de l'élongation racinaire existent, mais elles sont souvent imparfaites. La plus couramment employée est celle des rhizotrons, qui repose sur l'observation continue des racines à travers une paroi transparente placée contre le sol (Pagès et al., 2010).

Une autre approche consiste à estimer la vitesse d'élongation à partir d'indicateurs morphologiques prédictifs, c'est-à-dire de traits racinaires présentant une forte corrélation avec cette vitesse (Pagès et al., 2010).

Parmi ces indicateurs prédictifs, le diamètre est fréquemment cité. Par exemple, Pagès *et al.* (2014) ont mis en avant une tendance presque linéaire entre le diamètre apical et la vitesse d'élongation pour différentes variétés (Figure 8).

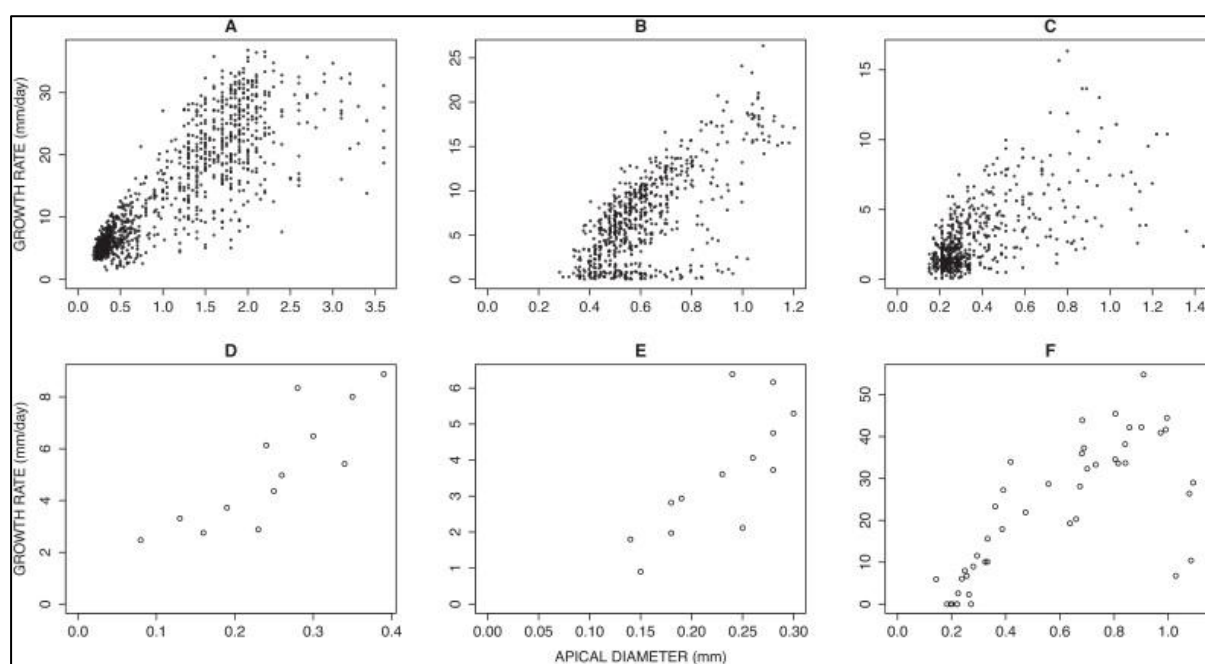


Figure 8 - Relations entre le diamètre apical et le taux de croissance pour les 6 espèces différentes. (A) *Musa*, (B) *Pisum sativum*, (C) *Prunus persica*, (D) *Teucrium botrys*, (E) *Thlaspi perfoliata*, (F) *Zea mays* (Pagès et al., 2014)

Un autre indicateur prédictif potentiel est la LAUZ. Différentes études semblent s'accorder sur la corrélation entre la longueur de la zone apicale non ramifiée et la vitesse d'élongation (Pagès et al., 2010). Par exemple, Pellerin et Tabourel (1995) ont démontré une forte corrélation positive entre ces deux traits chez le maïs (Figure 9).

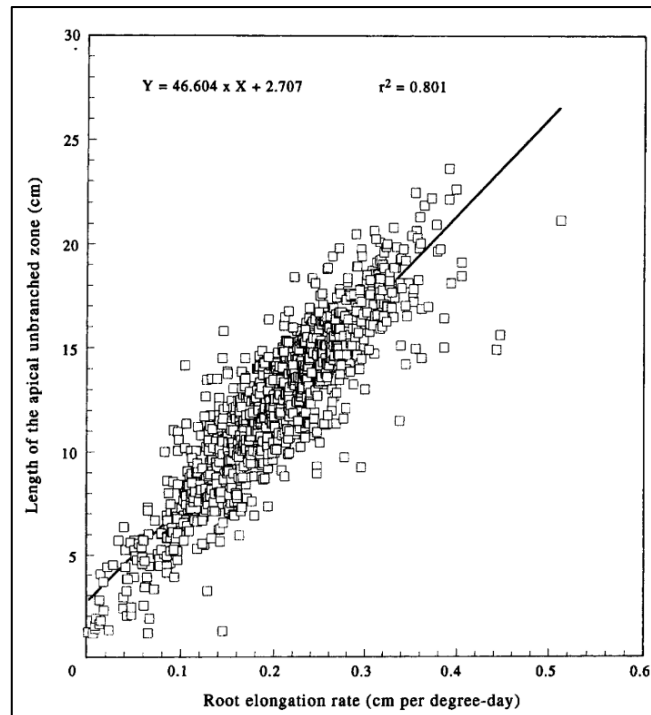


Figure 9 - Relation entre le LAUZ et le taux d'élongation chez le maïs (Pellerin & Tabourel, 1995)

L'un des principaux avantages de ces indicateurs prédictifs réside dans le fait qu'ils peuvent être mesurés plus facilement que la vitesse d'élongation elle-même. Établir et confirmer ces relations pourrait ainsi permettre de simplifier considérablement l'acquisition de données relatives à la vitesse de croissance.

2.8.2. Traits fonctionnels hydrauliques

Conductivité radiale (K_r) et conductance axiale (K_x)

La K_r , ou conductivité hydraulique radiale, décrit la facilité avec laquelle l'eau traverse la racine de manière radiale, depuis le sol environnant jusqu'aux vaisseaux conducteurs.

La K_x , ou conductance hydraulique axiale spécifique, correspond à la capacité d'une racine à transporter l'eau longitudinalement, c'est-à-dire le long de son axe principal, depuis la zone d'absorption vers la base de la plante.

La K_r et la K_x constituent, avec l'architecture du système racinaire, les éléments de base qui déterminent la conductance totale du système racinaire (K_{rs}) (Baca Cabrera et al., 2025).

Conductance du système racinaire

La conductance du système racinaire (Krs) représente la capacité de l'entière du système racinaire à transporter l'eau. Elle reflète la facilité avec laquelle l'eau circule dans l'ensemble du système racinaire pour répondre à une demande évaporative donnée (Baca Cabrera et al., 2025). La Krs peut également fournir des indications sur les adaptations potentielles de l'absorption d'eau par les racines en réponse à l'évolution des conditions environnementales (Baca Cabrera et al., 2025).

La Krs est influencée par plusieurs facteurs, notamment l'anatomie racinaire, l'architecture du système racinaire et l'humidité du sol (Cai et al., 2022).

Toutefois, sa mesure directe est complexe et laborieuse. Elle implique notamment l'utilisation de dispositifs spécialisés, tels qu'une chambre de pressurisation, et des protocoles expérimentaux longs et contraignants en laboratoire (Baca Cabrera et al., 2025).

Pour surmonter cette difficulté, il est possible de combiner l'approche empirique et la modélisation (Baca Cabrera et al., 2025). Ces dernières années, de nombreux modèles racinaires ont vu le jour et constituent de nouveaux outils précieux pour la recherche. Par exemple, le modèle structure–fonction MARSHAL, associé à un modèle structurel, permet de calculer différents traits hydrauliques racinaires (Meunier et al., 2020). Dans ce contexte, la modélisation structure–fonction des systèmes racinaires offre un lien direct entre les traits structurels et fonctionnels, facilitant ainsi leur analyse intégrée. Les modèles offrent également la possibilité d'évaluer l'efficacité de différents traits racinaires dans une diversité de conditions environnementales (Manschadi et al., 2010).

3. Objectifs

Ce mémoire poursuit deux objectifs principaux.

Le premier est d'étudier la diversité inter-variétale des traits racinaires chez le froment (*Triticum aestivum subsp. aestivum*). Différentes variétés génétiquement éloignées seront évaluées afin de mettre en évidence des différences significatives dans leurs traits racinaires structuraux. L'hypothèse sous-jacente est que la diversité génétique des variétés de froment se traduit par une diversité phénotypique, susceptible d'orienter efficacement la sélection vers des variétés plus résilientes. Une approche par modélisation viendra compléter l'analyse en intégrant un trait fonctionnel.

Le second objectif est d'examiner les relations entre différents traits racinaires. Il s'agit à la fois de tester certaines hypothèses issues de la littérature et d'évaluer la possibilité d'établir des relations prédictives pour estimer des paramètres difficiles à mesurer, tels que la vitesse d'élongation.

4. Matériel et méthodes

4.1. Matériel végétal

Deux expériences sont menées dans le cadre de ce mémoire. Au total, treize variétés de froment d'hiver (*Triticum aestivum subsp. aestivum*) sont cultivées (Tableau 1 ; Tableau 2). L'Annexe A reprend toutes les informations disponibles sur les accessions utilisées lors de ce mémoire.

Les variétés utilisées proviennent de deux collections de semences. La moitié d'entre elles est issue de la collection Watkins, qui regroupe des races locales (*landraces*) originaires du monde entier (Wingen et al., 2014). Les variétés de cette collection sont sélectionnées de manière à représenter chacun des sept groupes ancestraux identifiés par Cheng *et al.* (2024). Les variétés Watkins ont été collectées avant 1930 et peuvent donc être considérées comme traditionnelles.

Tableau 1 - Accessions de la collection Watkins utilisées pour ce mémoire

Nom de l'accension	Pays	Localité	Cluster
WATDE0482	Chine	Mukden	1
WATDE0014	France	/	2
WATDE0334	Italie	/	3
WATDE0672	URSS	Armenia	4
WATDE0065	Pologne	/	5
WATDE0413	Tunisie	Garn Alfaya	6
WATDE1042	Chine	Peking	7

L'autre moitié des semences provient de la collection de froment de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) (Balfourier et al., 2019). Cette collection contient 12000 accessions, à la fois des variétés modernes et traditionnelles. Les variétés sont sélectionnées de manière à représenter les différents clusters génétiques de la collection, tels que décrits par Balfourier *et al.* (2019). Ce choix vise à garantir une large diversité génétique.

Tableau 2 - Accessions de la collection INRAE utilisées pour ce mémoire

Nom de l'accension	Pays	Région	Statut	Année	Cluster
Odeska 267	UKR	Odessa	Moderne	1997	I
Archer	USA	Colorado	Moderne	1981	III
Salto	ITA	N/A	Traditionnelle	1939	V
Scout_66	USA	Nebraska	Moderne	1967	VI
Albidum	UZB	N/A	Moderne	1974	IX
Précoce de Gembloux (pdg)	BEL	N/A	Traditionnelle	1930	XI

Lors de la première expérience, douze variétés sont cultivées. Le nombre de réplicas par variété est de cinq, soit un total de soixante plantes.

La deuxième expérience consiste à dupliquer le protocole de la première dans le but d'améliorer la robustesse statistique des résultats. La seule différence est le remplacement de la variété *WATDE0334*, dont le stock de graines était épuisé, par la variété *WATDE1042*.

Au total, dix réplicas sont cultivés pour chacune des variétés, à l'exception des variétés *WATDE0334* et *WATDE1042*, pour lesquelles seuls cinq réplicas sont disponibles.

4.2. Dispositif expérimental

Deux expériences sont réalisées dans le cadre de ce mémoire afin de permettre un suivi du développement racinaire de différentes variétés de blé tendre d'hiver dans des conditions environnementales strictement contrôlées.

Le dispositif expérimental mis en place pour l'expérience 1 s'appuie sur le protocole décrit par Simmonds *et al.* (2025) qui précise les conditions optimales pour la culture du blé en environnement contrôlé. Comme mentionné ci-dessus, l'expérience 2 constitue un duplicata de la première et repose donc sur le même dispositif expérimental.

Le blé est cultivé en phytotron afin de garantir des conditions contrôlées tout au long de l'expérience. La température est maintenue à 20 °C avec une photopériode de 16 heures par jour. Ces conditions sont recommandées par le protocole de référence pour la culture contrôlée du blé (Simmonds et al., 2025).

La durée de l'expérience est de 15 jours entre le semis et l'arrêt volontaire, soit un cumul de 300 degrés jour. Ce choix repose sur plusieurs considérations. D'une part, les dimensions des rhizotrons et celles du scanner limitent la possibilité de travailler avec un système racinaire de grande taille. D'autre part, une phase de vernalisation est généralement préconisée après l'atteinte du stade trois feuilles. Afin d'éviter cette étape, la croissance des plants de blé est volontairement arrêtée lorsqu'une majorité des plantes ont atteint le stade trois feuilles, ce qui correspond ici à une durée de 15 jours.

4.2.1. Rhizotrons

Les rhizotrons sont des plateformes de phénotypage utilisées pour observer l'évolution des racines de manière non-destructive. Développée dans les années 1960 en Angleterre, cette technique continue aujourd'hui à être largement utilisée et améliorée (Reni. et al., 2024). Il s'agit de l'une des plateformes les plus utilisées dans la recherche scientifique dédiée aux racines (York & Lobet, 2017).

Ce dispositif recrée des conditions de croissance relativement naturelles tout en permettant au système racinaire de se développer le long d'une paroi transparente. Cette configuration permet l'observation directe de la dynamique racinaire et l'acquisition d'images pour des analyses plus détaillées.

Pour améliorer la visibilité du système racinaire, la technique des rhizotrons peut être combinée à l'usage d'une membrane semi-perméable. Ce filtre sépare physiquement les racines du substrat,

tout en laissant passer l'eau et les nutriments nécessaires à la plante. La membrane utilisée dans ce mémoire est la membrane polyamide 32 μ fabriquée par la société Inoviaflow.

En revanche, les rhizotrons présentent certaines limites : la croissance de la plante est contrainte par la taille du contenant et le développement racinaire est restreint à deux dimensions. Cette contrainte peut entraîner des modifications morphologiques par rapport au développement observé en conditions naturelles (Reni. et al., 2024).

Le dispositif est illustré à la Figure 10.

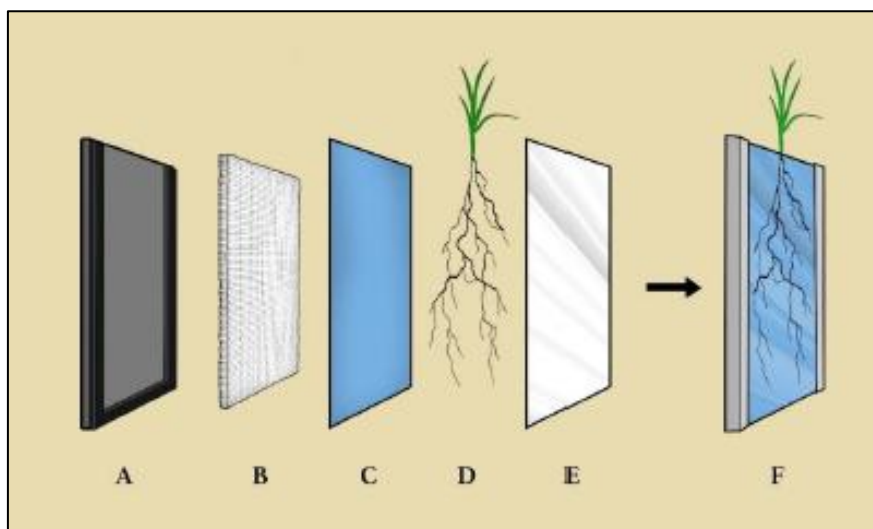


Figure 10 - Constituants d'un rhizotron et assemblage (Auteur inconnu, n.d.)

Dans ce protocole, les rhizotrons mesurent 60 cm de hauteur pour 20 cm de largeur. Avant le montage, tout le matériel est désinfecté à l'éthanol afin d'éviter toute contamination.

Le contenant consiste à une planche en bois sur laquelle des mousses ont été fixées (Figure 10, a). Il est ensuite rempli de substrat (Figure 10, b) de manière compacte pour garantir un bon maintien de la membrane semi-perméable (Figure 10, c). Ce filtre sépare physiquement les racines du substrat, tout en laissant passer l'eau et les nutriments nécessaires à la plante.

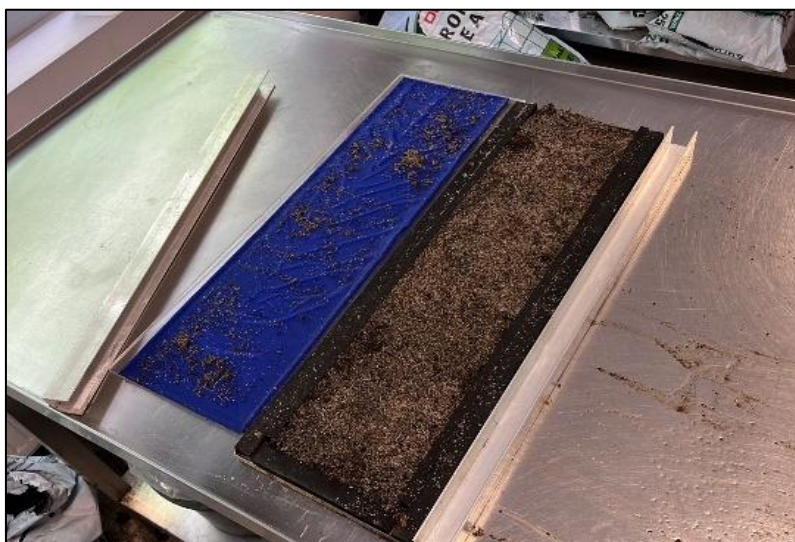


Figure 11 - Montage d'un rhizotron utilisé dans ce mémoire

Sur la face avant du rhizotron, une vitre en plexiglas (Figure 10, e) et un transparent sont placés pour permettre l'observation visuelle du système racinaire et le suivi de sa croissance. L'ensemble du dispositif est maintenu en place à l'aide de deux cadres de serrage métalliques, assurant la stabilité et la compression uniforme du montage.

Dans cette expérience, le substrat utilisé correspond au mélange de sol recommandé par le centre Watkins. Les proportions ont été définies en concertation avec deux membres du laboratoire PEPA afin de reproduire au mieux des conditions représentatives d'un sol de culture de champ. Il s'agit d'un mélange composé de sable (4/16), de terreau (4/16), de terre de culture de betterave (3/16) et de compost (1/16). Ce mélange est préalablement homogénéisé à l'aide d'une bétonnière, puis tamisé afin d'éliminer les agrégats susceptibles de perturber le développement racinaire.

Une fois les rhizotrons préparés et le substrat humidifié, les grains de blé sont semés à une profondeur de 3 ± 1 cm. Les grains sont préalablement stockés en chambre froide, afin de réaliser une stratification à froid simulant les conditions hivernales naturelles et favorisant la germination. Les grains sont positionnés directement au-dessus de la membrane.

Les rhizotrons sont ensuite répartis dans six bacs. Afin d'éviter tout biais lié au positionnement, les différentes variétés sont disposées de manière aléatoire au sein de ces bacs. Les rhizotrons sont positionnés verticalement avec une légère inclinaison. Le schéma de disposition aléatoire des rhizotrons est présenté à la figure 12.

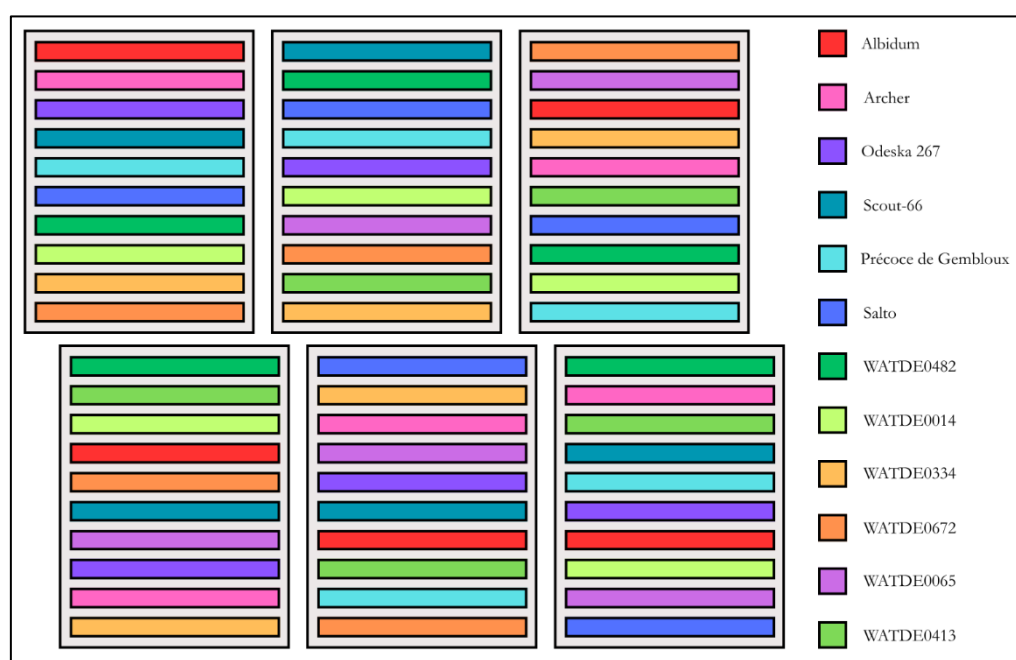


Figure 12 - Disposition aléatoire des rhizotrons dans le phytotron

L'arrosage est effectué trois fois par semaine en utilisant de l'eau de pluie. Les plantes sont arrosées jusqu'à saturation du sol, de manière à maintenir une teneur en eau élevée tout au long de l'expérience et à éviter tout stress hydrique susceptible d'influencer la croissance.

Après trois jours, les graines germent et les premières racines séminales sont visibles. Au bout de neuf jours, les premières racines latérales commencent à se développer.

4.3. Mesures et observations

4.3.1. Mesures dynamiques

La vitesse d'élongation racinaire est mesurée trois fois par semaine. À chaque session, l'avancée des racines est tracée manuellement à l'aide d'un marqueur permanent sur un transparent positionné contre la vitre en plexiglas du rhizotron et la date du relevé (Jour J) est notée.

Pour chaque plante, une à plusieurs racines séminales sont suivies, ainsi qu'un échantillon de racines latérales. Une marque repère est ajoutée sur le calque afin d'identifier la racine primaire, ce qui permet ensuite de faire le lien entre les données de croissance et la racine numérisée.

Les transparents sont ensuite numérisés à l'aide d'un scanner et traités avec le logiciel SmartRoot (voir section 4.4).

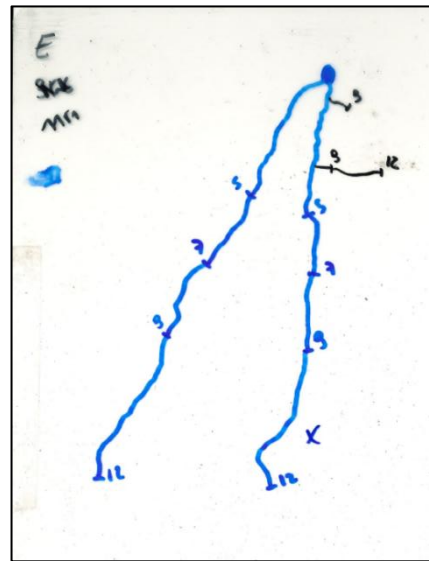


Figure 13 - Mesures de la croissance racinaire sur un transparent

4.3.2. Mesures statiques

À la fin de l'expérience (Jour 15), deux mesures statiques sont réalisées pour chaque plante.

Premièrement, le nombre de racines séminales est compté manuellement. Sont considérées comme racines séminales l'ensemble des racines issues directement de la graine, y compris la racine principale. En effet, compte tenu de la difficulté à distinguer clairement la racine primaire des racines séminales sur le matériel observé, la racine principale est intégrée dans le comptage.

Deuxièmement, le nombre de feuilles est également mesuré. Une feuille est comptabilisée dès lors que son limbe est sorti de la gaine de la feuille précédente et donc visible. Il est à noter que le développement de certaines parties aériennes peut être limité lorsque celles-ci se retrouvent coincées dans une couture de la membrane.

4.4. Numérisation et traitement d'image

À la fin de l'expérience, les racines sont coupées, lavées, puis stockées dans des tubes Falcon contenant de l'éthanol à 50 % afin d'assurer leur conservation jusqu'au moment du scan. La racine présentant le plus fort développement, considérée comme la racine primaire, est stockée séparément dans un tube Falcon dédié afin de garantir sa numérisation.

La numérisation des racines est réalisée selon le protocole suivant. Pour chaque plante, la racine primaire ainsi que deux racines séminales sont sélectionnées et scannées. Les images sont acquises à l'aide d'un scanner EPSON Perfection V850 (Figure 14). L'application VueScan x64 est utilisée pour paramétrer le scanner. La paramétrisation du scanner est disponible en Annexe B. La résolution est fixée à 1200 DPI afin de permettre une observation détaillée de l'architecture racinaire. Les images sont numérisées en nuances de gris.

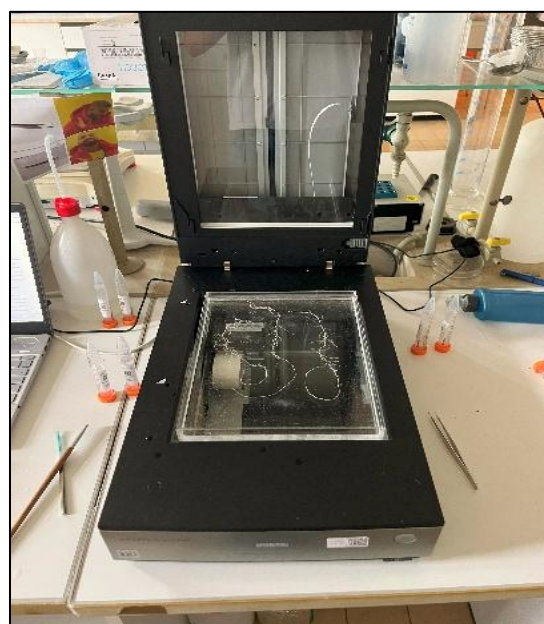


Figure 14 - Numérisation des racines

Après acquisition, les images sont traitées avec le logiciel SmartRoot (Lobet et al., 2011). Ce logiciel d'analyse d'image semi-automatisé permet de quantifier l'architecture et la croissance des racines. Il s'agit d'un logiciel libre, indépendant du système d'exploitation, développé sur la plateforme ImageJ (Lobet et al., 2011).

Dans SmartRoot, les racines sont représentées par un ensemble de nœuds reliés entre eux. Sur base de ces nœuds, le logiciel est capable de fournir les paramètres suivants : longueur, surface, volume et diamètre racinaire. Le logiciel offre également la possibilité de tracer les racines latérales et de les associer à leur racine principale, ce qui permet notamment de mesurer la longueur de la zone apicale non ramifiée (LAUZ) et la densité de ramification.

La semi-automatisation proposée par SmartRoot permet de réduire significativement le temps nécessaire à l'identification et à la sélection des racines. Cependant, le processus reste long et exigeant, notamment lorsqu'un grand nombre d'images doit être traité. Les outils d'intelligence artificielle en cours de développement pourraient bientôt accélérer et améliorer l'acquisition et l'analyse des données (Weihs et al., 2024).

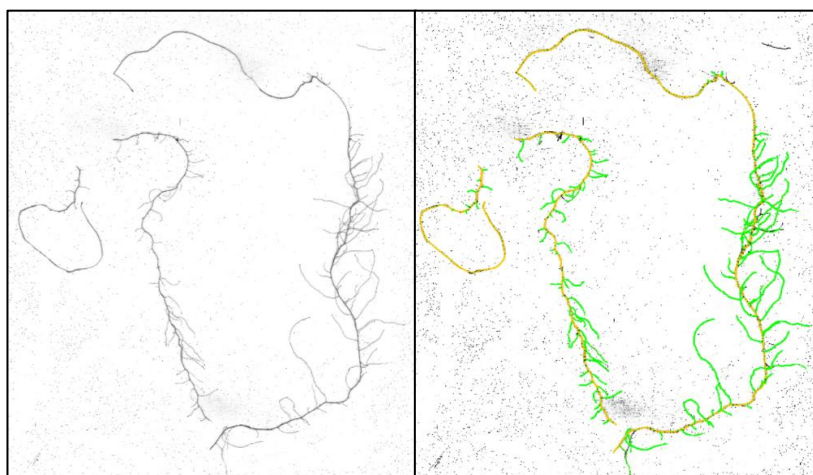


Figure 15 - Sélection des racines dans SmartRoot

Un prétraitement des images a été mis en place afin d'améliorer la qualité du traitement et l'analyse des scans racinaires. En effet, les images obtenues ne permettent pas toujours une visualisation nette des structures racinaires, notamment en raison d'un contraste parfois trop marqué entre la stèle et le cortex. Cette limitation peut notamment affecter la précision des mesures de diamètre racinaire (Figure 16).

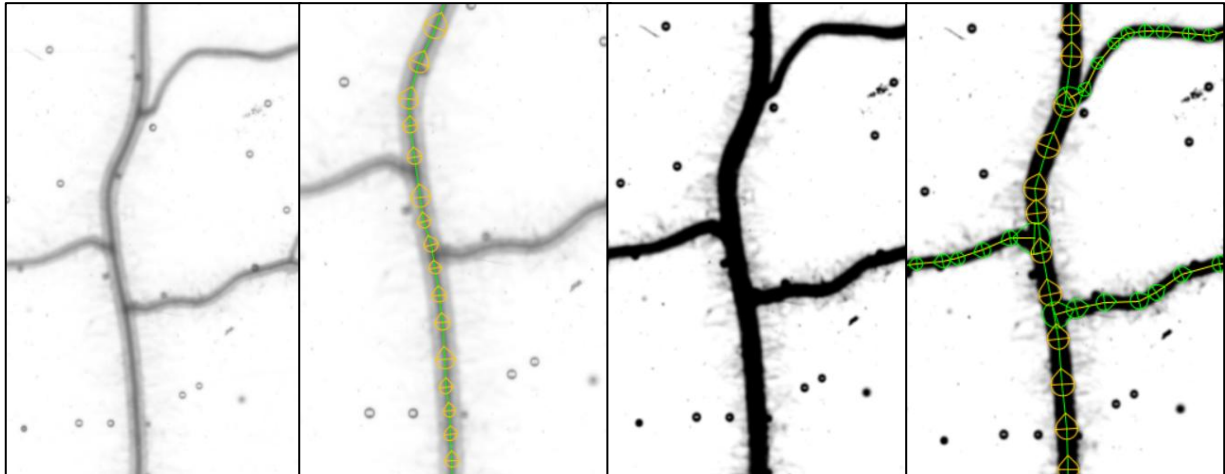


Figure 16 - Amélioration du contraste et effet sur le diamètre

Afin de limiter cet effet, une homogénéisation ainsi qu'une augmentation du contraste ont été réalisées. Pour ce faire, ImageJ permet d'appliquer une macro sur un ensemble d'images. La macro utilisée pour le traitement de l'ensemble des scans racinaires est présentée en Annexe C. Cette manipulation améliore nettement la visualisation des racines tout en renforçant la qualité de sélection semi-automatique de SmartRoot. Le résultat est présenté à la Figure 16.

En complément de ces ajustements, une attention particulière doit être portée à la sélection des racines latérales. En effet, lorsque celles-ci sont nombreuses et longues, il devient difficile d'éviter leur superposition lors du scan (Figure 17). Cette superposition complique leur différenciation et rend la sélection plus fastidieuse.

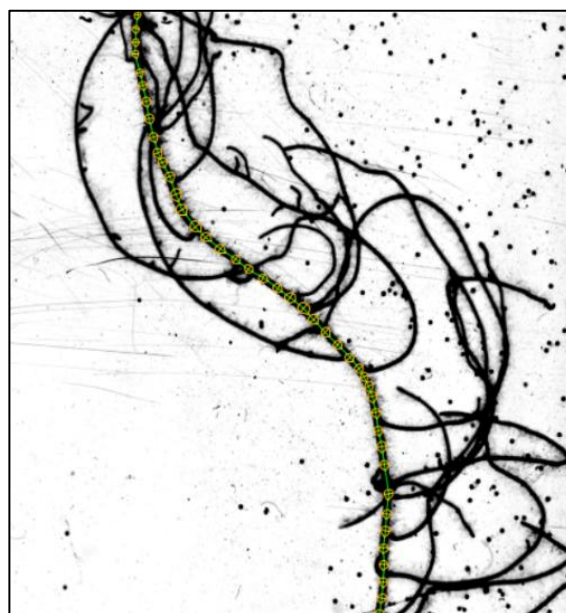


Figure 17 - Superposition des racines latérales

La distinction des racines latérales émergentes à partir de la racine principale peut également s'avérer délicate. Lors du scan, certaines d'entre elles, tout juste formées, restent de taille microscopique. Or, leur identification est essentielle pour repérer la dernière racine latérale prise en compte dans le calcul de la LAUZ. Dans ce mémoire, seules sont considérées comme latérales les racines dépassant clairement l'épiderme de la racine mère, comme illustré en vert à la Figure 18.

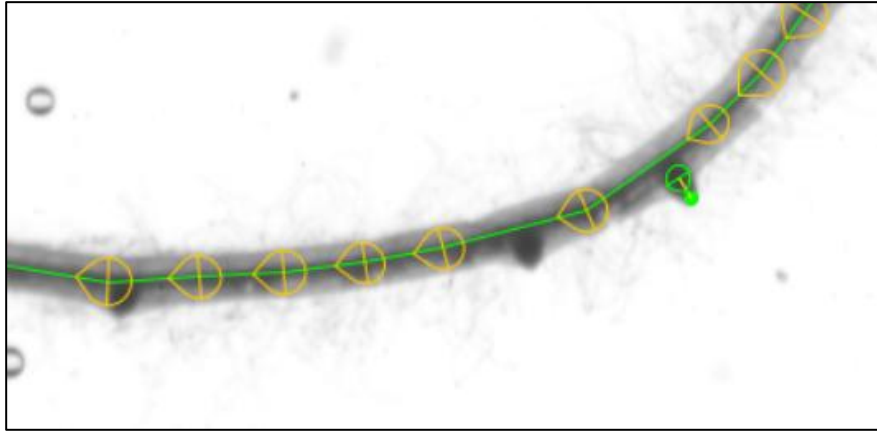


Figure 18 - Identification d'une racine latérale (en vert) par rapport aux autres racines pré-émergentes encore contenues dans l'épiderme.

Afin de standardiser l'analyse dans SmartRoot, une stratégie de tracé a été définie et suivie pour l'ensemble des scans racinaires. Elle repose d'abord sur le tracé complet des racines primaires et séminales afin d'assurer une représentation fidèle de l'architecture racinaire principale. Dans un second temps, la plupart des racines latérales sont également tracées dans leur intégralité, ce qui permet d'obtenir des mesures de longueur et de diamètre. Enfin, un duplicata de ces calques est consacré à la sélection exhaustive des racines latérales issues des racines primaires. Bien que cette étape soit fastidieuse, la création d'un duplicata permet de sélectionner plus rapidement l'ensemble des racines latérales issues des racines primaires sans avoir à les tracer entièrement. Cette approche permet de calculer efficacement la densité de ramification latérale tout en évitant de biaiser les mesures de longueur moyenne des latérales.

4.5. Analyse des données

4.5.1. Structure des données

Le logiciel SmartRoot enregistre les tracés des racines sous le format Root System Markup Language (RSML) (Lobet et al., 2015). Ce format standardisé a été développé pour faciliter le partage des données de phénotypage racinaire entre différents logiciels. Basé sur la norme XML, il permet de stocker de manière structurée des informations issues d'images 2D ou 3D comme la géométrie des racines et leurs propriétés (Lobet et al., 2015). Ce format favorise la portabilité des données, facilitant ainsi le travail collaboratif entre chercheurs.

SmartRoot permet également l'exportation des données sous les formats CSV (Comma Separated Values) ou SQL, selon les besoins d'analyse. Dans le cadre de ce mémoire, les jeux de données Global Root Data, Root Nodes et Growth Rate ont été exportés depuis SmartRoot. Ces fichiers contiennent respectivement des informations sur chaque racine, sur les nœuds individuels et sur la croissance des racines dans le temps.

Les mesures manuelles ont, quant à elles, été stockées sous le format .xlsx (Excel), afin de faciliter leur traitement et leur organisation.

4.5.2. Traitement statistique

L'ensemble de l'analyse statistique est réalisée à l'aide du logiciel RStudio (version 2025.05.0+496).

Selon leur format, les données y sont importées à l'aide des librairies *readxl* ou *readr* (Wickham et al., 2024). La librairie *dplyr* est ensuite utilisée pour la manipulation des données (Wickham et al., 2025). Enfin, la librairie *ggplot2* est largement utilisée dans la conception des graphiques réalisés (Wickham, 2016).

Le traitement statistique de ce mémoire se divise en deux approches.

La première consiste en une analyse comparative entre variétés visant à évaluer l'effet de la variabilité génétique sur les différentes variables mesurées.

Pour chaque variable mesurée, une analyse statistique est réalisée afin d'évaluer l'effet de la variabilité génétique entre les variétés. La première étape consiste à vérifier les conditions d'application d'une analyse de la variance (ANOVA), en testant la normalité des résidus à l'aide du test de Shapiro-Wilk, appliqué dans chaque groupe et l'homogénéité des variances entre les groupes à l'aide du test de Levene.

Lorsque ces conditions sont remplies, une ANOVA à un facteur est réalisée. En cas de différence significative entre les groupes, un test post-hoc de Tukey HSD est appliqué afin d'identifier les différences entre les variétés. Les résultats sont ensuite visualisés à l'aide de boîtes à moustaches (boxplot), enrichies par une annotation des groupes statistiquement différents à l'aide de lettres issues de la fonction *multcompLetters* de la librairie *multcompView* (Graves & Dorai-Raj, 2024).

Dans les cas où les résidus ne sont pas normalement distribués dans plusieurs groupes ou lorsque l'homogénéité des variances n'est pas validée ($p < 0,05$ au test de Levene), un test non paramétrique de Kruskal-Wallis est utilisé. Si ce test révèle une différence significative, un test post-

hoc de Dunn avec correction de Bonferroni est appliqué. Les comparaisons multiples sont ensuite synthétisées de la même manière, à l'aide d'un système de lettres différenciant les groupes.

Enfin, pour certaines variables, un filtrage des valeurs aberrantes a été appliqué de manière optionnelle, en utilisant l'intervalle interquartile (IQR) au sein de chaque variété. Ce filtrage permet de limiter l'influence des valeurs extrêmes sur les comparaisons statistiques.

La deuxième approche est une analyse des relations entre traits racinaires. Pour cela, des modèles linéaires simples ont été construits. Les données ont préalablement été nettoyées afin d'exclure les valeurs manquantes ou non finies. Pour chaque relation testée, le coefficient de détermination (R^2) a permis d'évaluer la proportion de la variance expliquée par le modèle. La p-valeur associée au test de régression a été utilisée pour déterminer la significativité de la relation linéaire entre les deux variables.

4.6. Modélisation

Afin d'évaluer les caractéristiques hydrauliques des systèmes racinaires étudiés lors de ce mémoire, une modélisation structure-fonction a été établie. Cette modélisation repose sur l'utilisation d'une pipeline R entre un modèle structurel, CRootBox (Schnepf et al., 2018), et d'un modèle structure-fonction, MARSHAL (Meunier et al., 2020). Ces deux modèles sont décrits ci-dessous.

4.6.1. CRootBox

CRootBox est un modèle structurel conçu pour simuler l'architecture racinaire des plantes. Flexible et rapide, il permet de représenter les interactions entre les racines et le sol dans des environnements statiques ou dynamiques. Le modèle s'appuie sur un ensemble de paramètres développementaux adaptés à différents types de plantes, qu'il s'agisse de dicotylédones ou de monocotylédones. De nature stochastique, CRootBox utilise une moyenne et un écart type pour chaque paramètre, ce qui permet de refléter la variabilité naturelle des systèmes racinaires (Schnepf et al., 2018).

CRootBox repose sur un ensemble de 25 paramètres, détaillés en Annexe D. Parmi eux, neuf ont pu être estimés à partir des données issues des expériences menées dans ce mémoire (Tableau 3). Les paramètres restants ont été repris du jeu de données *Triticum_aestivum_Bingham_2011*, mis à disposition sur le GitHub officiel de CRootBox.

Tableau 3 - Paramètres de CRootBox estimés expérimentalement

Paramètre	Symbole	Unité	Source
Temps de simulation	<i>simtime</i>	jour	Expériences
Rayon racinaire (SE et Lat)	<i>a</i>	cm	Expériences
Vitesse d'élongation (SE et Lat)	<i>r</i>	cm . jour ⁻¹	Expériences
Longueur de la zone basale	<i>la</i>	cm	Expériences
Longueur de la zone apicale	<i>lb</i>	cm	Expériences
Distance entre deux latérales	<i>ln</i>	cm	Expériences
Longueur racinaire maximale (SE et Lat)	<i>lmax</i>	cm	Expériences
Profondeur de plantation	<i>depth</i>	cm	Expériences
Nombre maximal de racines séminales	<i>maxB</i>	-	Expériences

Les architectures racinaires générées par le modèle CRootBox sont ensuite utilisées comme structure d'entrée pour le modèle hydraulique présenté ci-après.

4.6.2. MARSHAL

MARSHAL (MAize Root System Hydraulic Architecture Solver) est un outil numérique qui associe un modèle d'architecture racinaire (CRootBox) à un solveur hydraulique simulant les flux d'eau au sein du système racinaire. Il permet ainsi de représenter le fonctionnement hydraulique d'architectures racinaires réalistes en lien avec les conditions environnementales (Meunier et al., 2020). Une pipeline RMarkdown est disponible sur le GitHub de MARSHAL.

Pour exécuter le modèle, certains paramètres d'entrée sont requis, notamment les valeurs de conductivité racinaire et d'humidité du sol. Les valeurs de conductivité radiale (K_r) et de conductance axiale (K_x), nécessaires à la simulation de la conductance totale du système racinaire (K_{rs}), ont été reprises de données obtenues chez le maïs, disponibles sur le GitHub du projet. Quant aux valeurs d'humidité du sol, elles ont été fixées à un niveau très élevé pour éviter toute limitation des flux hydriques liée à un déficit en eau. De plus, le modèle étant initialement conçu pour le maïs, certains paramètres du blé ont été modifiés pour pouvoir les intégrer dans ce modèle. Enfin, afin de ne pas alourdir les calculs, seuls deux niveaux racinaires ont été pris en compte : les racines séminales (incluant la racine primaire) et les racines latérales de premier ordre.

4.7. Outil de rédaction

Dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, le recours à des outils d'intelligence artificielle générative tels que ChatGPT-4o s'est strictement limité à des opérations de reformulation, d'aide à la résolution de problèmes en langage R et de correction orthographique, dans le but d'améliorer la clarté du texte pour le lecteur. Cette démarche s'inscrit dans le respect des directives émises par le vice-recteur aux affaires étudiantes de l'UCLouvain concernant l'utilisation des IA génératives, datées de 2023.

5. Résultats

Cette section présente les résultats obtenus au cours des deux expériences réalisées dans le cadre de ce mémoire. Dans un premier temps, une analyse comparative des variétés étudiées est effectuée afin de mettre en évidence la diversité phénotypique observée. Dans un second temps, une modélisation structure–fonction est utilisée afin d’élargir l’analyse aux traits fonctionnels. Enfin, dans un troisième temps, les relations entre différents traits sont examinées afin de déterminer l’existence éventuelle de corrélations significatives.

De manière générale, le taux de germination a été élevé pour les deux expériences. Lors de la première expérience, 56 graines sur 60 ont germé, et lors de la seconde, 57 graines ont germé.

À la clôture de l’expérimentation, après 15 jours de croissance, les plantes présentaient 2 à 3 feuilles et comptaient entre 3 et 6 racines séminales. De plus, les systèmes racinaires présentaient déjà une diversité architecturale marquée identifiable lors de l’observation directe. Cette variabilité est illustrée à la Figure 19 qui regroupe plusieurs photographies prises le dernier jour de l’expérimentation.

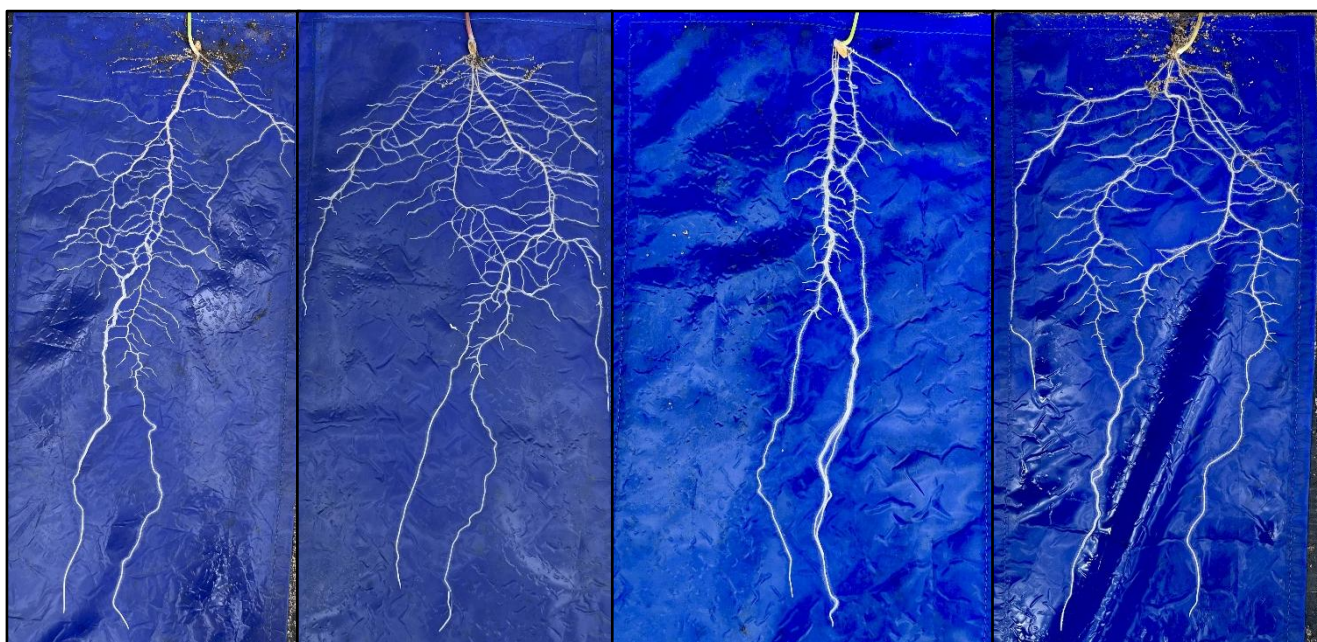


Figure 19 - Systèmes racinaires des variétés Archer, W0413, W0672 et W1042 (de gauche à droite) le dernier jour de l’expérimentation. À titre d’échelle, la membrane bleue sur la photo mesure 15 cm de largeur.

5.1. Comparaison phénotypique entre variétés de froment

5.1.1. Au niveau des organes de la plante

Nombre de feuilles

Le nombre de feuilles de chaque plante a été mesuré le quinzième et dernier jour de l'expérience. La Figure 20 présente le nombre moyen de feuilles par variété.

Les hypothèses de normalité des résidus et d'homogénéité des variances ayant été validées, une ANOVA a été réalisée. Les résultats du test de Tukey sont indiqués par des lettres sur le graphique : deux lettres différentes signalent une différence significative entre les groupes correspondants. Par ailleurs, comme pour les autres figures présentées dans la section Résultats, les quatre variétés modernes (Albidum, Archer, Odeska et Scout-66) sont signalées par un astérisque.

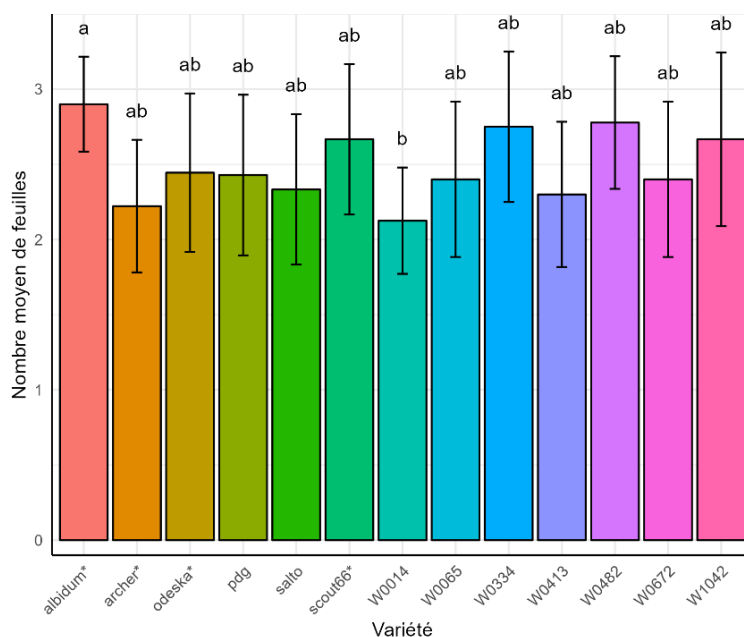


Figure 20 - Nombre de feuilles au 15ème jour pour chaque variété

Globalement, le nombre de feuilles varie entre 2 et 3. Les moyennes variétales se situent entre 2,12 (W0014) et 2,9 (Albidum). **L'analyse de la variance indique une différence significative entre ces deux variétés** ($p < 0,05$).

Nombre de racines séminales

Le nombre moyen de racines séminales par variété est illustré à la Figure 21. Cette mesure a également été réalisée le quinzième et dernier jour de l'expérience.

Le nombre de racines séminales par plante est compris entre 3 et 6. La variété W0413 présente la moyenne la plus haute (5,3 racines) tandis que la variété W0065 présente la moyenne la plus basse (4,1 racines).

Le test de Tukey indique que **ces deux variétés sont significativement différentes** ($p < 0,05$).

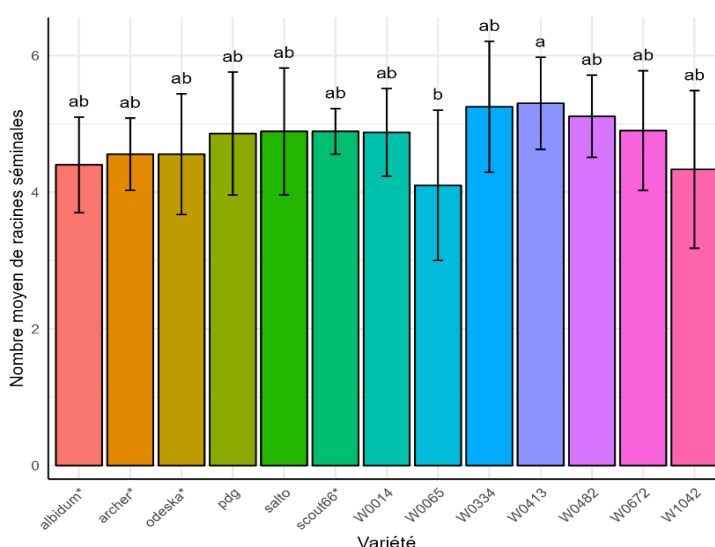


Figure 21 - Nombre de racines séminales pour chaque variété

5.1.2. Au niveau des traits racinaires

Vitesse d'élongation des racines primaires

Le suivi des vitesses d'élongation a été rendu possible grâce à la culture des plantes en rhizotrons. La Figure 22 met en comparaison les vitesses d'élongation des racines séminales entre les variétés testées expérimentalement. Un filtre IQR a été appliqué. Les hypothèses de normalité des résidus et d'homogénéité des variances n'ayant pas été validées, le test de Kruskal-Wallis a été réalisé.

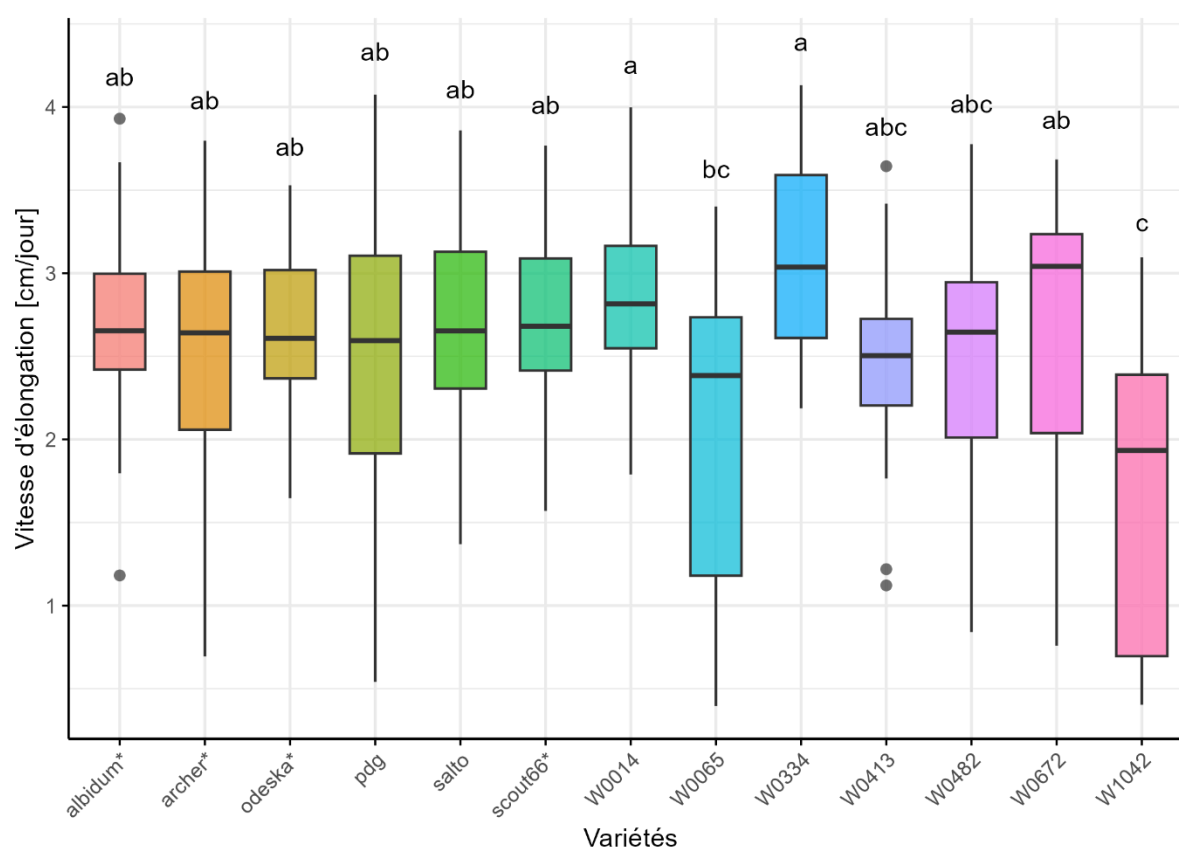


Figure 22 - Vitesse d'élongation moyenne des racines séminales (cm/jour) pour chaque variété

Le test non paramétrique met en évidence une relative homogénéité des vitesses d'élongation racinaire entre les différentes variétés, la majorité présentant des moyennes comprises entre 2 et 3 cm par jour. Néanmoins, **quatre variétés issues de la collection Watkins se distinguent significativement : W0014, W0334, W0065 et W1042**. À l'inverse, les variétés de la collection INRAE présentent des vitesses de croissance très proches, sans différence marquée entre variétés traditionnelles et modernes.

La croissance la plus faible est observée chez la variété W1042 (1,71 cm.jour⁻¹), tandis que la plus élevée est enregistrée chez W0334 (3,08 cm.jour⁻¹). Enfin, les deux variétés aux vitesses moyennes les plus basses sont également celles présentant les écarts types les plus élevés.

Diamètre des racines séminales

La Figure 23 présente le diamètre moyen des racines séminales selon la variété. Puisque la variance entre variétés est non-homogène et que les résidus sont distribués non-normalement, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis est réalisé.

Plusieurs variétés présentent des outliers, ce qui suggère une certaine variabilité individuelle au sein des groupes. Les diamètres racinaires sont compris entre 0,044 et 0,057 cm.

De nombreuses différences

significatives sont observées, comme en témoignent les différents groupes présentés sur la figure. Les différences les plus significatives sont observées entre la variété W0672 et les variétés W0482 et Scout-66.

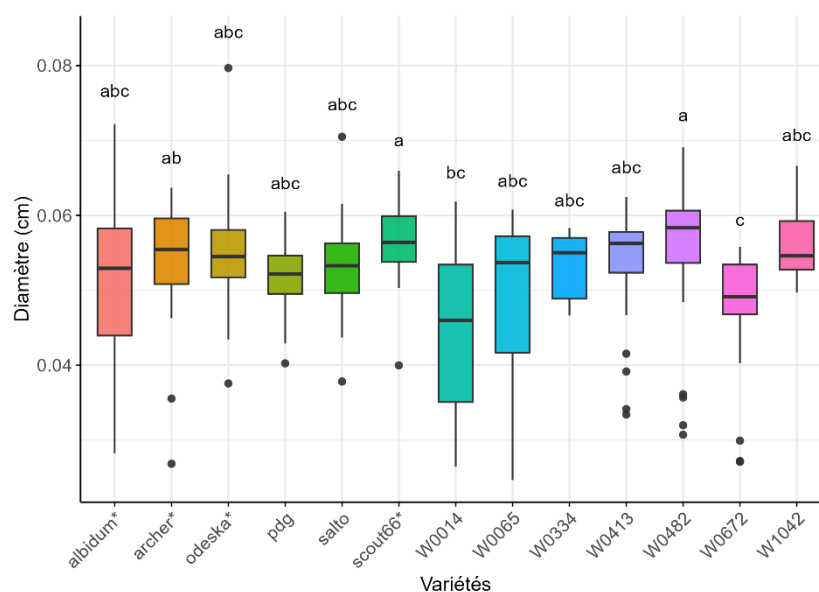


Figure 23 - Diamètre des racines séminales (cm) pour chaque variété

Diamètre des racines latérales

La distribution des diamètres moyens des racines latérales selon les variétés est illustrée à la Figure 24. Un filtre IQR a été appliqué. L'analyse a été réalisée sur la base du test non-paramétrique de Kruskal-Wallis.

L'analyse met en évidence des différences significatives entre les variétés étudiées. Toutefois, le test de Kruskal-Wallis est sensible aux faibles écarts lorsque les effectifs sont élevés. Dans cette étude, 150 à 653 racines latérales ont été mesurées par variété. Les différences observées ne reflètent donc pas nécessairement une variabilité biologique importante.

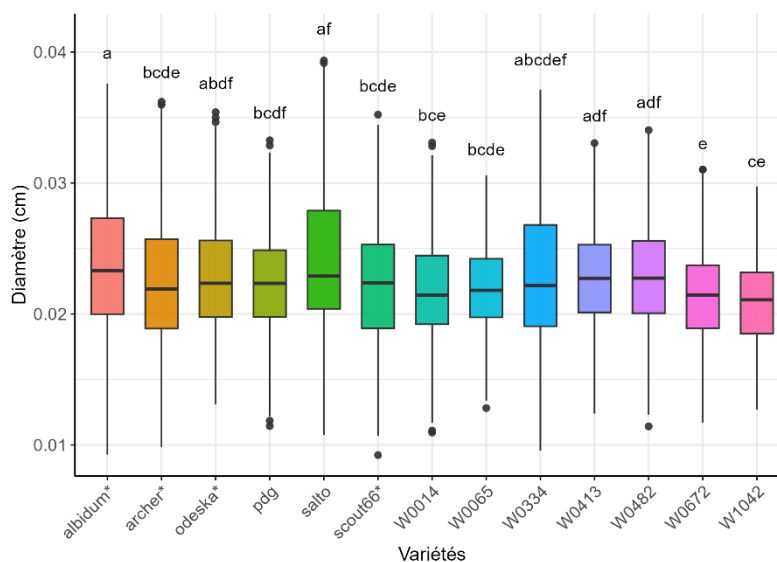


Figure 24 - Diamètre des racines latérales (cm) pour chaque variété

Les diamètres racinaires mesurés sont compris dans une plage relativement étroite, allant de 0,021 cm (W1042) à 0,024 cm (Salto). Les écarts-types varient de 0,0035 à 0,0060 cm, traduisant une faible dispersion intra-variétale.

LAUZ des racines séminales

La Figure 25 compare les longueurs apicales non ramifiées des racines séminales entre les variétés analysées. Un filtrage a été appliqué, combinant un filtre IQR et un tri manuel. Seules les longueurs supérieures à 3 cm ont été retenues afin d'exclure les valeurs biaisées par des dommages ou des erreurs de manipulation.

Les hypothèses de normalité des résidus et d'homogénéité des variances n'ayant pas été validées, un test de Kruskal-Wallis a été réalisé.

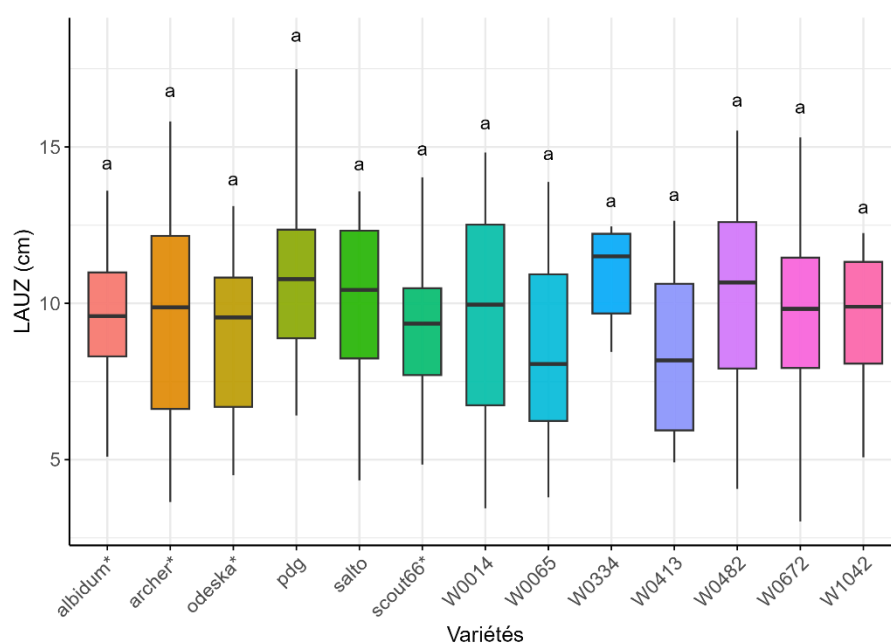


Figure 25 - LAUZ des racines séminales (cm) pour chaque variété

L'analyse statistique ne met pas en évidence de différence significative entre les variétés ($p > 0,05$). Les valeurs moyennes de LAUZ se situent entre 8,34 cm et 10,26 cm.

Densité de ramification latérale des racines primaires

La Figure 26 illustre la densité de ramification latérale des racines primaires.

Le test de Kruskal-Wallis n'indique aucune différence significative entre les variétés.

La densité moyenne la plus élevée est observée chez la variété W0413, atteignant 2,34 ramifications par centimètre de racine primaire.

Cette variété se distingue également par une forte dispersion, reflétant une variabilité marquée au sein de l'échantillon.

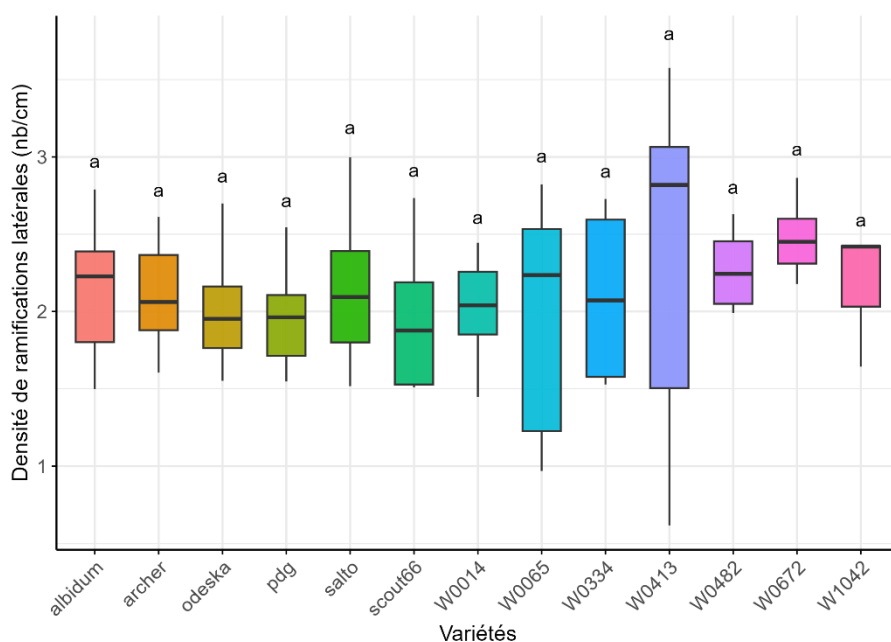


Figure 26 - Densité de ramification latérale des racines primaires (nb/cm) pour chaque variété

5.2. Modélisation et capacité fonctionnelle des systèmes racinaires

Afin de réaliser une comparaison des traits fonctionnels des différentes variétés, une pipeline entre le modèle structurel CRootBox et le modèle structurel-fonctionnel MARSHAL a été utilisée. Cette modélisation permet d'intégrer les traits structurels mesurés afin de prédire des traits fonctionnels.

Les résultats de cette pipeline sont présentés ci-après.

5.2.1. Architectures modélisées par variété avec CRootBox

Le Tableau 4 présente les valeurs moyennes et écarts types des paramètres d'entrée de CRootBox pour les racines séminales et latérales de la variété Précoce de Gembloux (pdg). Les paramètres des autres variétés figurent en Annexe E. Comme indiqué en Section 3.6., le temps de simulation a été fixé à 15 jours en accord avec la durée de l'expérience.

Tableau 4 - Valeurs calculées des paramètres implémentés dans CRootBox de la variété Précoce de Gembloux (SE pour séminale ; Lat pour latérale)

Paramètre	Valeur moyenne	Écart type	Unité
Temps de simulation	15	/	jour
Rayon racinaire (SE)	0,27	0,03	mm
Vitesse d'élongation (SE)	2,64	0,66	cm/jour
Longueur de la zone basale (SE)	0,79	0,39	cm
Longueur de la zone apicale (SE)	11,62	2,94	cm
Distance entre deux latérales (SE)	0,53	0,06	cm
Longueur racinaire maximale (SE)	28,11	4,78	cm
Rayon racinaire (Lat)	0,12	0,03	mm
Vitesse d'élongation (Lat)	0,54	/	cm/jour
Longueur racinaire maximale (Lat)	1,94	0,93	cm
Profondeur de plantation	3	/	cm
Nombre max de racines séminales	4,86	0,90	-

Le reste des paramètres est issu du jeu de données *Triticum_aestivum_Bingham_2011*, mis à disposition sur le GitHub officiel de CRootBox. Ces paramètres sont donc identiques pour toutes les variétés.

Une partie des sorties graphiques de cette modélisation est présentée à la Figure 27.

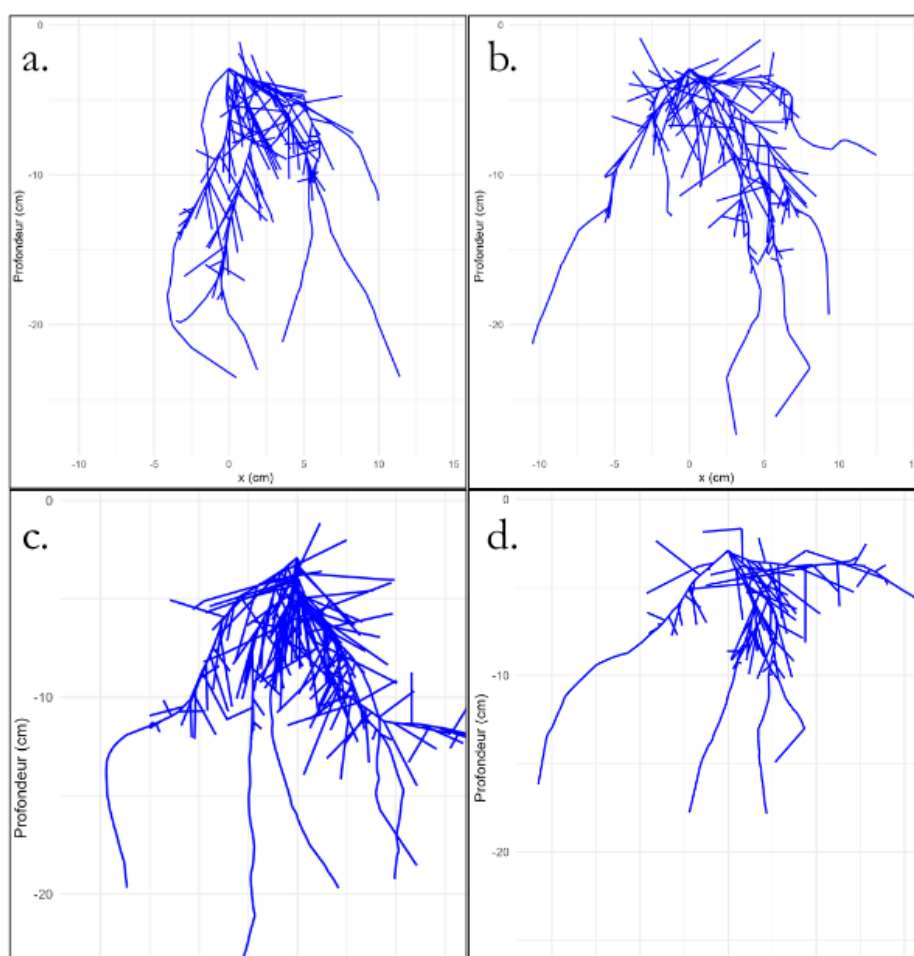


Figure 27 - Modélisation structurelle du système racinaire des variétés Archer (a), W0413 (b), W0672 (c) et W1042 (d) avec un temps de simulation de 15 jours.

5.2.2. Comparaison de la conductance totale du système racinaire (Krs)

À partir des architectures racinaires simulées avec le modèle CRootBox, certains traits hydriques fonctionnels ont été évalués à l'aide du modèle MARSHAL.

Pour chaque variété, les calculs ont été réalisés sur 100 répétitions. Pour rappel, le modèle CRootBox est stochastique, ce qui rend chaque simulation unique et différente.

La Figure 28 illustre la comparaison de la conductance du système racinaire (Krs) selon les différentes variétés. Bien que les résidus suivent une distribution normale, l'hypothèse d'homogénéité des variances n'est pas respectée. Par conséquent, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué pour analyser les différences entre variétés.

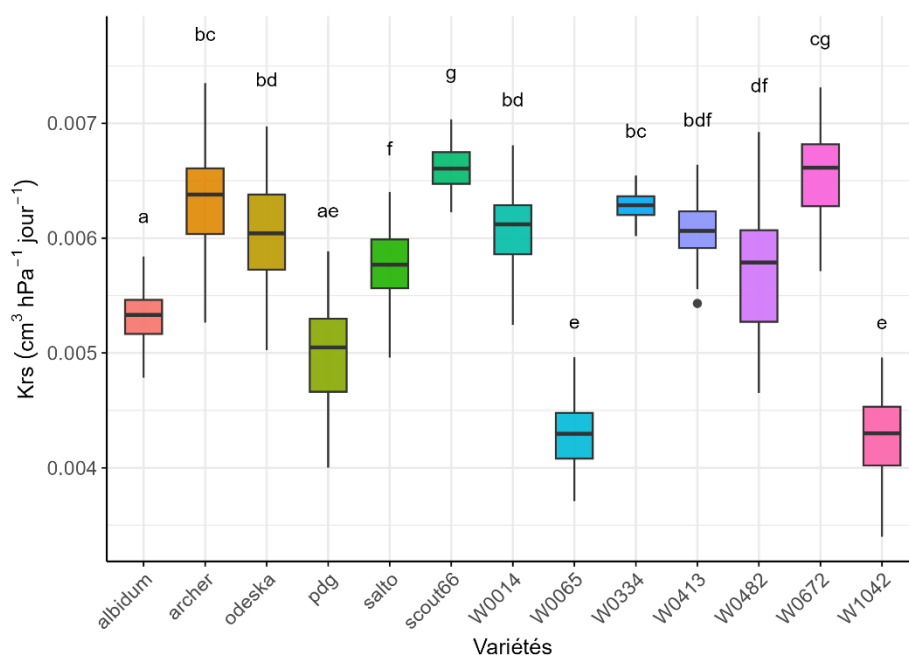


Figure 28 - Conductance du système racinaire ($\text{cm}^3 \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$) pour chaque variété

L'analyse statistique met en évidence une variabilité marquée entre variétés. Les valeurs moyennes de Krs varient d'environ 0,0043 à 0,0066 $\text{cm}^3 \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$. Les variétés W0065 et W1042 affichent les valeurs moyennes les plus faibles tandis que Scout-66 et W0672 présentent les valeurs les plus élevées.

5.2.3. Évolution de la conductance du système racinaire

Afin d'approfondir l'analyse, une simulation de l'évolution temporelle de certains paramètres hydriques a été réalisée. Les résultats relatifs à la conductance du système racinaire et à la transpiration potentielle des variétés Précoce de Gembloux (pdg) et W0672 sont présentés ci-après. Ces variétés ont été retenues pour leurs valeurs de Krs nettement distinctes. Le nombre de simulations a été fixé à 10 entre 1 et 41 jours, puis à 5 entre 46 et 61 jours.

Afin d'améliorer la qualité de la modélisation sur une période allongée, les paramètres proposés par Bingham et Wu (2011) ont été utilisés pour ajuster les longueurs racinaires maximales et le nombre de racines basales.

La Figure 29 illustre l'évolution de la conductance du système racinaire (Krs) pour les deux variétés. La ligne représente l'évolution moyenne de Krs au fil des jours et la zone ombrée correspond à la variabilité (± 1 écart-type) entre les simulations.

La conductance du système racinaire (Krs) des deux variétés augmente rapidement au cours des premières semaines de croissance, avec une pente marquée entre 0 et 30 jours. Cette augmentation se poursuit ensuite plus progressivement jusqu'à atteindre un plateau autour du 40^{ème} jour.

Le Krs de la variété Pdg atteint un plateau à partir de 51 jours avec une valeur d'environ $0,0377 \text{ cm}^3 \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$. La variété W0672 présente un plateau légèrement plus élevé, atteignant environ $0,0424 \text{ cm}^3 \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$ dès le 41^{ème} jours.

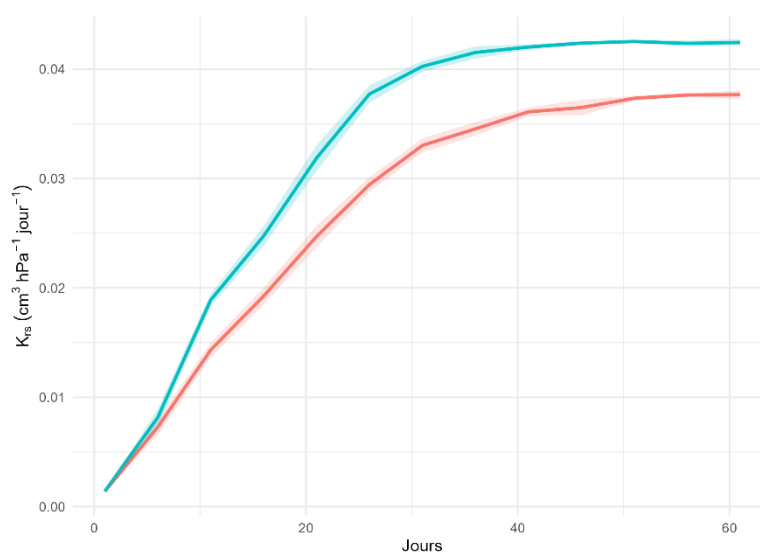


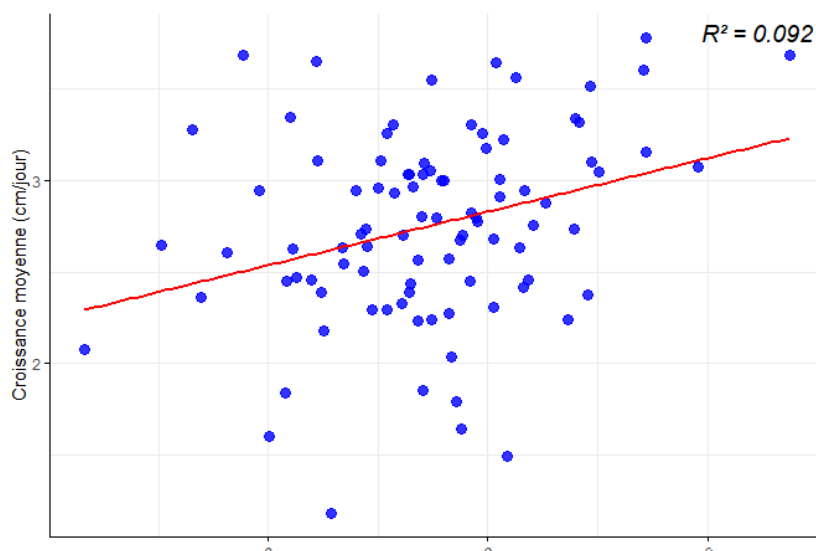
Figure 29 - Évolution de la conductance du système racinaire (Krs) des variétés Précoce de Gembloux (rouge) et W0672 (bleu) allant de 1 à 61 jours

5.3. Relations entre traits racinaires

5.3.1. Relation entre la vitesse d'élongation et la LAUZ des racines primaires

La relation entre la vitesse moyenne d'élongation et la longueur apicale non ramifiée (LAUZ) est illustrée à la Figure 30. Un modèle linéaire a été appliqué afin d'évaluer l'existence d'un lien entre ces deux paramètres.

La dispersion des points autour de la droite de régression est importante ($R^2 = 0,092$), indiquant que **la vitesse de croissance n'explique qu'une part limitée de la variabilité de la LAUZ.**



Néanmoins, la régression met en évidence une pente positive estimée à +1,26 cm de LAUZ par cm/jour de croissance. Cette pente est significative ($p = 0,0032$), ce qui suggère qu'une vitesse d'élongation plus élevée est généralement associée à des valeurs de LAUZ plus grandes.

Figure 30 - Relation entre la croissance moyenne et la LAUZ des racines primaires

5.3.2. Relation entre la vitesse d'élongation et le diamètre des racines primaires

La Figure 31 illustre la relation entre le diamètre moyen et la vitesse moyenne d'élongation des racines primaires.

L'analyse par régression linéaire ne met pas en évidence de relation significative entre ces deux paramètres ($p = 0,58$).

Le coefficient de détermination est très faible ($R^2 = 0,003$), indiquant que **le diamètre n'explique pratiquement aucune part de la variabilité observée de la vitesse d'élongation.**

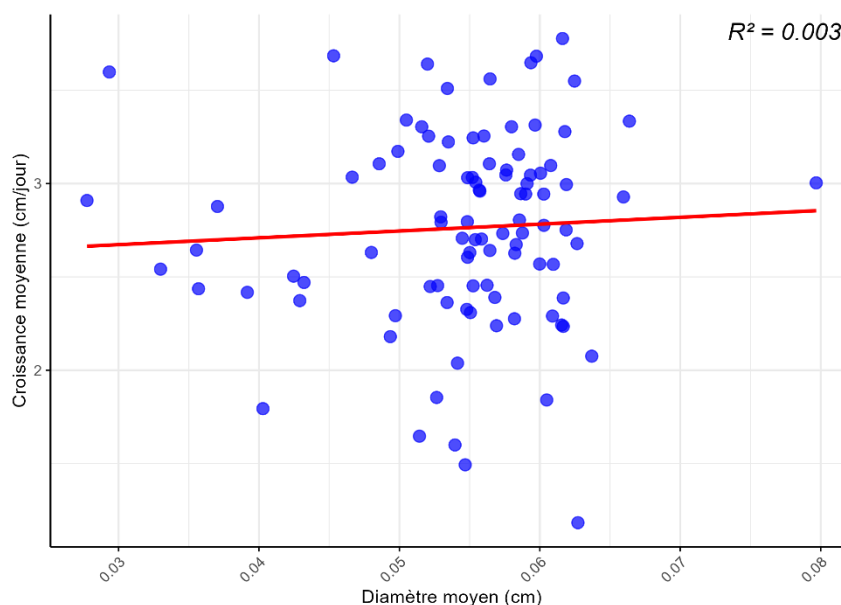


Figure 31 - Relation entre le diamètre moyen et la vitesse d'élongation des racines primaires

5.3.3. Évolution du diamètre le long de la racine

La Figure 32 présente l'évolution du diamètre moyen des racines séminales en fonction de la position relative le long de la racine. La position relative correspond à la distance le long de la racine exprimée en proportion de la longueur totale (0 = base, 1 = apex). Les positions ont été regroupées en classes régulières de 0,05, pour lesquelles le diamètre moyen et l'écart-type ont été calculés. Ces valeurs ont ensuite été représentées sous forme d'une courbe moyenne accompagnée d'un ruban correspondant à ± 1 écart type.

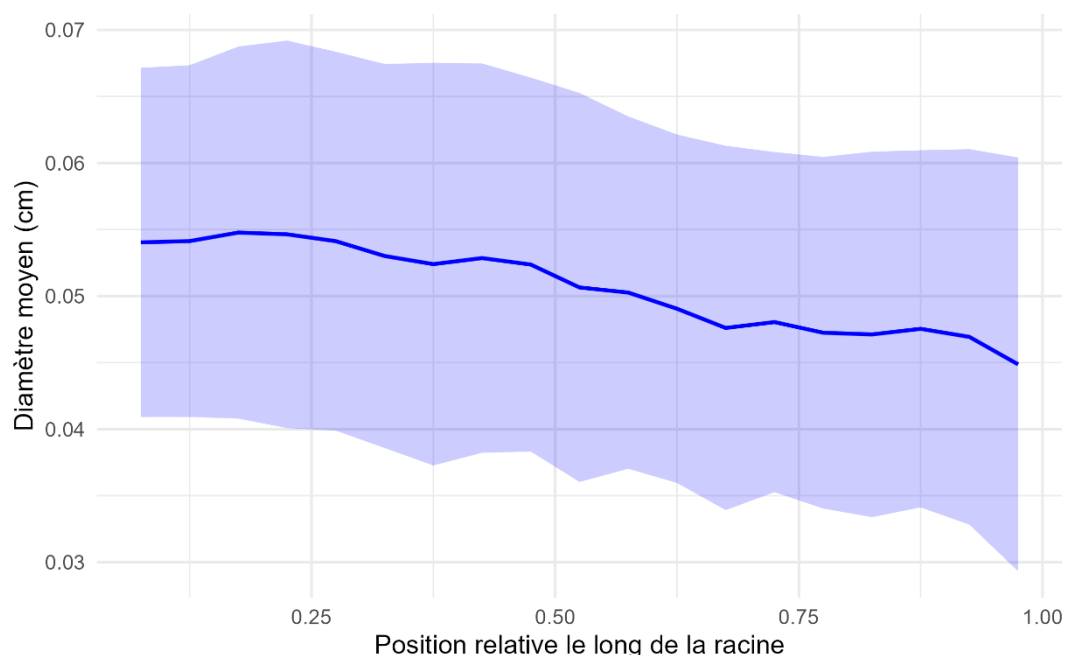


Figure 32 - Évolution du diamètre des racines séminales le long de la racine (0=base, 1=apex)

Le diamètre moyen reste relativement stable dans le quart proximal de la racine puis tend à diminuer progressivement vers l'apex. L'intervalle d'erreur reflète une variabilité importante entre les observations.

Pour chaque racine, une régression linéaire du diamètre en fonction de la position relative a été réalisée, puis les pentes obtenues ont été testées contre zéro. Cette analyse montre une diminution significative du diamètre le long de la racine ($p < 0,001$).

5.3.4. Analyse en composantes principales des racines primaires

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée dans le but de résumer l'information en réduisant le nombre de variables. Seules les racines primaires, pour lesquelles les données étaient complètes, ont été retenues pour cette analyse. Les valeurs propres obtenues pour chaque composante principale sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5 - Valeurs propres des composantes principales

Dimension	Eigenvalue	Variance (%)	Variance cumulée (%)
1	1,80	36,06	36,06
2	1,08	21,63	57,69
3	0,92	18,38	76,07
4	0,73	14,52	90,59
5	0,47	9,41	100

La Figure 33 illustre le plan factoriel des individus, construit à partir des deux premières composantes principales.

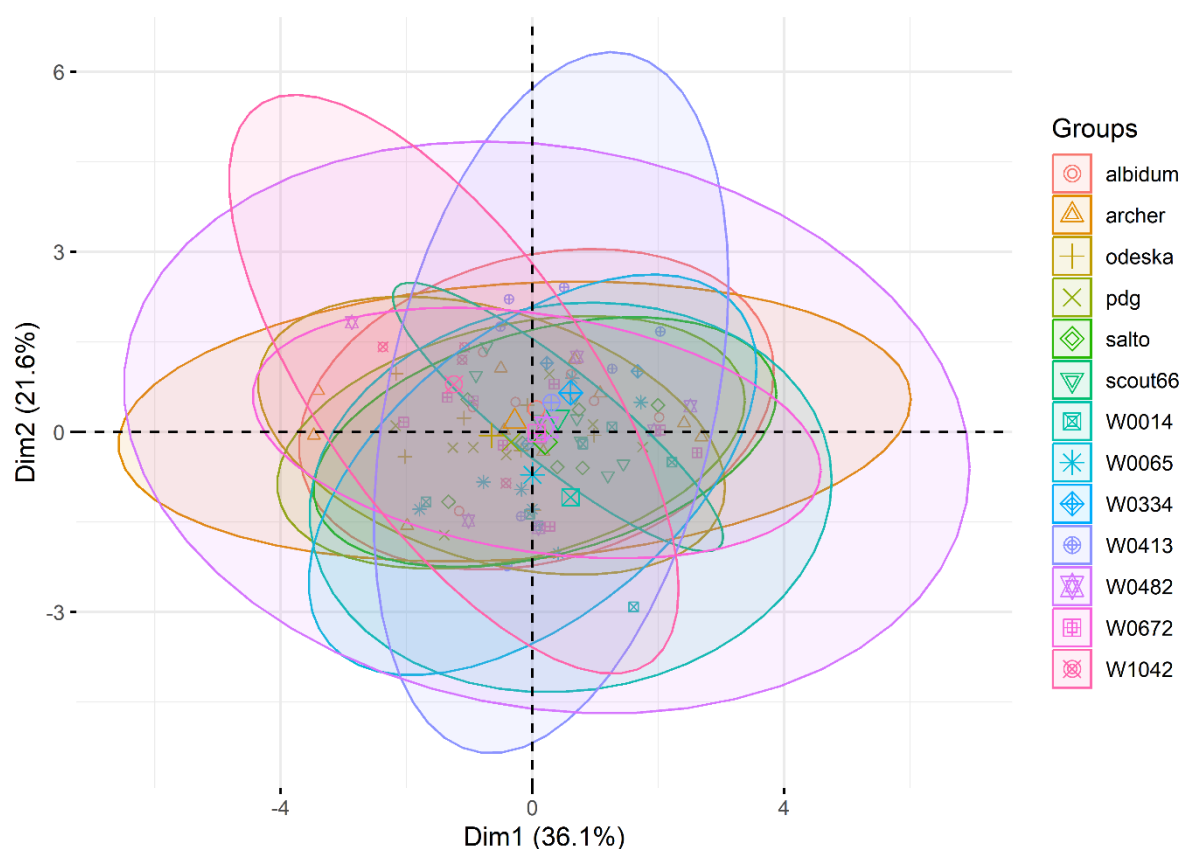


Figure 33 - Plan factoriel des individus de l'ACP des racines primaires

Ce plan montre un regroupement global des variétés au centre et révèle un fort recouvrement entre elles. Aucune variété ne se distingue significativement des autres. Certaines variétés, comme W0482, présentent des ellipses relativement larges. Cela traduit une variabilité intra-variétale élevée.

À l'inverse, certaines variétés présentent des ellipses plus resserrées, ce qui suggère une plus grande homogénéité phénotypique au sein de ces groupes. La variété Scout-66 se distingue particulièrement par une ellipse très compacte indiquant une faible dispersion des individus dans l'espace défini par les deux premières composantes principales.

Le cercle des corrélations entre les différentes variables est exposé à la Figure 34.

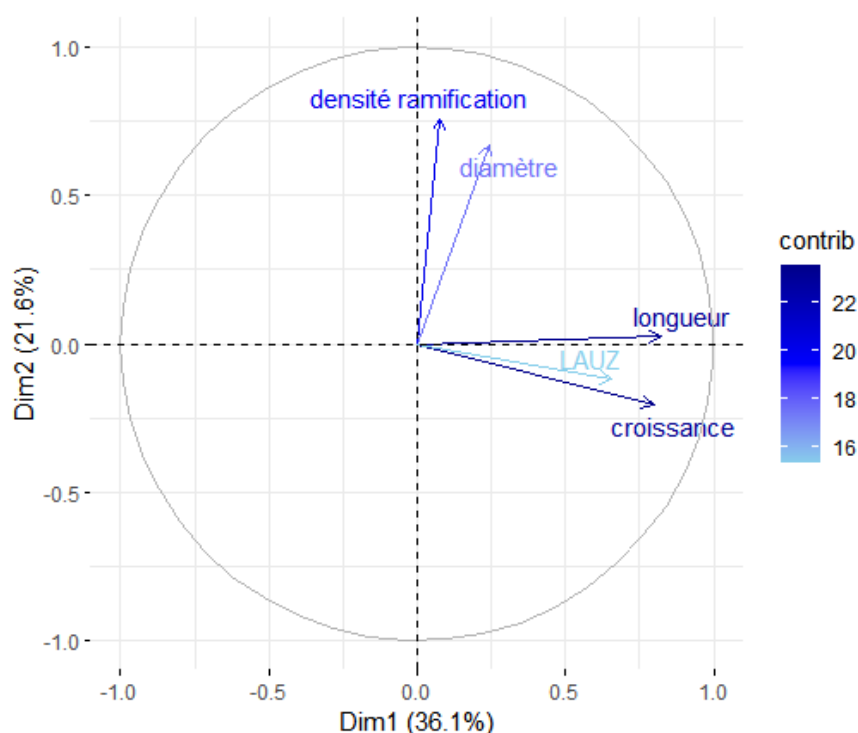


Figure 34 - Cercle des corrélations de l'ACP des racines primaires

L'absence de variables orientées dans des directions opposées sur la première dimension indique qu'aucune corrélation négative notable n'est observée entre elles.

La dimension 1 est principalement associée aux variables *longueur*, la vitesse de *croissance* et *LAUZ*, qui pointent dans la même direction, suggérant une corrélation positive entre ces caractéristiques. Parmi elles, la vitesse de *croissance* et la *longueur* présentent les contributions les plus élevées à la variance expliquée.

Par ailleurs, la variable *densité de ramification* est orientée dans une direction proche de celle du *diamètre* sur la deuxième dimension. Cela suggère une corrélation positive entre ces deux variables.

Enfin, l'orientation quasi perpendiculaire du *diamètre* par rapport à la *LAUZ* et à la vitesse de *croissance* indique une corrélation faible voire inexistante entre ces traits.

6. Discussion

6.1. Analyse des organes foliaires et racinaires

L'analyse du nombre de feuilles et de racines séminales à un stade précoce de développement met en évidence des variations légèrement significatives entre les variétés étudiées.

Au niveau des feuilles, la variété moderne Albidum présente un développement foliaire plus rapide, avec un nombre moyen de feuilles significativement supérieur à celui des autres variétés après 15 jours. À l'inverse, la variété W0014 montre un développement foliaire plus lent, se traduisant par un nombre de feuilles inférieur à la moyenne.

Concernant le système racinaire, la variété W0413 se distingue nettement par un nombre moyen de racines séminales supérieur à celui de toutes les autres variétés, ce qui, d'après des travaux antérieurs, pourrait favoriser l'acquisition de nutriments chez le blé (Wang et al., 2006). À l'opposé, la variété W0065 présente le plus faible nombre de racines séminales. Ensuite, les variétés modernes présentent une homogénéité plus marquée que les variétés traditionnelles en matière de nombre de racines. Cette observation pourrait s'expliquer par l'homogénéisation du pool génétique résultant des processus de sélection variétale modernes (Jaradat, 2013). Enfin, l'étude de Baca Cabrera (2025) a rapporté une diminution du nombre de racines au cours de la sélection de variétés modernes mais cette tendance n'a pas été confirmée dans la présente étude.

La comparaison des deux analyses met en évidence des différences de stratégies d'allocation des ressources entre les variétés étudiées. La variété moderne Albidum, qui présente un nombre de feuilles élevé mais un nombre moyen de racines séminales, semble privilégier le développement précoce des parties aériennes. À l'inverse, W0413 affiche un nombre de racines séminales important associé à un nombre moyen de feuilles relativement faible, ce qui suggère une allocation préférentielle vers le développement précoce du système racinaire.

6.2. Analyse des traits racinaires structurels

L'analyse des traits racinaires structurels entre des variétés génétiquement variées met en évidence une diversité phénotypique de certains traits.

6.2.1. Vitesse d'élongation

Étudier la croissance des racines est essentiel pour comprendre comment les plantes s'adaptent à leur environnement et pour prédire leur production, en particulier dans des conditions environnementales sous-optimales (Pagès et al., 2010). Les résultats quantitatifs de la vitesse d'élongation obtenus lors de cette expérience concordent avec ceux obtenus par Bingham et Wu (2011).

Tout d'abord, des différences significatives sont observées pour la vitesse d'élongation des racines séminales. Deux variétés de la collection Watkins, W0014 et W0334, se distinguent par une vitesse de croissance supérieure aux autres. De même, deux variétés Watkins, W0065 et W1042, présentent une vitesse d'élongation significativement inférieure. Cela pourrait indiquer un développement racinaire réduit au cours du temps pour ces deux variétés.

Les variétés présentent des écarts types relativement élevés. Cela traduit une hétérogénéité intra-variétale marquée.

Une observation intéressante est que la variété présentant un faible nombre de racines séminales, W0065, se distingue également par une vitesse d'élongation réduite. À l'inverse, la variété W0334, caractérisée par un nombre élevé de racines séminales, présente également une vitesse d'élongation supérieure. Cette tendance pourrait traduire une différence de stratégie d'allocation des ressources vers le système racinaire entre ces deux variétés.

Comme pour le nombre de racines séminales, les variétés modernes de la collection INRAE présentent une homogénéité de vitesse d'élongation plus marquée que celle observée chez les *landraces*.

6.2.2. Diamètre des racines

Le diamètre des racines constitue un trait fondamental, à la fois pour la structuration du système racinaire et pour sa fonctionnalité, notamment en matière de prise d'eau.

Pour les racines séminales, des différences significatives sont observées entre certaines variétés. La variété W0672 présente le diamètre le plus fin, tandis que les variétés W0482 et Scout66 affichent les diamètres les plus élevés. Le diamètre moyen de la variété la plus épaisse est ainsi supérieur d'environ 30 % à celui de la plus fine. Ces résultats contrastent avec certains résultats de la littérature. L'étude de Baca Cabrera (2025) rapporte en effet une grande stabilité de ce trait entre les variétés traditionnelles et modernes, et Peng *et al.* (2019) n'ont pas observé de variations significatives du diamètre moyen sur un ensemble de dix variétés américaines.

Or, comme indiqué précédemment, le diamètre racinaire est un paramètre structurel essentiel, notamment en termes d'investissement en biomasse. Par exemple, des racines de plus petit diamètre sont souvent associées à une longueur totale plus importante, ce qui permet, à investissement équivalent, de développer un système racinaire plus étendu (Q. Wu et al., 2016).

Par ailleurs, un diamètre plus élevé peut faciliter la pénétration dans des sols compacts (Materechera et al., 1992). Ainsi, selon les conditions pédologiques rencontrées, il pourrait être pertinent de sélectionner des variétés présentant soit des racines plus fines, pour maximiser l'exploration du sol, soit des racines plus épaisses, pour améliorer la capacité de pénétration. Les différences phénotypiques mises en évidence dans ce mémoire pourraient donc constituer une base pour orienter la sélection variétale en fonction des besoins spécifiques.

Pour les racines latérales, le test de Dunn a mis en évidence des différences significatives entre toutes les variétés. Toutefois, comme précisé dans la partie Résultats, le test de Kruskal-Wallis peut se révéler particulièrement sensible aux écarts minimes lorsque la taille de l'échantillon est importante, ce qui augmente la probabilité de détecter des différences statistiques sans réelle signification biologique. Or, la plage observée, comprise entre 0,021 et 0,024 cm de diamètre, reste extrêmement réduite. De ce fait, ces différences semblent avoir peu de pertinence pratique pour la sélection variétale.

6.2.3. Ramification de la racine principale

Les racines latérales constituent un élément majeur de l'architecture racinaire et jouent un rôle essentiel dans la croissance et le développement des plantes. Elles favorisent l'acquisition de l'eau et des nutriments en augmentant la longueur et la surface d'absorption du système racinaire, contribuent à la résistance aux stress et renforcent l'ancrage de la plante dans le sol (Nibau et al., 2008). Toutefois, la production et l'entretien des racines latérales impliquent un investissement métabolique important, pouvant mobiliser une part substantielle du carbone issu de la photosynthèse.

L'étude de Zhan *et al.* (2015) portant sur le maïs a montré qu'une faible densité de ramification des racines latérales améliore la tolérance à la sécheresse, grâce à un coût métabolique plus faible et à des racines latérales plus longues. Ainsi, la densité de ramification pourrait constituer une cible pertinente pour la sélection variétale, en fonction des conditions pédoclimatiques visées.

Néanmoins, les résultats de la présente étude ne mettent pas en évidence de différence significative de densité de ramification latérale entre les variétés testées. L'homogénéité observée ne permet donc pas d'identifier une variété à privilégier pour l'amélioration de ce trait.

Pour exploiter pleinement son potentiel, une alternative possible serait d'agir sur la sensibilité des racines latérales aux hormones végétales. L'acide abscissique, par exemple, est connu pour inhiber leur croissance (Zhao et al., 2014). Une modulation de cette sensibilité, par sélection variétale ou via des traitements hormonaux ciblés, pourrait permettre d'ajuster la densité de ramification en fonction des contraintes environnementales, réduisant les coûts métaboliques en conditions limitantes ou favorisant l'exploration latérale en conditions favorables.

Les résultats relatifs à la LAUZ ne montrent pas de différences significatives entre les variétés étudiées, suggérant que ce trait est globalement homogène au sein du matériel analysé. Dès lors, pour son implémentation dans certains modèles racinaires tels que CRootBox, l'utilisation d'une valeur standard du froment pour ce paramètre apparaît possible sans perte notable de précision.

6.3. Analyse des traits racinaires fonctionnels par modélisation

6.3.1. Comparaison de la conductance totale du système racinaire

La modélisation a permis d'estimer, pour chaque variété, la conductance racinaire structurelle (Krs) à partir de 100 simulations stochastiques par génotype. Les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles mesurées pour le froment par Baca Cabrera *et al.* (2025), ce qui conforte la validité de l'approche.

De nombreuses différences significatives sont observées entre les variétés. Certaines variétés, telles que Scout66 et W0672, montrent des conductances supérieures aux autres. D'autres variétés, W0065 et W1042, ont des conductances racinaires significativement inférieures.

Pour comprendre ces différences de conductance, il convient d'examiner les traits structurels préalablement analysés. Les deux variétés présentant les valeurs les plus élevées, W0672 et Scout-66, y parviennent par des stratégies distinctes mais aboutissant à des conductances similaires. W0672 possède le plus petit diamètre racinaire, compensé par la densité de ramification latérale la plus élevée. À l'inverse, Scout-66 affiche le plus grand diamètre racinaire, associé à une densité de ramification proche de la moyenne.

Ces résultats illustrent la complexité de l'identification des traits racinaires favorisant une plus grande conductance : différentes combinaisons architecturales peuvent conduire à des performances équivalentes. Ce constat rejoint celui de Klein *et al.* (2020), qui montre que plusieurs combinaisons distinctes de traits racinaires peuvent conduire à des performances similaires. Cela souligne l'importance de considérer l'ensemble des interactions entre traits racinaires, plutôt que de se focaliser sur un seul caractère isolé, afin d'orienter plus efficacement les programmes de sélection pour un environnement spécifique (Klein et al., 2020).

Pour les deux variétés présentant les valeurs de conductance les plus faibles, W0065 et W1042, la situation est différente. Pour la majorité des traits structurels, leurs valeurs moyennes sont comparables à celles observées chez les autres variétés. En revanche, elles se distinguent toutes deux par les vitesses d'élongation les plus faibles de l'ensemble des variétés. Ce résultat met en évidence l'influence déterminante que peut avoir la vitesse d'élongation sur la conductance des systèmes racinaires juvéniles.

Après avoir mis en évidence des différences significatives de Krs entre les variétés, il est essentiel d'examiner les implications fonctionnelles d'une conductance élevée ou, au contraire, réduite.

Une forte conductivité hydraulique peut être avantageuse lorsque les plantes doivent rapidement exploiter l'eau disponible en surface après de petites pluies ou dans des contextes compétitifs où la vitesse d'extraction d'eau détermine le succès (Eissenstat, 1997). Cependant, en agriculture pluviale et sous climat sec, un haut niveau de conductance n'est pas toujours souhaitable : une conductivité plus faible en début de cycle peut permettre d'économiser l'eau pour les stades reproductifs, améliorant ainsi le rendement final en conditions de sécheresse (Baca Cabrera et al., 2025; Eissenstat, 1997).

Ainsi, l'intérêt agronomique d'une forte conductivité hydraulique dépend du contexte : elle peut être bénéfique pour maximiser l'absorption rapide d'eau, mais elle peut aussi nuire en entraînant une déplétion précoce des réserves hydriques disponibles (Eissenstat, 1997).

Une fois que les conditions agronomiques et environnementales ont été évaluées, les variétés peuvent alors être sélectionnées pour leur haute ou faible valeur de conductance racinaire.

Toutefois, bien que cela dépasse le cadre de ce travail, il convient ici de souligner l'importance de l'aspect génétique dans la sélection. Contrairement à certains traits structuraux simples, pour lesquels des régions génomiques associées ont déjà été identifiées, la conductance racinaire (K_{rs}) constitue un caractère complexe, régi par de nombreux gènes et fortement modulé par l'environnement. À ce jour, aucune région génomique spécifiquement liée à la K_{rs} n'a été identifiée chez le blé, ce qui limite la possibilité d'agir directement sur ce trait par sélection génétique (Baca Cabrera et al., 2025).

6.3.2. Évolution de la conductance racinaire

La modélisation de l'évolution de la K_{rs} met en évidence une augmentation non linéaire avec l'âge pour les deux variétés. La hausse est particulièrement marquée au cours des 30 premiers jours, puis suivie d'un aplatissement de la courbe. Ce profil non linéaire, déjà décrit dans la littérature (Baca Cabrera et al., 2024; Meunier et al., 2020), reflète une phase initiale de forte augmentation liée à la croissance rapide du système racinaire, qui ajoute de nouvelles conductances au réseau hydraulique. Il est ensuite suivi d'un ralentissement dû à l'augmentation de la proportion de segments racinaires moins conductifs avec l'âge. Cette évolution entraîne des limitations hydrauliques aux stades plus avancés du développement.

Les deux variétés présentent une dynamique similaire, mais la variété W0672 se distingue par une augmentation plus rapide de K_{rs}, atteignant plus tôt un plateau situé à un niveau supérieur à celui observé chez la variété Précoce de Gembloux.

L'analyse des traits racinaires structuraux ne révèle pas de différence statistiquement significative entre les deux variétés, mais certaines tendances se dégagent : Précoce de Gembloux présente des diamètres moyens plus élevés pour les racines séminales et latérales, tandis que W0672 se caractérise par une densité de ramification latérale plus importante. Les autres traits étudiés présentent des valeurs comparables.

Cette analyse, à la lumière des résultats obtenus, suggère qu'une densité élevée de ramification latérale contribue davantage à une conductance racinaire élevée qu'un diamètre important. Cette hypothèse est étayée par Meunier *et al.* (2020) qui montrent que la densité de ramification latérale de la racine primaire est l'un des paramètres les plus déterminants influençant la K_{rs}. Ce résultat s'explique par le rôle central des racines latérales qui représentent le principal site d'absorption (Meunier et al., 2020).

6.3.3. Intérêt de la modélisation

Les résultats issus de la modélisation se sont révélés particulièrement utiles. L'évaluation de la Krs pour les différentes variétés a permis de synthétiser les traits structuraux mesurés en une seule valeur et de mettre en évidence différentes stratégies possibles pour atteindre une Krs donnée. La modélisation a également offert la possibilité d'étendre l'analyse dans le temps afin d'évaluer des traits fonctionnels sur une période plus longue.

Les résultats de ce mémoire soulignent que la combinaison d'approches empiriques et de modélisation possède un fort potentiel pour accélérer la recherche. Une telle approche constitue un apport précieux pour les futurs travaux sur le rôle fonctionnel des racines et les processus d'absorption d'eau dans un contexte de conditions environnementales changeantes (Baca Cabrera et al., 2024).

6.4. Analyse des relations entre traits racinaires

6.4.1. Indicateurs prédictifs de la vitesse d'élongation

La vitesse d'élongation constitue un trait clé dans les modèles de système racinaire, car elle influence directement la dynamique de développement du système. Cependant, sa mesure est contraignante, nécessitant un matériel ou des conditions expérimentales spécifiques. Une alternative intéressante serait de pouvoir l'estimer à partir d'indicateurs prédictifs plus faciles à mesurer. Deux de ces indicateurs ont été évalués dans le cadre de ce mémoire.

Résultats relatifs à la LAUZ

L'analyse des résultats met en évidence une pente positive significative entre la LAUZ et la vitesse de croissance des racines primaires, indiquant que ces deux paramètres sont liés. La relation linéaire entre ces deux paramètres est également démontrée dans la littérature scientifique (Pagès et al., 2010; Pellerin & Tabourel, 1995). L'hypothèse retenue par Pellerin et Tabourel (1995) est que les racines latérales émergent après un temps constant écoulé depuis la formation de leur primordium. Ainsi, une racine qui croît plus rapidement développera une LAUZ proportionnellement plus longue qu'une racine à croissance plus lente.

Néanmoins, les résultats obtenus dans ce mémoire révèlent aussi une forte dispersion des mesures. La faible valeur de R^2 indique que la relation entre ces deux paramètres n'explique qu'une part limitée de la variabilité observée. Dans l'étude de Pellerin et Tabourel (1995), cette relation s'avérait nettement plus marquée.

Les résultats obtenus dans ce mémoire confirment l'existence d'une relation positive entre la LAUZ et la vitesse de croissance des racines primaires, en accord avec les observations rapportées dans la littérature. Toutefois, la dispersion importante des données et la faible valeur de R^2 indiquent que la capacité prédictive de la LAUZ sur la vitesse de croissance semble plus limitée

que ce qui avait été décrit précédemment, notamment dans les travaux de Pellerin et Tabourel (1995). La pertinence de la LAUZ en tant qu'indicateur prédictif de la vitesse de croissance apparaît donc réduite.

Pour finir, il convient de souligner que la mesure de la LAUZ en conditions de champ reste délicate en raison de la fragilité des systèmes racinaires. Par exemple, la méthode du *shovelomics*, couramment utilisée sur le terrain, entraîne la destruction d'une partie du système racinaire, rendant impossible la récupération complète de la LAUZ.

Résultats relatifs au diamètre

Pour plusieurs espèces, une relation positive entre le diamètre et la vitesse de croissance a été mise en évidence. Pagès *et al.* (2014) ont notamment observé une corrélation entre ces deux paramètres chez six espèces, dont le maïs (*Zea mays*). L'hypothèse sous-jacente est que la taille du diamètre reflète la taille du méristème apical qui est lui-même lié à l'élongation racinaire (Q. Wu *et al.*, 2016).

Dans le présent mémoire, cette relation a été testée chez le froment (*Triticum aestivum subsp. aestivum*), mais l'analyse n'a pas mis en évidence de corrélation significative. De plus, une forte dispersion des valeurs a été observée, indiquant une grande variabilité entre les individus.

Résultats de l'analyse en composantes principales

Les résultats de l'ACP permettent de confirmer les tendances mises en évidence par les analyses de corrélation présentées ci-dessus. Le cercle des corrélations construit à partir des deux premières dimensions révèle une forte association entre la LAUZ et la vitesse d'élongation, ces deux variables étant orientées dans la même direction. À l'inverse, la quasi-perpendicularité entre le diamètre et la vitesse d'élongation suggère l'absence de corrélation entre ces deux paramètres. Il convient toutefois d'interpréter ces résultats avec prudence, les deux premières dimensions ne représentant que 57 % de la variabilité totale des données. En outre, le cercle des corrélations met également en évidence la relation attendue entre la longueur des racines primaires et leur vitesse d'élongation, tandis que la densité de ramification apparaît faiblement corrélée, voire indépendante, de ces paramètres.

En résumé, les résultats de ce mémoire confirment l'existence d'une relation positive entre la LAUZ et la vitesse d'élongation des racines primaires, en accord avec les travaux antérieurs. Toutefois, la dispersion importante des données et la faible valeur de R^2 indiquent que cette relation n'explique qu'une part limitée de la variabilité observée, ce qui réduit la pertinence de la LAUZ en tant qu'indicateur prédictif fiable de la vitesse d'élongation.

En revanche, aucune corrélation significative n'a été mise en évidence entre le diamètre et la vitesse d'élongation, et la forte variabilité interindividuelle observée suggère que ce paramètre n'est pas non plus un bon prédicteur dans nos conditions expérimentales.

6.4.2. Évolution du diamètre le long de la racine

Le diamètre racinaire constitue un paramètre central dans les modèles structurels et fonctionnels du système racinaire. Ce trait joue un rôle déterminant dans l'architecture, la dynamique de croissance et la fonctionnalité hydraulique des racines. Dans certains modèles structuraux, tels qu'ArchiSimple, la vitesse d'élongation est directement calculée en fonction du diamètre (Pagès et al., 2014). L'évaluation de ce paramètre nécessite donc une attention particulière.

Une hypothèse couramment admise dans la littérature a été testée dans cette étude : celle d'un diamètre racinaire constant. En effet, de nombreux travaux, ainsi que plusieurs modèles portant sur les monocotylédones, supposent implicitement que le diamètre à l'émergence demeure constant au cours du développement racinaire. Par exemple, le rayon racinaire est fixé dans le modèle structurel CRootBox (Schnepf et al., 2018).

Les résultats de ce mémoire vont à l'encontre cette hypothèse. En effet, l'analyse statistique de la relation entre le diamètre et la position relative le long de la racine montre une diminution significative du diamètre ($p < 0,001$).

Ce constat est en accord avec les travaux menés par J. Wu (2015) et par Heymans *et al.* (2021) sur le maïs (*Zea mays*). Ces études ont mis en évidence un profil de diamètre décroissant au sein des racines séminales et nodales. De même, Q. Wu (2016) démontre également une diminution du diamètre des racines latérales du maïs. Enfin, ce phénomène a également été observé chez les jeunes pousses de chêne (*Quercus robur*) (Pages, 1995).

La prise en compte du profil décroissant du diamètre le long des racines séminales chez le blé pourrait contribuer à améliorer les modèles racinaires. Le diamètre étant un paramètre central dans l'estimation de traits (e.g. surface racinaire, vitesse d'élongation, fonctionnalités hydrauliques), prendre en compte cette variation longitudinale permettrait de mieux représenter le fonctionnement réel du système racinaire et d'affiner les prédictions relatives à l'acquisition de ressources par la plante.

6.5. Perspectives

Plusieurs perspectives peuvent être dégagées afin d'améliorer la robustesse et la pertinence des données obtenues dans ce mémoire.

Tout d'abord, les expériences présentées dans ce mémoire ont été conduites en conditions strictement contrôlées. Or, le lien entre le phénotypage réalisé en conditions contrôlées et la réalité des conditions de champ demeure débattu (Collet, 2022). Par ailleurs, l'utilisation de rhizotrons limite le caractère naturel du développement racinaire, en contraignant les racines à croître dans un plan bidimensionnel. Afin de vérifier la pertinence des résultats sur le terrain, il serait pertinent de compléter les résultats obtenus par des données acquises directement en conditions de champ.

Ensuite, la paramétrisation utilisée pour la modélisation pourrait être améliorée. Certains paramètres reposent en effet sur des valeurs par défaut proposées dans le dépôt GitHub de CRootBox pour le blé, mais celles-ci ne correspondent pas toujours aux observations de ce mémoire, ni aux données de la littérature. Par exemple, le nombre maximal de racines séminales est fixé à 16, alors qu'il n'a jamais dépassé six dans cette étude et demeure limité à dix selon Collet (2022). Une révision de ces paramètres permettrait ainsi d'améliorer la fiabilité des simulations. Par ailleurs, dans la modélisation de la conductance hydraulique totale (Krs), l'utilisation de paramètres issus du maïs (*Zea mays*) a été nécessaire en raison du manque de données disponibles pour le blé. La caractérisation spécifique de ces paramètres chez le blé constituerait donc une étape importante pour renforcer la pertinence de la modélisation.

Enfin, l'anatomie racinaire n'a pas été intégrée dans ce mémoire, notamment dans l'évaluation de la Krs. Pourtant, certains paramètres architecturaux, tels que le diamètre, influencent directement l'organisation anatomique (Heymans et al., 2020), et plusieurs traits anatomiques modulent les propriétés hydrauliques (Baca Cabrera et al., 2024). Une intégration future des traits anatomiques offrirait de nouvelles perspectives pour mieux relier structure et fonction du système racinaire.

Ces perspectives ouvrent des voies d'amélioration permettant à la fois de renforcer la robustesse des résultats et d'approfondir la compréhension du fonctionnement racinaire.

Pour finir, ce mémoire n'a permis d'explorer qu'une fraction très limitée de la diversité génétique présente chez le blé. Néanmoins, les résultats obtenus mettent en évidence une variabilité phénotypique notable, qui souligne l'intérêt d'étendre l'analyse. La réalisation de *screenings* à plus grande échelle pourrait ainsi offrir une vision plus complète de cette diversité et constituer une base précieuse pour orienter la sélection variétale vers des cultivars mieux adaptés et plus résilients.

7. Conclusion

Ce mémoire s'inscrit dans les recherches visant à mieux comprendre et à améliorer les systèmes racinaires, longtemps négligés en raison des contraintes pratiques liées à leur étude.

Le premier objectif de ce travail était d'étudier la diversité phénotypique des traits racinaires chez le froment. En effet, la diversité génétique encore inexploitée des *landraces*, récemment mise en évidence, constitue une ressource précieuse pour développer des cultivars plus résilients face aux changements climatiques. Dans cette perspective, leur caractérisation phénotypique apparaît comme une étape essentielle, car elle permet d'orienter plus efficacement la sélection variétale vers des idéotypes racinaires mieux adaptés et plus résistants.

Le deuxième objectif de ce travail était d'examiner les relations entre différents traits racinaires. De fait, l'étude des systèmes racinaires se trouve limitée par la difficulté d'observer et d'analyser les racines *in situ*, en particulier lorsqu'il s'agit de traits dynamiques. Dans ce contexte, l'analyse des relations entre traits apparaît comme une alternative potentielle, puisqu'elle pourrait permettre de prédire, à partir de traits plus accessibles, certaines caractéristiques difficiles à mesurer.

Pour répondre à ces objectifs, deux expériences ont été menées en conditions contrôlées. Treize variétés génétiquement éloignées ont été cultivées en rhizotrons afin de suivre dynamiquement le développement de leur système racinaire. Les racines ont ensuite été numérisées avec le logiciel SmartRoot pour extraire différents traits structurels. Enfin, une modélisation fonctionnelle des systèmes racinaires a été réalisée à l'aide du modèle MARSHAL.

Les analyses comparatives entre les variétés étudiées mettent en évidence une diversité phénotypique pour certains traits racinaires. Des différences significatives apparaissent notamment pour la vitesse d'élongation et le diamètre des racines. Cette variabilité constitue un levier potentiel pour orienter la sélection variétale selon les objectifs visés et les conditions environnementales. En revanche, aucune différence significative n'a été détectée pour la densité de ramification latérale ni pour la LAUZ.

La modélisation basée sur les résultats expérimentaux a permis de comparer la conductance racinaire totale entre variétés. Les simulations montrent que différentes combinaisons de traits structuraux peuvent aboutir à des niveaux similaires de conductance et soulignent l'importance de la vitesse d'élongation dans la conductivité hydraulique. Enfin, l'évolution de la Krs apparaît non linéaire avec l'âge pour les deux variétés étudiées.

Par ailleurs, l'analyse des relations entre traits racinaires n'a pas mis en évidence le diamètre ni la LAUZ comme indicateurs prédictifs fiables de la vitesse d'élongation. En revanche, une diminution significative du diamètre le long de la racine a été observée.

Enfin, différentes perspectives peuvent être envisagées afin d'améliorer les résultats obtenus dans ce mémoire. Les observations réalisées en conditions contrôlées gagneraient à être validées par des expérimentations en conditions de champ. Par ailleurs, une révision des paramètres utilisés pour la modélisation, adaptée spécifiquement au blé, permettrait d'en renforcer la fiabilité. Enfin, l'intégration de traits anatomiques constituerait une étape importante pour relier plus finement structure et fonction du système racinaire.

Pour conclure, le présent mémoire met en évidence la variabilité phénotypique issue de la diversité génétique du froment. L'étude n'a porté que sur une infime partie de cette diversité, mais elle pourrait constituer une première étape vers des recherches de plus grande ampleur, susceptibles d'orienter plus efficacement la sélection variétale et de favoriser le développement de cultivars plus résilients.

8. Bibliographie

- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., ... Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143-147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Atkinson, D. (2000). Root Characteristics : Why and What to Measure. In A. L. Smit, A. G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin, & S. C. van de Geijn (Éds.), *Root Methods : A Handbook* (p. 1-32). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04188-8_1
- Atkinson, J. A., Rasmussen, A., Traini, R., Voß, U., Sturrock, C., Mooney, S. J., Wells, D. M., & Bennett, M. J. (2014). Branching Out in Roots : Uncovering Form, Function, and Regulation1. *Plant Physiology*, 166(2), 538-550. <https://doi.org/10.1104/pp.114.245423>
- Awika, J. M. (2011). Major Cereal Grains Production and Use around the World. In J. M. Awika, V. Piironen, & S. Bean (Éds.), *ACS Symposium Series* (Vol. 1089, p. 1-13). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1089.ch001>
- Baca Cabrera, J. C., Vanderborght, J., Boursiac, Y., Behrend, D., Gaiser, T., Nguyen, T. H., & Lobet, G. (2025). Decreased root hydraulic traits in German winter wheat cultivars over 100 years of breeding. *Plant Physiology*, 198(1), kiaf166. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiaf166>
- Baca Cabrera, J. C., Vanderborght, J., Couvreur, V., Behrend, D., Gaiser, T., Nguyen, T. H., & Lobet, G. (2024). Root hydraulic properties : An exploration of their variability across scales. *Plant Direct*, 8(4), e582. <https://doi.org/10.1002/pld3.582>

- Bagale, S., Enesi, R. O., & Gorim, L. Y. (2025). An overview of root traits and ideotypes for improving crop productivity and addressing agronomic challenges. *Rhizosphere*, 34, 101105. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101105>
- Balfourier, F., Bouchet, S., Robert, S., De Oliveira, R., Rimbert, H., Kitt, J., Choulet, F., International Wheat Genome Sequencing Consortium, BreedWheat Consortium, & Paux, E. (2019). Worldwide phylogeography and history of wheat genetic diversity. *Science Advances*, 5(5), eaav0536. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav0536>
- Bernardo, S., Marguerit, E., Ollat, N., Gambetta, G. A., Saint Cast, C., & de Miguel, M. (2025). Root system ideotypes : What is the potential for breeding drought-tolerant grapevine rootstocks? *Journal of Experimental Botany*, 76(11), 2970-2984. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf006>
- Bingham, I. J., & Wu, L. (2011). Simulation of wheat growth using the 3D root architecture model SPACSYS : Validation and sensitivity analysis. *European Journal of Agronomy*, 34(3), 181-189. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.01.003>
- Bishopp, A., & Lynch, J. P. (2015). The hidden half of crop yields. *Nature Plants*, 1(8), 15117. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.117>
- Chang'a, L. B., Japheth, L. P., Kijazi, A. L., Zobanya, E. H., Muhoma, L. F., Mliwa, M. A., & Chobo, J. S. (2021). Trends of Temperature Extreme Indices over Arusha and Kilimanjaro Regions in Tanzania. *Atmospheric and Climate Sciences*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.4236/acs.2021.113031>
- Charmet, G. (2011). Wheat domestication : Lessons for the future. *Comptes Rendus Biologies*, 334(3), 212-220. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.12.013>
- Cheng, S., Feng, C., Wingen, L. U., Cheng, H., Riche, A. B., Jiang, M., Leverington-Waite, M., Huang, Z., Collier, S., Orford, S., Wang, X., Awal, R., Barker, G., O'Hara, T., Lister, C.,

- Siluveru, A., Quiroz-Chávez, J., Ramírez-González, R. H., Bryant, R., ... Griffiths, S. (2024). Harnessing landrace diversity empowers wheat breeding. *Nature*, 632(8026), 823-831. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07682-9>
- Collet, Clothilde (2022). A novel phenotyping pipeline for root system architecture : evaluation with diversity panels of bread and durum wheat. Prom. : Draye, Xavier. <http://hdl.handle.net/2078.1/266113>
- Cook, B. I., Smerdon, J. E., Seager, R., & Coats, S. (2014). Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, 43(9), 2607-2627. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2075-y>
- Cope, J. E., Berckx, F., Lundmark, J., Henriksson, T., Karlsson, I., & Weih, M. (2024). Clear effects on root system architecture of winter wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) from cultivation environment and practices. *Scientific Reports*, 14(1), 11099. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61765-1>
- Cseh, A., Poczai, P., Kiss, T., Balla, K., Berki, Z., Horváth, Á., Kuti, C., & Karsai, I. (2021). Exploring the legacy of Central European historical winter wheat landraces. *Scientific Reports*, 11(1), 23915. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03261-4>
- Donald, C. M. (1968). The breeding of crop ideotypes. *Euphytica*, 17(3), 385-403. <https://doi.org/10.1007/BF00056241>
- Eissenstat, D. M. (1997). 6—Trade-offs in Root Form and Function. In L. E. Jackson (Éd.), *Ecology in Agriculture* (p. 173-199). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012378260-1/50007-5>
- Erenstein, O., Jaleta, M., Mottaleb, K. A., Sonder, K., Donovan, J., & Braun, H.-J. (2022). Global Trends in Wheat Production, Consumption and Trade. In M. P. Reynolds & H.-J. Braun (Éds.), *Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate* (p. 47-66). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3_4

- FAO. (2023). *FAOSTAT*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Feldman, M., & Levy, A. A. (2009). Genome evolution in allopolyploid wheat—A revolutionary reprogramming followed by gradual changes. *Journal of Genetics and Genomics*, 36(9), 511-518. [https://doi.org/10.1016/S1673-8527\(08\)60142-3](https://doi.org/10.1016/S1673-8527(08)60142-3)
- Feldman, M., & Levy, A. A. (2023). *Wheat Evolution and Domestication*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-30175-9>
- Gao, K., Chen, F., Yuan, L., Zhang, F., & Mi, G. (2015). A comprehensive analysis of root morphological changes and nitrogen allocation in maize in response to low nitrogen stress. *Plant, Cell & Environment*, 38(4), 740-750. <https://doi.org/10.1111/pce.12439>
- Graves, S., & Dorai-Raj, H.-P. P. and L. S. with help from S. (2024). *multcompView: Visualizations of Paired Comparisons* (Version 0.1-10) [Logiciel]. <https://cran.r-project.org/web/packages/multcompView/index.html>
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., Thomson, A. M., & Wolfe, D. (2011). Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351-370. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
- 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 Anatomy. *Plant Physiology*, 182(2), 707-720. <https://doi.org/10.1104/pp.19.00617>
- Heymans, A., Couvreur, V., & Lobet, G. (2021). Combining cross-section images and modeling tools to create high-resolution root system hydraulic atlases in *Zea mays*. *Plant Direct*, 5(7), e00290. <https://doi.org/10.1002/pld3.334>
- Howden, S. M., Soussana, J.-F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., & Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19691-19696. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104>

- Hyles, J., Bloomfield, M. T., Hunt, J. R., Trethowan, R. M., & Trevaskis, B. (2020). Phenology and related traits for wheat adaptation. *Heredity*, 125(6), 417-430. <https://doi.org/10.1038/s41437-020-0320-1>
- Igrejas, G., & Branlard, G. (2020). The Importance of Wheat. In G. Igrejas, T. M. Ikeda, & C. Guzmán (Éds.), *Wheat Quality For Improving Processing And Human Health* (p. 1-7). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3_1
- IPCC, Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023 : Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Izzo, L. G., & Aronne, G. (2021). Root Tropisms : New Insights Leading the Growth Direction of the Hidden Half. *Plants*, 10(2), 220. <https://doi.org/10.3390/plants10020220>
- Jaradat, A. A. (2013). Wheat Landraces : A mini review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i1.15376>
- Kirby. (2002). *Botany of the wheat plant*. <https://www.fao.org/4/Y4011e/y4011e05.htm>
- Klein, S. P., Schneider, H. M., Perkins, A. C., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2020). Multiple Integrated Root Phenotypes Are Associated with Improved Drought Tolerance1 [OPEN]. *Plant Physiology*, 183(3), 1011-1025. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00211>
- Lobet, G. (2025). *LBIR1151—Biologie de l'organisme—Botanique*.

- Lobet, G., Couvreur, V., Meunier, F., Javaux, M., & Draye, X. (2014). Plant Water Uptake in Drying Soils. *Plant Physiology*, 164(4), 1619-1627. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233486>
- 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>
- Lobet, G., Pound, M. P., Diener, J., Pradal, C., Draye, X., Godin, C., Javaux, M., Leitner, D., Meunier, F., Nacry, P., Pridmore, T. P., & Schnepf, A. (2015). Root System Markup Language : Toward a Unified Root Architecture Description Language. *Plant Physiology*, 167(3), 617-627. <https://doi.org/10.1104/pp.114.253625>
- Lopes, M. S., El-Basyoni, I., Baenziger, P. S., Singh, S., Royo, C., Ozbek, K., Aktas, H., Ozer, E., Ozdemir, F., Manickavelu, A., Ban, T., & Vikram, P. (2015). Exploiting genetic diversity from landraces in wheat breeding for adaptation to climate change. *Journal of Experimental Botany*, 66(12), 3477-3486. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv122>
- Lynch. (2012). *Effect of Internal and External Factors on Root Growth and Development* (Par P. Marschner & Z. Rengel; p. 331-346). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384905-2.00013-3>
- Lynch, J. P. (2013). Steep, cheap and deep : An ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals of Botany*, 112(2), 347-357. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs293>
- Lynch, J. P. (2019). Root phenotypes for improved nutrient capture : An underexploited opportunity for global agriculture. *New Phytologist*, 223(2), 548-564. <https://doi.org/10.1111/nph.15738>
- Lynch, J. P. (2022). Harnessing root architecture to address global challenges. *The Plant Journal*, 109(2), 415-431. <https://doi.org/10.1111/tpj.15560>

- Manschadi, A. M., Christopher, J. T., Hammer, G. L., & Devoil, P. (2010). Experimental and modelling studies of drought-adaptive root architectural traits in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 144(2), 458-462. <https://doi.org/10.1080/11263501003731805>
- Maqbool, S., Hassan, M. A., Xia, X., York, L. M., Rasheed, A., & He, Z. (2022). Root system architecture in cereals : Progress, challenges and perspective. *The Plant Journal*, 110(1), 23-42. <https://doi.org/10.1111/tpj.15669>
- Mastrangelo, A. M., & Cattivelli, L. (2021). What Makes Bread and Durum Wheat Different? *Trends in Plant Science*, 26(7), 677-684. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.01.004>
- McGrail, R. K., & McNear, D. H. (2021). Two centuries of breeding has altered root system architecture of winter wheat. *Rhizosphere*, 19, 100411. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100411>
- Meunier, F., Heymans, A., Draye, X., Couvreur, V., Javaux, M., & Lobet, G. (2020). MARSHAL, a novel tool for virtual phenotyping of maize root system hydraulic architectures. *in silico Plants*, 2(1), diz012. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diz012>
- MNHN. (2025, juin 30). *Qu'est-ce que la biodiversité ? - Définition | MNHN*. <https://www.mnhn.fr/fr/qu-est-ce-que-la-biodiversite>
- Nibau, C., Gibbs, D. J., & Coates, J. C. (2008). Branching out in new directions : The control of root architecture by lateral root formation. *New Phytologist*, 179(3), 595-614. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02472.x>
- Ober, E. S., Alahmad, S., Cockram, J., Forestan, C., Hickey, L. T., Kant, J., Maccaferri, M., Marr, E., Milner, M., Pinto, F., Rambla, C., Reynolds, M., Salvi, S., Sciara, G., Snowdon, R. J., Thomelin, P., Tuberosa, R., Uauy, C., Voss-Fels, K. P., ... Watt, M. (2021). Wheat root

- systems as a breeding target for climate resilience. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(6), 1645-1662. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03819-w>
- Orgogozo, V., Morizot, B., & Martin, A. (2015). The differential view of genotype–phenotype relationships. *Frontiers in Genetics*, 6. <https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00179>
- P. Pais, I., Moreira, R., Semedo, J. N., Reboredo, F. H., Lidon, F. C., Coutinho, J., Maças, B., & Scotti-Campos, P. (2022). Phenotypic Diversity of Seminal Root Traits in Bread Wheat Germplasm from Different Origins. *Plants*, 11(21), 2842. <https://doi.org/10.3390/plants11212842>
- Pages, L. (1995). Growth patterns of the lateral roots of young oak (*Quercus robur*) tree seedlings Relationship with apical diameter. *New Phytologist*, 130(4), 503-509. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb04327.x>
- 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>
- Pagès, L., Serra, V., Draye, X., Doussan, C., & Pierret, A. (2010). Estimating root elongation rates from morphological measurements of the root tip. *Plant and Soil*, 328(1), 35-44. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0079-x>
- Pascual, L., Ruiz, M., López-Fernández, M., Pérez-Peña, H., Benavente, E., Vázquez, J. F., Sansaloni, C., & Giraldo, P. (2020). Genomic analysis of Spanish wheat landraces reveals their variability and potential for breeding. *BMC Genomics*, 21(1), 122. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-6536-x>
- Pellerin, S., & Tabourel, F. (1995). Length of the apical unbranched zone of maize axile roots : Its relationship to root elongation rate. *Environmental and Experimental Botany*, 35(2), 193-200. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(94\)00043-5](https://doi.org/10.1016/0098-8472(94)00043-5)

- Pendergrass, A. G., & Hartmann, D. L. (2014). Changes in the Distribution of Rain Frequency and Intensity in Response to Global Warming. *Journal of Climate*, 27(22), 8372-8383. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00183.1>
- Peng, B., Liu, X., Dong, X., Xue, Q., Neely, C. B., Marek, T., Ibrahim, A. M. H., Zhang, G., Leskovar, D. I., & Rudd, J. C. (2019). Root morphological traits of winter wheat under contrasting environments. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205(6), 571-585. <https://doi.org/10.1111/jac.12360>
- Placido, D. F., Sandhu, J., Sato, S. J., Nersesian, N., Quach, T., Clemente, T. E., Staswick, P. E., & Walia, H. (2020). The LATERAL ROOT DENSITY gene regulates root growth during water stress in wheat. *Plant Biotechnology Journal*, 18(9), 1955-1968. <https://doi.org/10.1111/pbi.13355>
- Pont, C., Leroy, T., Seidel, M., Tondelli, A., Duchemin, W., Armisen, D., Lang, D., Bustos-Korts, D., Goué, N., Balfourier, F., Molnár-Láng, M., Lage, J., Kilian, B., Özkan, H., Waite, D., Dyer, S., Letellier, T., Alaux, M., Russell, J., ... Salse, J. (2019). Tracing the ancestry of modern bread wheats. *Nature Genetics*, 51(5), 905-911. <https://doi.org/10.1038/s41588-019-0393-z>
- Reni, F., Bindhu, J. S., & Pillai, P. S. (2024). Rhizotron : A Unique Technique for Root Study: A Review. *Agricultural Reviews, Of*. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2671>
- Rich, S. M., & Watt, M. (2013). Soil conditions and cereal root system architecture : Review and considerations for linking Darwin and Weaver. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1193-1208. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert043>
- Ripple, W. J., Wolf, C., Gregg, J. W., Rockström, J., Mann, M. E., Oreskes, N., Lenton, T. M., Rahmstorf, S., Newsome, T. M., Xu, C., Svenning, J.-C., Pereira, C. C., Law, B. E., &

- Crowther, T. W. (2024). The 2024 state of the climate report : Perilous times on planet Earth. *BioScience*, 74(12), 812-824. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac087>
- Ryser, P. (2006). The mysterious root length. *Plant and Soil*, 286(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9096-1>
- Sarwar, H. (2013). The importance of cereals (Poaceae : Gramineae) nutrition in human health: A review. *Journal of Cereals and Oilseeds*, 4(3), 32-35. <https://doi.org/10.5897/JCO12.023>
- Schnepf, A., Leitner, D., Landl, M., Lobet, G., Mai, T. H., Morandage, S., Sheng, C., Zörner, M., Vanderborght, 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>
- Shewry, P. R. (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60(6), 1537-1553. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp058>
- Simmonds, J., Faci, I., Buffagni, V., Uauy, C., & Centre, J. I. (2025). *How to grow wheat in controlled and semi-controlled environment*.
- Smith, S., & De Smet, I. (2012). Root system architecture : Insights from *Arabidopsis* and cereal crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1595), 1441-1452. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0234>
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene : The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Steudle, E. (2001). The Cohesion-Tension Mechanism and the Acquisition of Water by Plant Roots. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 52(1), 847-875. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.52.1.847>

- Tadesse, W., Halila, H., Jamal, M., Hanafi, S., Assefa, S., Oweis, T., & Baum, M. (2017). Role of Sustainable Wheat Production to Ensure Food Security in the CWANA region. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 5(Spl-1-SAFSAW), 15-32. [https://doi.org/10.18006/2017.5\(Spl-1-SAFSAW\).S15.S32](https://doi.org/10.18006/2017.5(Spl-1-SAFSAW).S15.S32)
- Takahashi, H., & Pradal, C. (2021). Root phenotyping : Important and minimum information required for root modeling in crop plants. *Breeding Science*, 71(1), 109-116. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.20126>
- Tardieu, F., Draye, X., & Javaux, M. (2017). Root Water Uptake and Ideotypes of the Root System : Whole-Plant Controls Matter. *Vadose Zone Journal*, 16(9), vzj2017.05.0107. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.05.0107>
- UNEP. (2024). *EGR2024*. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>
- Wang, H., Inukai, Y., & Yamauchi, A. (2006). Root Development and Nutrient Uptake. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25(3), 279-301. <https://doi.org/10.1080/07352680600709917>
- Wasaya, A., Zhang, X., Fang, Q., & Yan, Z. (2018). Root Phenotyping for Drought Tolerance : A Review. *Agronomy*, 8(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110241>
- Wasson, A. P., Richards, R. A., Chatrath, R., Misra, S. C., Prasad, S. V. S., Rebetzke, G. J., Kirkegaard, J. A., Christopher, J., & Watt, M. (2012). Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, 63(9), 3485-3498. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers111>
- Weihs, B. J., Heuschele, D.-J., Tang, Z., York, L. M., Zhang, Z., & Xu, Z. (2024). The State of the Art in Root System Architecture Image Analysis Using Artificial Intelligence : A Review. *Plant Phenomics*, 6, 0178. <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0178>
- Wheeler, T., & von Braun, J. (2013). Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science*, 341(6145), 508-513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>

- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
<https://ggplot2.tidyverse.org>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2025). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. <https://dplyr.tidyverse.org>
- Wickham, H., Hester, J., & Bryan, J. (2024). *readr: Read Rectangular Text Data*.
<https://readr.tidyverse.org>
- Willaume, M., & Pagès, L. (2011). Correlated responses of root growth and sugar concentrations to various defoliation treatments and rhythmic shoot growth in oak tree seedlings (*Quercus pubescens*). *Annals of Botany*, 107(4), 653-662. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq270>
- Wingen, L. U., Orford, S., Goram, R., Leverington-Waite, M., Bilham, L., Patsiou, T. S., Ambrose, M., Dicks, J., & Griffiths, S. (2014). Establishing the A. E. Watkins landrace cultivar collection as a resource for systematic gene discovery in bread wheat. *TAG. Theoretical and Applied Genetics. Theoretische Und Angewandte Genetik*, 127(8), 1831-1842.
<https://doi.org/10.1007/s00122-014-2344-5>
- WMO. (2025). *State of the Global Climate 2024* (No. WMO-No. 1368).
- Wu, J., Pagès, L., Wu, Q., Yang, B., & Guo, Y. (2015). Three-dimensional architecture of axile roots of field-grown maize. *Plant and Soil*, 387(1), 363-377.
<https://doi.org/10.1007/s11104-014-2307-2>
- Wu, Q., Pagès, L., & Wu, J. (2016). Relationships between root diameter, root length and root branching along lateral roots in adult, field-grown maize. *Annals of Botany*, 117(3), 379-390.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcv185>
- WWF, World Wide Fund for Nature, & WWF International. (2024). *WWF Living Planet Report 2024 A system in peril* (1. unveränderte engl.-sprachige Gesamtausgabe 2024). WWF Deutschland.

- York, L., & Lobet, G. (2017). Phenomics of root system architecture : Measuring and analyzing root phenes. *The Plant Cell*, 29(9), tpc.117.tt0917. <https://doi.org/10.1105/tpc.117.tt0917>
- Zhan, A., Schneider, H., & Lynch, J. P. (2015). Reduced Lateral Root Branching Density Improves Drought Tolerance in Maize. *Plant Physiology*, 168(4), 1603-1615. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00187>
- Zhao, Y., Xing, L., Wang, X., Hou, Y.-J., Gao, J., Wang, P., Duan, C.-G., Zhu, X., & Zhu, J.-K. (2014). The ABA Receptor PYL8 Promotes Lateral Root Growth by Enhancing MYB77-Dependent Transcription of Auxin-Responsive Genes. *Science Signaling*, 7(328). <https://doi.org/10.1126/scisignal.2005051>
- Zobel, R. W., & Waisel, Y. (2010). A plant root system architectural taxonomy : A framework for root nomenclature. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 144(2), 507-512. <https://doi.org/10.1080/11263501003764483>

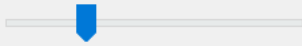
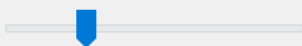
9. Annexes

Annexe A : Informations complètes sur les accessions utilisées

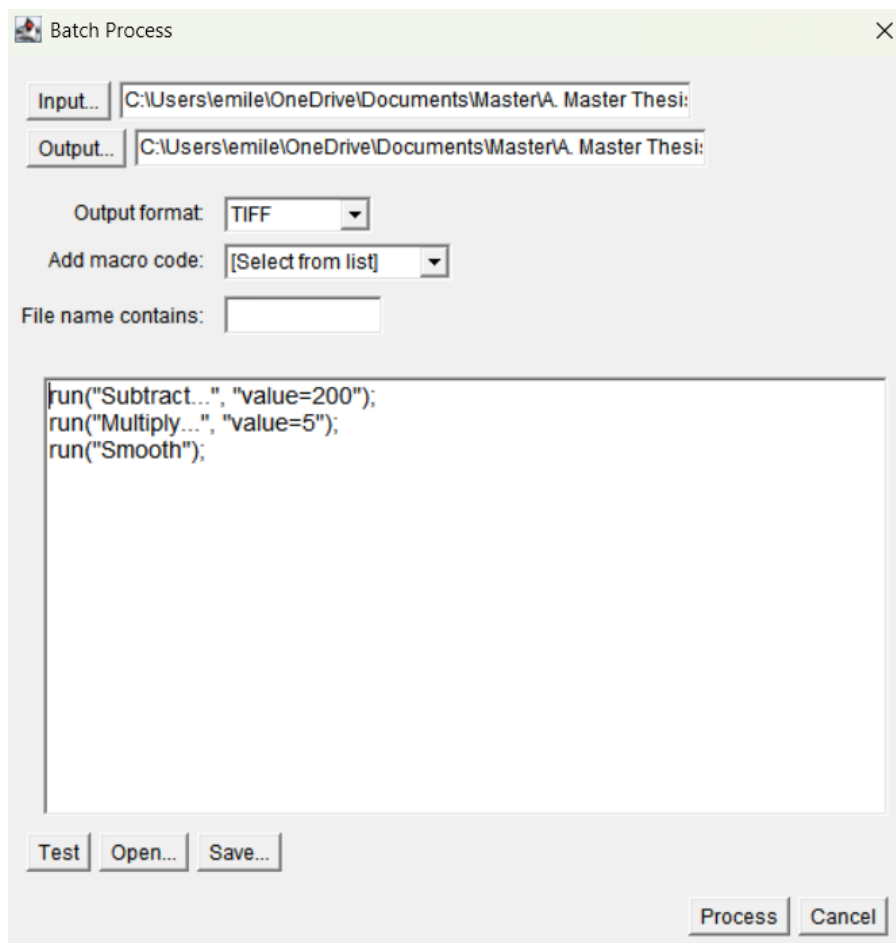
Accession name	Country of origin	Locality	Latitude	Longitude	Growth habit	Cluster
WATDE0482	China	Mukden	41,8203	123,3951	Winter	1
WATDE0014	France	/	48,859	2,3476	Winter	2
WATDE0334	Italy	/	41,9262	12,4175	Winter	3
WATDE0672	USSR	Armenia	40,4551	44,8095	Winter	4
WATDE0065	Poland	/	52,2597	21,0415	Winter	5
WATDE0413	Tunisia	Garn Alfaya	36,1435	8,4955	Winter	6
WATDE0512	Spain	Navarre	42,716	-1,6731	Winter	7

Accession Name	Country	Region	Status	Registration year	Pedigree	Cluster	Root Biomass per tiller
Odeska 267	UKR	Odessa	Modern	1997	ODESSKAYA-51/INIA-66//BEZOSTAYA-1/ MIRONOVSKAYA-808/3/ WORLD-SEEDS-1877	I	0,101010836
Archer	USA	Colorado	Modern	1981	SONORA-64/TRAPPER//WARRIOR/3/CENTURK	III	0,047032492
Albidum	UZB	NA	Modern	1974	NA	IX	0,062950368
Salto	ITA	NA	Traditional	1939	ARDITO/3/AKAKOMUGI//RIETI/WILHELMINA	V	0,08714011
Scout-66	USA	Nebraska	Modern	1967	(S) SCOUT	VI	0,057319582
Précoce de Gembloux	BEL	NA	Traditional	1930	BON FERMIER/HERISSON A EPI ROUGE	XI	0,10110042

Annexe B : Paramètres VueScan

Options:	Professionnelles	▼
Tâche:	Vers fichier	▼
Source:	PerfectionV850	▼
Mode:	Transparency 8x10	▼
Document:	Image	▼
Zone d'aperçu:	Maximum	▼
Bits/pixel:	8 bit Gris	▼
Gris à partir de:	Auto	▼
Numériser à partir de l'aperçu: ☐		
Résolution de l'aperçu:	Personnalisé	▼
Points/pouce de l'aperçu:	1200	
Résolution de numérisation:	Personnalisé	▼
Points/pouce numérisation:	1200	
Retournement automatique: ☐		
Rotation:	Sans	▼
Pencher automatique: ☐		
Miroir:	☒	
Mise au point automatique:	Aperçu	▼
Sauvegarde automatique:	Numériser	▼
Impression automatique:	Sans	▼
Répétition automatique:	Sans	▼

Annexe C : Macro utilisée dans ImageJ



Annexe D : Paramètres d'entrée de CRootBox

Source : (Schnepf et al., 2018)

Description	Parameter name	Unit
Planting depth	<i>depth</i>	cm
First emergence of basal roots	<i>firstB</i>	day
Time period between basal roots	<i>delayB</i>	day
Maximal number of basal roots	<i>maxB</i>	1
First occurrence of shoot-borne roots	<i>firstS</i>	day
Time period between shoot-borne roots	<i>delayS</i>	day
Number of shoot-borne roots per root crown	<i>nS</i>	1
Distance between root crowns along the shoot	<i>dzS</i>	cm
Root radius	<i>a</i>	cm
Initial elongation rate	<i>r</i>	cm d ⁻¹
Insertion angle	<i>θ</i>	rad
Length of basal zone	<i>la</i>	cm
Length of apical zone	<i>lb</i>	cm
Length between lateral branches	<i>ln</i>	cm
Maximal root length	<i>lmax</i>	cm
Tropism type	<i>type</i>	{0,1,2,3} ¹
Number of trials (tropism strength)	<i>N</i>	1
Standard deviation of random angular change	<i>σ</i>	cm ⁻¹
Root successor types	<i>successor</i>	[type, probability; ...]
Name of the root type	<i>name</i>	String
Root colour	<i>colour</i>	RGB
Resolution along root axis	<i>dx</i>	cm
Root life time	<i>rlt</i>	day
Type of root elongation	<i>gf</i>	{1,2} ²
Scale elongation	<i>se</i>	Function ³
Scale branching probability	<i>sbp</i>	Function ³
Scale branching angle	<i>sa</i>	Function ³

Annexe E : Résultats obtenus pour CRootBox

Variété	mean_lb	sd_lb	mean_la	sd_la	mean_ln	sd_ln	mean_lmax	sd_lmax	mean_radius	sd_radius
W0014	0,584	0,410	12,340	1,798	0,506	0,089	33,826	5,267	0,023	0,006
W0065	1,068	0,510	10,995	2,419	0,597	0,274	30,883	5,758	0,025	0,006
W0334	1,816	1,278	10,550	1,782	0,510	0,152	40,390	4,597	0,028	0,001
W0413	0,859	0,938	10,487	1,626	0,592	0,446	32,000	4,323	0,028	0,003
W0482	0,965	0,798	11,712	2,528	0,586	0,422	31,153	4,962	0,029	0,005
W0672	0,759	0,688	10,683	2,080	0,429	0,079	31,524	6,664	0,025	0,003
W1042	1,120	1,304	9,801	1,067	0,434	0,127	25,490	2,086	0,028	0,003
albidum	0,742	0,823	9,301	2,709	0,485	0,095	30,550	4,890	0,027	0,005
archer	0,646	0,488	10,142	3,633	0,490	0,083	30,151	8,248	0,028	0,004
odeska	0,792	0,893	7,795	4,637	0,508	0,085	26,392	5,193	0,029	0,004
pdg	0,793	0,386	11,622	2,938	0,533	0,086	28,112	4,782	0,027	0,003
salto	0,851	0,411	11,265	1,443	0,488	0,108	29,695	7,509	0,028	0,003
scout66	1,014	1,282	10,420	1,710	0,535	0,105	33,674	4,695	0,030	0,002

Variété	mean_root	sd_roots	mean_growth	sd_growth
W0014	4,875	0,641	3,127	0,397
W0065	4,100	1,101	2,607	0,313
W0334	5,250	0,957	2,647	0,024
W0413	5,300	0,675	2,740	0,401
W0482	5,111	0,601	2,708	0,872
W0672	4,900	0,876	2,907	0,630
W1042	4,333	1,155	2,380	0,522
albidum	4,400	0,699	2,733	0,386
archer	4,556	0,527	2,752	0,542
odeska	4,556	0,882	2,744	0,576
pdg	4,857	0,900	2,635	0,664
salto	4,889	0,928	2,828	0,448
scout66	4,889	0,333	2,929	0,410

Variété	mean_lmax_lat	sd_lmax_lat	mean_rayon_lat	sd_rayon_lat	mean_growth_lat	sd_growth_lat
W0014	2,858	0,587	0,012	0,002	0,740	0,211
W0065	3,101	1,004	0,012	0,002	0,670	0,274
W0334	3,761	1,829	0,012	0,003		
W0413	3,271	0,998	0,012	0,003	0,760	0,270
W0482	2,978	0,683	0,012	0,002	1,172	0,443
W0672	3,453	2,114	0,011	0,002	0,841	0,117
W1042	3,855	2,702	0,011	0,002	0,683	0,320
albidum	3,681	1,668	0,013	0,003	0,723	0,418
archer	2,562	0,808	0,012	0,003	0,825	0,240
odeska	2,669	1,227	0,013	0,003	0,497	0,009
pdg	1,944	0,927	0,012	0,003	0,541	
salto	2,341	1,201	0,012	0,003	0,631	0,499
scout66	2,921	0,754	0,012	0,003	0,653	0,170

Étude de la diversité racinaire inter-variétale du froment (*Triticum aestivum subsp. aestivum*) et analyse des relations entre traits racinaires

Emile Davio

Pour assurer la viabilité de la production alimentaire face aux dérèglements climatiques, l'agriculture doit gagner en robustesse et en capacité d'adaptation. L'un des leviers possibles consiste à améliorer les systèmes racinaires des cultures, longtemps négligés en raison des difficultés liées à leur étude. Dans ce contexte, la diversité génétique des variétés de pays représente une ressource précieuse. Leur caractérisation phénotypique permettrait de mieux orienter la sélection variétale vers des idéotypes racinaires plus adaptés et plus résilients. Par ailleurs, l'établissement de liens entre certains traits facilement mesurables et d'autres plus difficiles à observer pourrait en faciliter l'estimation. Une telle approche pourrait contribuer à simplifier la recherche sur les racines.

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective et poursuit deux objectifs principaux. Le premier consiste à étudier la diversité inter-variétale des traits racinaires chez le froment (*Triticum aestivum subsp. aestivum*). Le second consiste à analyser les relations entre traits racinaires afin d'évaluer la possibilité de prédire certains caractères difficiles à mesurer.

Pour répondre à ces objectifs, deux expériences ont été menées en conditions contrôlées. Treize variétés génétiquement éloignées ont été cultivées en rhizotrons pour suivre le développement de leur système racinaire. Les racines ont ensuite été numérisées pour extraire divers traits structurels. Par la suite, une modélisation fonctionnelle a été effectuée à l'aide du modèle MARSHAL.

Au niveau structurel, certaines variétés présentent des vitesses d'élongation et des diamètres racinaires significativement différents. En revanche, aucune différence significative n'a été observée pour la densité de ramification latérale ni pour la longueur de la zone apicale non ramifiée (*LAUZ*). Au niveau fonctionnel, les variétés présentent des conductances racinaires hétérogènes. Différentes combinaisons de traits structuraux peuvent aboutir à des résultats similaires. Les résultats soulignent également le rôle clé de la vitesse d'élongation racinaire dans la fonctionnalité des racines juvéniles.

En outre, les résultats du présent mémoire ne permettent pas de conclure que le diamètre ou la *LAUZ* constitue des indicateurs prédictifs fiables de la vitesse d'élongation. D'autre part, une diminution significative du diamètre le long de la racine a été observée.

Ce mémoire met en lumière la variabilité phénotypique issue de la diversité génétique du froment. Il constitue une première étape pouvant servir de base à des études de plus grande ampleur afin d'orienter plus efficacement la sélection variétale et de favoriser le développement de cultivars plus résilients.