

Faculté des bioingénieurs

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

Auteur : Noé Wuidart

Promoteur(s) : Guillaume Lobet

Lecteur(s) : Salomé Lengrand et Valentin Couvreur

Année académique 2025-2026

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Bioingénieur : Sciences agronomiques

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier mon promoteur, Guillaume Lobet, pour son accompagnement attentif et compréhensif tout au long de ces trois années. Malgré les difficultés rencontrées et les échecs précédents, il m'a laissé le temps et les chances nécessaires pour poursuivre mon mémoire, et je lui en suis profondément reconnaissant.

Je remercie également Marc Migon, pour son aide précieuse dans l'organisation du matériel et le bon déroulement des expérimentations. Je garde aussi un très bon souvenir de nos discussions autour des frelons asiatiques, et de la manière dont leur dangerosité est souvent largement surestimée.

Je remercie également Thomas Dagbert pour son aide concrète et précieuse sur les aspects pratiques du travail expérimental, notamment dans la préparation des rhizotrons.

J'adresse aussi mes remerciements à Corentin Deflaque et Tristan Gérard, qui ont pris le temps de m'expliquer leur projet et de replacer mon travail dans une perspective plus large. Ces échanges m'ont permis de mieux comprendre en quoi ma contribution s'inscrit comme une pièce d'un puzzle scientifique plus vaste.

Je souhaite également remercier Valentin Couvreur et Salomé Lengrand d'avoir accepté de faire partie de mon jury, et de consacrer du temps à l'évaluation de mon mémoire.

Je remercie profondément mes parents pour leur soutien tout au long de ce parcours, même lorsque les difficultés rencontrées n'étaient pas toujours simples à comprendre de l'extérieur. Leur présence et leur accompagnement, à leur manière, ont compté durant ces années.

Je remercie également les équipes de nuit de l'UCLouvain, qui m'ont permis de travailler sereinement en serre durant de nombreuses heures tardives. Leur présence discrète a rendu possibles ces longues sessions nocturnes dans de bonnes conditions.

Je remercie également Dany Thomas, amie de la famille, pour sa relecture attentive du mémoire. Son regard extérieur m'a permis de vérifier que le texte restait compréhensible pour une personne non directement impliquée dans le sujet, et d'identifier certains passages nécessitant davantage de clarté.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Etat de l'art.....	3
2.1. Révolutions énergétiques, verrouillages sociotechniques et nécessité d'adaptation.....	3
2.2. Le froment : importance agronomique, diversité génétique et amélioration variétale	4
2.2.1. Importance agronomique et enjeux en Belgique	4
2.2.2. Origine évolutive et formation du génome du froment	5
2.2.3. Domestication et coévolution avec les sociétés humaines	6
2.2.4. Structuration génétique et notion de « clusters »	7
2.2.5. Érosion et valorisation de la diversité génétique.....	7
2.2.6. Mobilisation de la diversité génétique en amélioration variétale.....	8
2.3. Fonctionnement racinaire	8
2.3.1. Le système racinaire du Froment.....	8
2.3.2. Fonctionnement cellulaire et physiologique des racines	10
2.3.3. Idéotypes racinaires et intérêt agronomique.....	11
2.4. Captation de l'eau par les racines	12
2.4.1. Eau et fonctionnement physiologique de la plante	12
2.4.2. Potentiel hydrique et continuum sol-plante-atmosphère	12
2.4.3. Voies radiales de transport dans la racine.....	13
2.4.4. Spécificités et enjeux fonctionnels chez le blé	14
2.5. Inscription du mémoire dans le projet DROOGHT	14
2.5.1. Cadre scientifique	14
2.5.2. Référence agronomique du champ	15
2.5.3. Apport méthodologique du rhizotron	15
2.5.4. Cohérence entre champ et rhizotron	15
2.5.5. Relations allométriques et rationalisation du phénotypage.....	15
2.5.6. Ouverture vers la modélisation racinaire	16
3. Objectifs	17
4. Matériel et méthode.....	18
4.1. Matériel végétal.....	18
4.2. Dispositif expérimental.....	19
4.3. Mesures et observations.....	20
4.3.1. Mesures dynamiques	20
4.3.2. Mesures statiques	21

4.4. Numérisation et traitement d'image	21
4.5. Analyse des données.....	22
4.5.1. Structure des données	22
4.5.2. Analyse des données	24
4.6. Simulation racinaire et estimation du Krs	25
4.7. Différence entre les deux expériences	25
5. Résultats.....	26
5.1. Comparaison des génotypes.....	26
5.1.1. Survivabilités des génotypes.....	26
5.1.2. Tailles des plantes	27
5.1.3. Longueur racinaire.....	28
5.1.4. Nombre de feuilles.....	29
5.1.5. Nombre de racine séminale.....	30
5.2. Masse des plantes.....	31
5.2.1. Masse sèche foliaire	31
5.2.2. Masse sèche racinaire	32
5.2.3. Rapport de masse racinaire sur la masse de la partie aérienne	33
5.3. Système racinaire	34
5.3.1. Diamètre moyen racinaire	34
5.3.2. Vitesse de croissance aérienne	35
5.3.3. Vitesse de croissance racinaire.....	36
5.3.4. Vitesse de croissance des racines latérales	37
5.3.5. Profil de diamètre racinaire	38
5.3.6. Profil de diamètre racinaire par expérience.....	39
5.3.7. Relation entre le diamètre et la croissance racinaire	40
5.4. Analyse en composantes principales.....	41
5.5. Conductance du système racinaire	43
6. Discussion	44
6.1. Allocation de ressources et variabilité entre les collections Watkins et INRAE	44
6.2. Différences au sein des collections Watkins et INRAE	46
6.3. Le rhizotron, comme outil et limite	47
6.4. Profils de diamètre racinaire et relation avec la croissance.....	49
6.5. Intégration multivariée des traits racinaires et conséquences sur le Krs simulé	50
6.6. Variabilité entre expériences et influence du dispositif expérimental	51
6.7. Perspectives	52

7.	Conclusion	55
8.	Bibliographie	57
9.	Annexes	62

Liste figure

Figure 1 : Histoire évolutive des espèces de blé (<i>triticum</i>) et d' <i>aegilops</i> ayant conduit au blé tendre hexaploïde (<i>triticum aestivum</i> , aabdd). source : chantret et al. (2005).....	6
Figure 2 : Organisation schématique du système racinaire fasciculé du blé, distinguant les racines séminales, nodales et latérales.....	9
Figure 3 : Voies radiales de transport de l'eau dans la racine, distinguant les voies apoplastique, symplastique et transmembranaire.....	13
Figure 4 : Origine géographique des accessions Watkins de blé étudiées.....	18
Figure 5 : schéma du dispositif de rhizotron utilisé pour le suivi de la croissance racinaire. Source : davio (2025).....	19
Figure 6 : Exemple de tracés successifs réalisés sur feuille transparente pour suivre l'élongation des racines au cours du temps.	20
Figure 7 : Rhizotron ouvert en fin d'expérience, montrant le développement du système racinaire contre la membrane semi-perméable.	21
Figure 8 : Exemple de tracé SmartRoot réalisé à partir d'une feuille transparente scannée, montrant les axes racinaires suivis et les racines latérales associées.	23
Figure 9 : Exemple de scan racinaire traité dans smartroot, montrant le tracé des axes racinaires et des ramifications latérales.....	23
Figure 10 : Survie et mortalité des plantes par variété, toutes expériences confondues.	26
Figure 11 : Hauteur des plantes par variété dans les deux expériences.	27
Figure 12 : Longueur racinaire des axes suivis A et B par variété dans les deux expériences.	28
Figure 13 : Nombre de feuilles par variété dans les deux expériences.	29
Figure 14 : Nombre de racines séminales par variété dans les deux expériences.	30
Figure 15 : Distribution de la masse sèche foliaire par variété dans les deux expériences.	31
Figure 16 : Distribution de la masse sèche racinaire par variété dans les deux expériences.....	32
Figure 17 : Distribution de la masse sèche racinaire par collection.	33
Figure 18 : Distribution du rapport entre masse sèche racinaire et masse sèche foliaire par variété dans les deux expériences.....	33
Figure 19 : Distribution du diamètre moyen des racines A et B par variété dans les deux expériences.....	34
Figure 20 : Vitesse de croissance aérienne par collection au cours des intervalles de mesure, dans les deux expériences.....	35
Figure 21 : Vitesse de croissance racinaire par collection au cours des intervalles de mesure, dans les deux expériences.....	36
Figure 22 : Distribution de la croissance des racines latérales par variété dans les deux expériences.....	37
Figure 23 : Évolution du diamètre racinaire le long des axes A et B en fonction de la distance depuis la base, pour plusieurs individus de l'expérience	38
Figure 24 : Évolution du diamètre racinaire le long des racines A et B jusqu'à 40 cm, dans les deux expériences.	39
Figure 25 : Relation entre le diamètre moyen des segments racinaires et leur vitesse de croissance dans les deux expériences.....	40
Figure 26 : Projection des individus selon les deux premières composantes principales de l'ACP.	41
Figure 27 : Cercle des corrélations des variables utilisées dans l'ACP.....	42

Figure 28 : Projection des individus selon les deux premières composantes principales de l'ACP, avec ellipses par variété.....	42
Figure 29 : Conductance hydraulique racinaire simulée (Krs) par variété.....	43
Figure 30 : Évolution de la croissance des mêmes racines latérales entre les intervalles J6–J9 et J9–J12, dans les deux expériences.....	47
Figure 31 : Exemple de rhizotron en fin d'expérience, illustrant les pertes potentielles.	48

Tableau de contribution CRediT

	[Votre Nom]	Autres contributeur.ice	Intelligence artificielle
Conceptualisation	Wuidart Noé	Lobet Guillaume	
Méthodologie	Wuidart Noé	Lobet Guillaume	
Investigation	Wuidart Noé	Thomas Dagbert (appui technique) Marc Migon (Organisation et matériel)	
Analyse formelle	Wuidart Noé		ChatGPT (organisation data et aide code)
Validation	Wuidart Noé		
Rédaction – version originale	Wuidart Noé	Lobet Guillaume (structuration et fil conducteur)	ChatGPT (recherche bibliographique – assistance reformulation/rédaction)
Rédaction - révision et édition		Lobet Guillaume Dany Thomas (compréhension générale)	
Visualisation	Wuidart Noé		ChatGPT (aide code)
Supervision	Wuidart Noé (Planification et exécution)	Lobet Guillaume (Direction et encadrement)	

1. Introduction

Le changement climatique impose une pression croissante sur les systèmes agricoles. L'augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse, l'irrégularité des précipitations et la hausse des températures modifient les conditions de production et rendent nécessaire une meilleure compréhension des mécanismes d'adaptation des cultures. Parmi celles-ci, le froment (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*) occupe une place centrale dans les systèmes agricoles tempérés, tant par son importance alimentaire que par son poids agronomique. Sa capacité à maintenir une production stable dans des environnements plus contraignants constitue donc un enjeu majeur pour les prochaines décennies.

Dans ce contexte, la diversité génétique du blé représente une ressource essentielle. Les variétés modernes ont été sélectionnées principalement pour des critères de rendement, de qualité technologique et d'adaptation aux systèmes agricoles intensifs. Cette sélection a permis d'importants gains de productivité, mais elle a également pu réduire la diversité de certains traits moins directement visibles, notamment les traits racinaires. À l'inverse, les collections anciennes, comme la collection Watkins, regroupent des accessions issues de contextes géographiques et agronomiques variés. Elles constituent donc un réservoir de diversité susceptible de contenir des combinaisons de traits moins représentées dans les variétés modernes.

Le système racinaire joue un rôle déterminant dans l'acquisition de l'eau et des nutriments. Chez le blé, l'architecture racinaire résulte de la combinaison de plusieurs traits, tels que la longueur des racines, leur vitesse de croissance, leur diamètre, leur ramification ou encore leur biomasse. Ces traits ne traduisent pas seulement une capacité d'exploration du sol, mais aussi des stratégies d'allocation des ressources entre la partie aérienne et la partie souterraine. Une racine longue, fine et peu coûteuse ne répond pas nécessairement à la même stratégie qu'une racine plus épaisse ou plus ramifiée. Comprendre cette diversité de profils est donc essentiel pour mieux caractériser les géotypes et identifier des traits potentiellement utiles dans un contexte de stress hydrique.

L'étude des racines reste cependant difficile en conditions de champ. Le sol est un milieu opaque, hétérogène et complexe, dans lequel l'observation directe du système racinaire est limitée. Les méthodes d'extraction sont souvent destructives et peuvent conduire à une perte d'information, notamment pour les racines fines ou profondes. Les rhizotrons constituent alors un outil complémentaire intéressant. Ils permettent de suivre le développement racinaire de manière dynamique, dans des conditions plus contrôlées, et d'accéder à des mesures difficiles à obtenir en champ, comme la vitesse d'élongation, l'évolution de la longueur racinaire ou certains profils morphologiques. En contrepartie, ce dispositif simplifie fortement l'environnement racinaire et impose des contraintes propres, notamment une croissance partiellement bidimensionnelle.

Ce mémoire s'inscrit dans la continuité du travail réalisé par Émile Davio et dans le cadre plus large du projet DROOGHT, qui vise à mieux comprendre la réponse du blé aux épisodes de sécheresse à travers l'étude de traits morphologiques, anatomiques et fonctionnels. L'objectif de ce travail est de caractériser la diversité racinaire précoce de plusieurs géotypes de froment issus de deux origines principales : des variétés INRAE et des accessions Watkins. Deux expériences en rhizotron ont été menées afin de comparer ces géotypes, d'analyser leurs différences de croissance et d'explorer les relations entre plusieurs traits racinaires.

L'enjeu n'est donc pas seulement de déterminer quels génotypes présentent les valeurs les plus élevées pour un trait donné. Il s'agit plutôt de comprendre comment différents profils racinaires se structurent, comment les collections Watkins et INRAE se différencient, et dans quelle mesure certains traits peuvent être liés entre eux. Ce mémoire cherche ainsi à contribuer à une meilleure compréhension de la diversité racinaire du froment, tout en fournissant des données qui alimenteront le projet DROOGHT et les futures approches de phénotypage et de modélisation racinaire.

2. Etat de l'art

2.1. Révolutions énergétiques, verrouillages sociotechniques et nécessité d'adaptation

La première révolution industrielle, amorcée à la fin du XVIII^e siècle, constitue une rupture majeure dans l'histoire des sociétés humaines. Fondée sur le charbon et la machine à vapeur, elle a permis de démultiplier la force de travail et la capacité des sociétés à transformer leur environnement. Le développement de la métallurgie et des machines a favorisé d'importantes innovations dans les transports, le textile et l'industrie en général. Cette nouvelle base énergétique s'est traduite par une augmentation rapide de l'extraction de charbon : aux États-Unis, la production est passée de moins de 100 000 tonnes en 1800 à 17,52 millions de tonnes en 1860 (Yang et al., 2021).

La deuxième révolution industrielle, à partir de la fin du XIX^e siècle, a prolongé cette dynamique en s'appuyant sur le moteur à combustion, l'électricité, le pétrole et le gaz. L'abondance énergétique a profondément accru la productivité et favorisé le passage d'économies essentiellement agraires à des économies industrielles. Entre 1860 et 1920, la production de charbon est passée de 18 à 584 millions de tonnes, tandis que celle du pétrole a progressé de 500 000 barils à 442,93 millions de barils (Yang et al., 2021). La troisième révolution industrielle, amorcée au XX^e siècle, avec l'électronique, l'automatisation, l'informatique et le nucléaire, a parfois été interprétée comme le début d'un découplage entre croissance économique et consommation d'énergie fossile. Cette lecture doit toutefois être nuancée, car une partie de ce découplage apparent repose sur la désindustrialisation des économies occidentales et sur la délocalisation des productions les plus énergivores. Lorsqu'on raisonne en empreinte matérielle, ce découplage apparaît bien plus limité, voire inexistant (Frodyma et al., 2020).

Dans l'ensemble, ces transformations ont permis une augmentation sans précédent des flux énergétiques mobilisés par les sociétés humaines. Elles ont aussi profondément transformé l'agriculture. La révolution verte, fondée sur la sélection de variétés à haut rendement, la mécanisation, l'usage massif d'engrais minéraux et de pesticides, a entraîné une hausse spectaculaire de la productivité. Entre 1961 à 2023, la production mondiale de céréales a augmenté de plus de 250 % (Ritchie, 2025, d'après les données FAO). Cependant, cette accélération ne concerne pas uniquement les performances productives. Elle s'accompagne également d'un accroissement des pressions exercées sur les systèmes terrestres : transfert de carbone fossile vers l'atmosphère, perturbation des cycles biogéochimiques, destruction d'écosystèmes et érosion de la biodiversité. Cette dynamique correspond à ce que Steffen et al. (2015) désignent comme la « grande accélération », souvent associée à l'Anthropocène.

Malgré l'accumulation de preuves scientifiques, la crise climatique et écologique demeure encore mal comprise dans le débat public, notamment en raison du caractère non linéaire des phénomènes en jeu. Une hausse relativement progressive de la température moyenne globale ne produit pas des effets proportionnels et uniformes, mais tend au contraire à accroître fortement la fréquence et l'intensité de certains événements extrêmes (Rivas et al., 2025). En Belgique, les précipitations augmenteraient d'environ 7 % par degré de réchauffement, et dans un scénario à +1,5 °C, certains événements extrêmes pourraient devenir jusqu'à cinq fois plus fréquents (Brajkovic et al., 2025). Les conséquences sont d'autant plus importantes que les infrastructures actuelles ont été conçues

pour des conditions climatiques passées, ce qui accentue les effets de seuil lorsque ces limites sont dépassées.

À cette dynamique s'ajoute une forte inertie structurelle. Seto et al. (2016) distinguent trois formes principales de verrouillage socio-économique. Le verrouillage technologique et infrastructurel tient à la longue durée de vie des bâtiments, réseaux et équipements, ainsi qu'à leur dépendance aux énergies fossiles. Le verrouillage institutionnel repose sur des règles, normes et modes de gouvernance qui tendent à stabiliser le statu quo, même lorsque celui-ci devient écologiquement problématique. Enfin, le verrouillage comportemental renvoie aux habitudes, aux normes sociales et aux pratiques quotidiennes, qui se reproduisent dans le temps et co-évoluent avec les dispositifs matériels qui les soutiennent (Shove et al., 2012 ; Seto et al., 2016). L'ensemble de ces mécanismes traduit une dépendance au chemin : les choix passés restreignent durablement les trajectoires futures et rendent les changements de cap nécessairement lents et progressifs.

Dans ce contexte, l'adaptation apparaît moins comme une option que comme une nécessité structurelle. En 2024, la température moyenne annuelle mondiale à la surface était supérieure de $1,55\text{ °C} \pm 0,13\text{ °C}$ à la moyenne de la période 1850–1900, faisant de cette année la plus chaude jamais enregistrée (WMO, 2024). Pour l'agriculture, les implications sont majeures : à l'échelle mondiale, le rendement du blé diminuerait en moyenne d'environ 6 % pour chaque degré Celsius supplémentaire, avec une variabilité accrue selon les régions et les années (Asseng et al., 2015).

Dès lors, l'adaptation des systèmes agricoles au changement climatique constitue un enjeu central, non seulement pour maintenir la production, mais aussi pour renforcer la résilience des agroécosystèmes face à des perturbations désormais structurelles.

2.2. Le froment : importance agronomique, diversité génétique et amélioration variétale

Le froment (*Triticum aestivum* L.) occupe une place centrale dans les systèmes agricoles tempérés, à la fois par son rôle alimentaire, son importance agronomique et sa large diffusion géographique. Son intérêt ne se limite toutefois pas à sa valeur productive actuelle. Il repose également sur une histoire évolutive complexe, marquée par des événements d'hybridation, de polyploïdisation, de domestication et de sélection, qui ont progressivement façonné sa diversité génétique.

Dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des contraintes hydriques, cette diversité constitue une ressource essentielle pour l'amélioration variétale. Comprendre l'origine, la structuration et l'érosion de cette diversité permet ainsi de mieux saisir l'intérêt des collections anciennes, telles que la collection Watkins, et leur potentiel pour identifier des traits utiles à l'adaptation du froment. Cette section présente donc le froment sous un angle à la fois agronomique, évolutif et génétique, afin de poser le cadre nécessaire à l'étude de sa diversité racinaire.

2.2.1. Importance agronomique et enjeux en Belgique

L'intérêt du froment en Belgique ne se limite toutefois pas à sa diversité génétique. Il tient aussi à son poids agronomique, économique et alimentaire. Les données récentes de Statbel montrent que

le froment reste une composante majeure des assolements belges, même si sa production et ses surfaces peuvent varier fortement d'une année à l'autre sous l'effet des conditions météorologiques (Statbel, 2024). Cette sensibilité renforce l'importance des travaux visant à mieux comprendre les déterminants de la résilience variétale. Le fait qu'un système belge de prévision du rendement ait intégré explicitement l'impact des maladies fongiques du blé témoigne aussi du poids technique de cette culture et de la nécessité d'en suivre finement les contraintes sanitaires (El Jarroudi et al., 2012).

Par ailleurs, la littérature wallonne récente montre que la question du froment ne se réduit pas aux seuls standards industriels. Dans les filières boulangères alternatives en Wallonie, les variétés patrimoniales ou dites « héritage », bien qu'adaptées aux conditions locales, ne satisfont pas toujours les critères industriels de « baking value » ; elles peuvent néanmoins être valorisées par des artisans boulangers selon d'autres critères, notamment organoleptiques (Chaussebourg et al., 2025). Le froment apparaît ainsi comme un objet à la fois agronomique, génétique, technologique et socio-économique. Cette pluralité des usages rappelle qu'une variété ne se juge pas seulement sur son rendement brut, mais aussi sur son insertion dans un milieu, une filière et un ensemble d'attentes sociales.

2.2.2. Origine évolutive et formation du génome du froment

Le blé tendre est une espèce allohexaploïde, c'est-à-dire qu'il possède trois sous-génomes homologues, notés A, B et D, présents chacun en double exemplaire (AABBDD). Son origine résulte de deux épisodes successifs d'allopolyploïdisation. D'après la synthèse de Levy et Feldman (2022), un premier événement a conduit à la formation du blé tétraploïde sauvage, ancêtre des blés à génome BBAA, puis un second événement a associé ce tétraploïde à *Aegilops tauschii*, donneur du génome D, pour former le blé hexaploïde. Les auteurs soulignent en outre que l'identité du donneur du génome A est solidement rattachée à *Triticum urartu*, tandis que le donneur exact du génome B demeure plus incertain : il serait proche d'*Aegilops speltoides*, mais distinct des espèces diploïdes actuelles connues. Autrement dit, l'histoire du froment n'est pas celle d'une simple lignée continue, mais celle d'une construction génomique complexe issue d'hybridations anciennes. Cette complexité a été renforcée par d'autres événements évolutifs plus anciens encore. Marcussen et al. (2014) montrent ainsi que les génomes A et B ont divergé d'un ancêtre commun il y a plusieurs millions d'années et que le génome D porte lui-même la trace d'une hybridation ancienne. Le génome du blé tendre actuel peut donc être envisagé comme une mosaïque évolutive, résultat de

plusieurs épisodes de divergence puis de réunion (figure 1). Cette lecture est importante, car elle explique en partie la grande plasticité du froment et sa capacité d'adaptation à des contextes pédoclimatiques très variés.

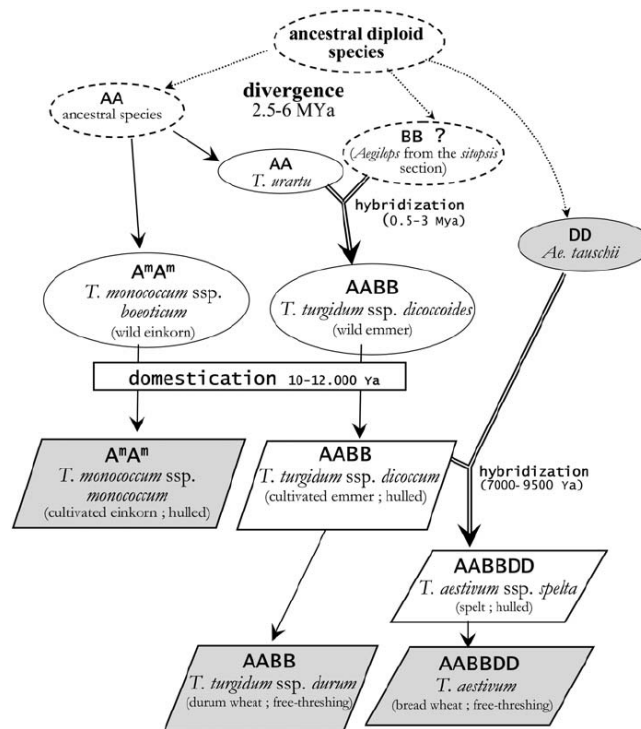


Figure 1 : Histoire évolutive des espèces de blé (*triticum*) et d'*agilops* ayant conduit au blé tendre hexaploïde (*triticum aestivum*, aabbdd). source : chantret et al. (2005)

2.2.3. Domestication et coévolution avec les sociétés humaines

Sur le plan de la domestication, le passage des formes sauvages aux formes cultivées s'est accompagné d'une sélection de caractères majeurs. Dubcovsky et Dvorak (2007) rappellent que la domestication du blé, amorcée il y a environ 10 000 ans, a notamment favorisé l'augmentation de la taille des grains, l'amélioration de la battabilité et la rétention des grains sur l'épi. Cette sélection, principalement orientée vers les parties aériennes et les rendements, s'est souvent opérée au détriment du développement et de la fonctionnalité des systèmes racinaires. Ces traits ont profondément modifié la relation entre la plante et les pratiques humaines. Le froment n'est donc pas seulement le produit d'une histoire naturelle ; il est aussi le résultat d'une longue coévolution avec les sociétés agricoles, qui ont progressivement sélectionné les génotypes les plus aptes à répondre à leurs usages, à leurs techniques et à leurs environnements.

2.2.4. Structuration génétique et notion de « clusters »

Cette histoire de domestication et de diffusion s'est accompagnée d'une structuration génétique des populations de froment. Il faut cependant rester prudent avec la notion de « cluster ». Dans le cas du blé, les clusters ne constituent pas des blocs fixes et universels ; leur nombre dépend du matériel étudié, des marqueurs utilisés et des méthodes statistiques mobilisées. Nielsen et al. (2014), dans un panel de variétés européennes principalement modernes, identifient deux grands sous-groupes : l'un rassemblant surtout des variétés d'Europe du Sud et de l'Est, l'autre surtout des variétés modernes d'Europe du Nord et de l'Ouest. À une échelle plus large, Yang et al. (2020) mettent également en évidence deux sous-groupes principaux dans un ensemble d'accessions asiatiques et européennes, avec une séparation générale entre matériel majoritairement européen et matériel surtout moyen-oriental ou asiatique, malgré des chevauchements non négligeables.

Lorsque l'on s'intéresse davantage aux landraces issues du Croissant fertile et conservées en banque de gènes, l'image devient encore plus nuancée. Tehseen et al. (2022), à partir de 600 accessions conservées à l'ICARDA, montrent que l'analyse conduit à deux grands clusters, alors que les approches DAPC (discriminant analysis of principal components) et PCA (principal component analysis) distinguent plutôt trois sous-populations dominantes, principalement associées à la Syrie, à la Turquie et à l'Iran.

2.2.5. Érosion et valorisation de la diversité génétique

Au-delà de la question des clusters, plusieurs travaux rappellent que la domestication puis la sélection moderne ont aussi contribué à resserrer la base génétique du blé. Yang et al. (2020) soulignent explicitement que la domestication, la pression de sélection exercée par l'homme et l'usage de techniques modernes de sélection ont progressivement réduit le pool génétique cultivé. El-Esawi et al. (2018) insistent, eux aussi, sur la nécessité d'élargir cette base génétique pour améliorer les stratégies de conservation et de breeding. Cette idée donne un sens particulier à l'étude de matériels anciens, de landraces ou de collections de ressources génétiques : l'enjeu n'est pas seulement de décrire de la diversité, mais de restaurer des possibilités d'innovation variétale qui ont parfois été perdues au cours du processus de modernisation.

Des travaux plus récents confirment d'ailleurs que le matériel ancien constitue une réserve génétique encore largement sous-exploitée. Cheng et al. (2024), à partir du séquençage de 827 accessions de la collection Watkins et de 208 cultivars modernes, identifient sept groupes ancestraux dans ce matériel de landraces. Les auteurs montrent surtout que les cultivars modernes dérivent principalement de deux de ces sept groupes, ce qui signifie qu'une grande partie de la diversité ancestrale n'a pas été pleinement mobilisée dans l'amélioration contemporaine. Cet élément est essentiel pour justifier l'intérêt scientifique de comparer des génotypes modernes à des ressources plus anciennes : ces dernières ne représentent pas seulement un passé patrimonial, mais aussi un réservoir potentiel d'allèles et d'haplotypes utiles pour la sélection.

2.2.6. Mobilisation de la diversité génétique en amélioration variétale

La diversité génétique au sein des espèces, c'est-à-dire la variation des allèles et des combinaisons géniques qui conditionnent l'adaptation, la réponse à la sélection et le potentiel évolutif des populations (Convention sur la diversité biologique, 1992 ; Hoban et al., 2020).

Dans une perspective de génie agronomique, cette diversité intra-spécifique peut donc être comprise comme un stock de gènes mobilisable, et non comme une notion seulement écologique. Elle peut en effet être mesurée par des indicateurs objectivables, tels que la richesse allélique, l'hétérozygotie, la différenciation entre populations ou la taille efficace, et peut être suivie dans le temps (Hoban et al., 2020).

Pour les plantes cultivées, les ressources phytogénétiques correspondent précisément à la diversité du matériel génétique contenu dans les variétés cultivées, les variétés locales et les apparentés sauvages. Ce matériel est conservé et documenté pour son étude, sa gestion et son utilisation, notamment dans des dispositifs *ex situ* et des collections représentatives (FAO, 1998 ; Pascual et al., 2020).

Chez le blé tendre (*Triticum aestivum*), la polyploïdisation, la domestication et la sélection moderne ont réduit la diversité du pool. Les apparentés sauvages et les *landraces* constituent donc des réservoirs d'allèles bénéfiques encore partiellement inexploités (Lopes et al., 2015 ; Gaurav et al., 2022 ; Cavalet-Giorsa et al., 2024).

Cette diversité est effectivement mobilisée en pré-amélioration et par introgression. Ces démarches permettent de transférer vers des fonds génétiques élités des allèles qualitatifs ou quantitatifs associés aux contraintes biotiques et abiotiques, à la phénologie ou à la qualité technologique (Sharma et al., 2021 ; Lopes et al., 2015).

De façon démonstrative, l'introgression de quantitative trait loci (QTLs) ancestraux issus de l'amidonniér sauvage a déjà permis d'augmenter le rendement, la biomasse et la stabilité sous contrainte hydrique dans des fonds génétiques modernes de blé. Cela montre que la biodiversité génétique constitue bien une ressource biologique conservable, caractérisable et valorisable pour l'amélioration variétale (Merchuk-Ovnat et al., 2016).

2.3. Fonctionnement racinaire

2.3.1. Le système racinaire du Froment

Le froment (*Triticum aestivum* L.) possède un système racinaire complexe, illustré en figure 2, structuré en plusieurs types de racines aux origines et fonctions distinctes. On distingue principalement deux systèmes racinaires successifs : un système séminal embryonnaire, issu de l'embryon de la graine, et un système adventif, ou nodal, formé à partir des nœuds de la tige (Pais et al., 2022).

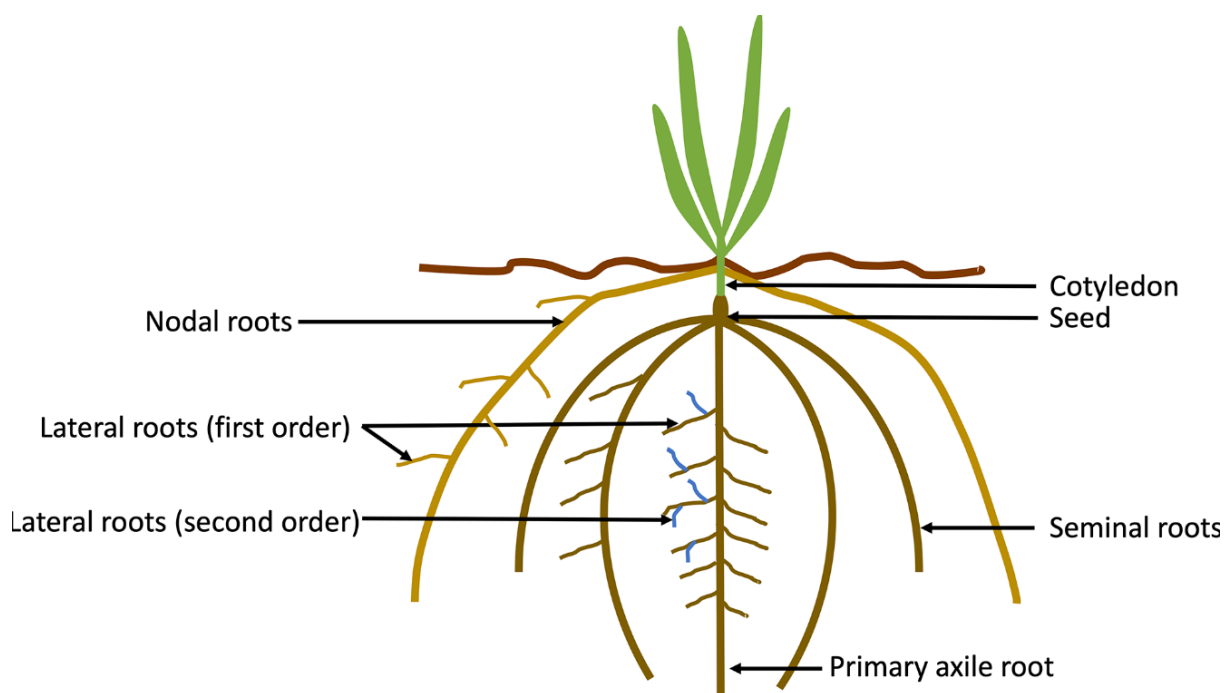


Figure 2 : Organisation schématique du système racinaire fasciculé du blé, distinguant les racines séminales, nodales et latérales.

Les racines séminales apparaissent dès la germination et comprennent une racine primaire ainsi que plusieurs racines embryonnaires secondaires. Elles assurent la vigueur initiale du plant et participent à l'exploration précoce du sol, notamment en profondeur, permettant l'acquisition d'eau et de nutriments dès les premiers stades de développement (Pais et al., 2022). Bien qu'elles ne représentent qu'une faible proportion de la longueur totale du système racinaire, elles restent fonctionnelles durant une grande partie du cycle et contribuent à la stabilité hydrique initiale de la plante (Gregory 2006).

Après quelques semaines, les racines nodales émergent au niveau des nœuds basaux de la tige. Plus nombreuses et généralement plus épaisses que les racines séminales, elles deviennent progressivement dominantes et assurent l'essentiel de l'ancrage mécanique ainsi que de l'absorption de l'eau et des nutriments en phase végétative avancée. Ces racines se développent majoritairement dans les horizons superficiels du sol, où elles exploitent les ressources disponibles en cours de cycle, notamment les apports azotés et le phosphore. (Fengdan Xu et al., 2020)

Sur ces axes principaux se développent des racines latérales issues du péricycle. Celles-ci représentent la majeure partie de la surface d'échange avec le sol et jouent un rôle déterminant dans l'absorption des ressources (Gregory 2006). Leur densité et leur distribution conditionnent fortement l'efficacité du système racinaire.

La coexistence de ces différents types racinaires traduit une stratégie d'exploration spatiale et temporelle du sol. Les racines séminales assurent une exploration précoce et profonde, tandis que les racines nodales permettent une exploitation progressive et plus superficielle des ressources. Les racines latérales, en se développant sur ces axes, optimisent l'exploration locale du sol. Cette organisation permet une division fonctionnelle du système racinaire, maximisant l'acquisition des ressources dans des environnements hétérogènes.

Dans ce cadre, la notion d'architecture racinaire regroupe l'ensemble des caractéristiques spatiales du système racinaire, telles que l'angle de croissance, la profondeur d'enracinement, la densité et la

ramification. Ces traits déterminent directement l'efficacité d'exploration du sol et influencent les performances agronomiques des cultures (Pais et al., 2022).

2.3.2. Fonctionnement cellulaire et physiologique des racines

Le développement et l'orientation des racines reposent sur des processus cellulaires et hormonaux complexes. La croissance racinaire est assurée par le méristème apical, situé à l'extrémité des racines, où des cellules souches se divisent activement. Ces cellules entrent ensuite dans une phase d'élongation, au cours de laquelle elles s'allongent fortement, contribuant à l'allongement de la racine, puis se différencient en tissus spécialisés (Hayashi et al., 2013).

Dans la zone de différenciation apparaissent les poils absorbants, qui augmentent considérablement la surface d'échange avec le sol et facilitent l'absorption des nutriments. C'est également dans cette zone que se forment les racines latérales, à partir de divisions cellulaires dans le péricycle, sous le contrôle de signaux hormonaux (Gregory 2006).

Les racines orientent leur croissance grâce à différents tropismes. Le gravitropisme constitue le mécanisme principal, permettant aux racines de croître vers le bas. Il repose sur la perception de la gravité par des statocytes contenant des amyloplastes, dont la sédimentation induit une redistribution de l'auxine dans la racine. Cette redistribution crée un gradient hormonal responsable d'une croissance différentielle, conduisant à une courbure de la racine. (Levernier et al., 2021)

L'hydrotropisme permet quant à lui aux racines de s'orienter vers des zones plus humides. Ce mécanisme implique notamment l'acide abscissique (ABA), permettant une adaptation fine à la disponibilité en eau (Dietrich et al., 2017).

Les racines réagissent également aux gradients de nutriments. Le nitrate agit à la fois comme nutriment et comme signal, modulant la formation des racines latérales via des interactions avec l'auxine (Krouk et al., 2010). En conditions de forte disponibilité locale, il stimule la ramification racinaire, orientant l'exploration vers les zones riches en azote. À l'inverse, le phosphore, peu mobile dans le sol, favorise le développement d'un système racinaire plus superficiel et fortement ramifié (Lynch et Brown, 2001).

Les hormones végétales jouent un rôle central dans ces processus. L'auxine constitue le principal régulateur du développement racinaire, contrôlant la division cellulaire, l'élongation et la formation des racines latérales (Overvoorde et al., 2010). Elle intervient également dans les tropismes en modulant la croissance différentielle.

L'ABA, en particulier, joue un rôle clé dans les réponses au stress hydrique. Chez les céréales, il a été montré qu'il pouvait moduler l'angle de croissance des racines en interaction avec l'auxine, favorisant une exploration plus profonde du sol en conditions de sécheresse (Xiong et al., 2025).

Ainsi, le système racinaire du froment ne suit pas un programme de développement fixe, mais résulte d'une intégration dynamique de signaux hormonaux et environnementaux, permettant une adaptation continue aux conditions du milieu.

2.3.3. Idéotypes racinaires et intérêt agronomique

Le concept d'idéotype racinaire correspond à la définition d'une architecture racinaire optimale pour un environnement et un objectif agronomique donnés (Lynch, 2021). Il s'agit de raisonner non pas en termes de maximisation de la biomasse racinaire, mais en termes d'efficacité fonctionnelle.

Plusieurs idéotypes ont été proposés pour le froment et les céréales. Un système racinaire profond, caractérisé par des racines à angle vertical, permet un accès accru à l'eau et à l'azote en profondeur, et est particulièrement adapté aux conditions de sécheresse. À l'inverse, un système racinaire superficiel et fortement ramifié favorise l'acquisition du phosphore, généralement concentré dans les horizons de surface (Lynch, 2021). Aussi, un système racinaire trop développé limitera la partie aérienne, l'allocation des ressources serait fortement distribuée vers le système racinaire.

Dans cette perspective, Lynch a proposé le concept d'idéotype racinaire dit *“steep, cheap and deep”*, visant à optimiser l'acquisition de l'eau et de l'azote dans des environnements limitants (Lynch, 2013). Cet idéotype repose sur trois principes complémentaires : (i) des racines *“steep”*, c'est-à-dire à angle d'insertion plus vertical, favorisant une exploration rapide des horizons profonds du sol ; (ii) des racines *“cheap”*, caractérisées par un coût de construction et d'entretien réduit (diamètre plus faible, moindre densité tissulaire, réduction du métabolisme racinaire), permettant une allocation plus efficiente des ressources ; et (iii) des racines *“deep”*, capables de coloniser des couches profondes du sol pour accéder à des ressources moins disponibles en surface. Ce concept met en évidence que l'efficacité d'un système racinaire ne repose pas sur sa taille, mais sur une combinaison de traits architecturaux et fonctionnels permettant de maximiser l'acquisition des ressources pour un coût minimal.

Les idéotypes racinaires présentent un intérêt agronomique majeur dans un contexte de changement climatique et de réduction des intrants. Ils permettent d'améliorer l'efficacité d'utilisation des ressources et de renforcer la résilience des systèmes agricoles (Lynch, 2021).

La sélection de ces idéotypes repose sur l'exploitation de la variabilité génétique existante. Des études ont montré l'existence de nombreux loci associés aux traits racinaires chez le blé, indiquant un potentiel important pour l'amélioration variétale (Soriano et Alvaro, 2019).

Les progrès du phénotypage racinaire, notamment via les rhizotrons, l'imagerie 3D ou les approches de modélisation, permettent aujourd'hui de caractériser ces traits de manière plus précise et à plus grande échelle.

Cependant, il n'existe pas d'idéotype universel. Les performances d'un système racinaire dépendent fortement du contexte pédoclimatique et des pratiques agricoles. Les interactions entre traits racinaires et environnement impliquent des compromis, rendant nécessaire une approche contextuelle de la sélection.

2.4. Captation de l'eau par les racines

2.4.1. Eau et fonctionnement physiologique de la plante

Chez les plantes vasculaires, l'eau est une variable intégratrice qui conditionne à la fois le métabolisme, la croissance et les flux de matière. Elle constitue le solvant dans lequel se déroulent la quasi-totalité des réactions biochimiques, assure l'absorption des éléments minéraux par le système racinaire et leur transport dans le xylème, et contribue à la circulation des assimilats via les gradients de pression qui structurent les échanges internes. À l'échelle cellulaire, l'eau remplit la vacuole et génère la turgescence, indispensable au maintien de la rigidité des tissus et à l'expansion cellulaire. Elle intervient aussi directement dans la photosynthèse, puisque l'oxydation de l'eau au niveau du photosystème II fournit les électrons nécessaires aux réactions photochimiques et conduit à la libération d'oxygène. Ainsi, toute diminution de l'état hydrique affecte simultanément la croissance, l'ouverture stomatique et l'assimilation du CO₂, ce qui fait de l'eau un déterminant central du fonctionnement global de la plante (Taiz et al., 2015; Kramer & Boyer, 1995; Nobel, 2020).

2.4.2. Potentiel hydrique et continuum sol-plante-atmosphère

La captation de l'eau par les racines s'explique par le concept de potentiel hydrique, noté Ψ , qui exprime l'énergie libre de l'eau dans un compartiment donné. L'eau se déplace d'un compartiment à potentiel hydrique plus élevé vers un compartiment à potentiel hydrique plus faible, c'est-à-dire, en pratique, du moins négatif vers le plus négatif. Dans la plante, Ψ résulte principalement des composantes de pression, osmotique et gravitationnelle; dans le sol, s'y ajoute une composante matricielle liée aux interactions entre l'eau et la matrice poreuse. La transpiration foliaire crée une succion qui se propage dans le xylème et entretient ce continuum hydraulique. À mesure que le sol se dessèche, son potentiel hydrique devient plus négatif et sa conductivité hydraulique chute fortement, de sorte qu'un même flux transpiratoire exige un gradient de potentiel plus accentué. Le fonctionnement racinaire doit donc être compris comme une réponse à la fois aux propriétés du sol et à la demande évaporative de la partie aérienne; c'est ce couplage qui relie hydraulique racinaire, statut hydrique foliaire, stomates et croissance (Kramer & Boyer, 1995; Nobel, 2020; De Swaef et al., 2022).

2.4.3. Voies radiales de transport dans la racine

Après avoir atteint la surface racinaire, l'eau progresse radialement vers le cylindre central selon trois voies concomitantes (voir figure 3). La voie apoplastique correspond au déplacement dans les parois et les espaces intercellulaires, sans franchissement membranaire. La voie symplastique implique une entrée dans le cytoplasme, puis un transfert de cellule à cellule via les plasmodesmes. La voie transmembranaire, enfin, repose sur des franchissements successifs des membranes plasmiques et tonoplastiques; elle dépend en partie des aquaporines, qui augmentent la perméabilité à l'eau et modulent la conductivité hydraulique des tissus. Ces voies ne sont pas équivalentes du point de vue fonctionnel. Le modèle de transport composite proposé par Steudle montre que leur contribution relative varie avec la structure anatomique de la racine, l'état de différenciation des tissus, l'existence de barrières apoplastiques exodermiques et endodermiques, ainsi que la nature de la force motrice. Sous forte demande transpiratoire, un gradient hydrostatique favorise davantage la circulation apoplastique et abaisse la résistance radiale apparente; lorsque le flux est davantage gouverné par des gradients osmotiques, la contribution de la voie cellulaire devient relativement plus importante. Il convient en outre d'éviter une vision trop simplifiée des bandes de Caspary et des lamelles subérisées: elles augmentent fortement la résistance et imposent une sélection physiologique accrue, mais ne constituent pas nécessairement des barrières absolument étanches dans toutes les situations. L'absorption de l'eau par la racine n'est donc pas un processus passif uniforme: c'est un dispositif hydraulique réglable, dont l'organisation conditionne l'alimentation du xylème et, en aval, l'état hydrique de tout l'appareil aérien (Steudle, 2000; Maurel et al., 2015; Kim et al., 2018).

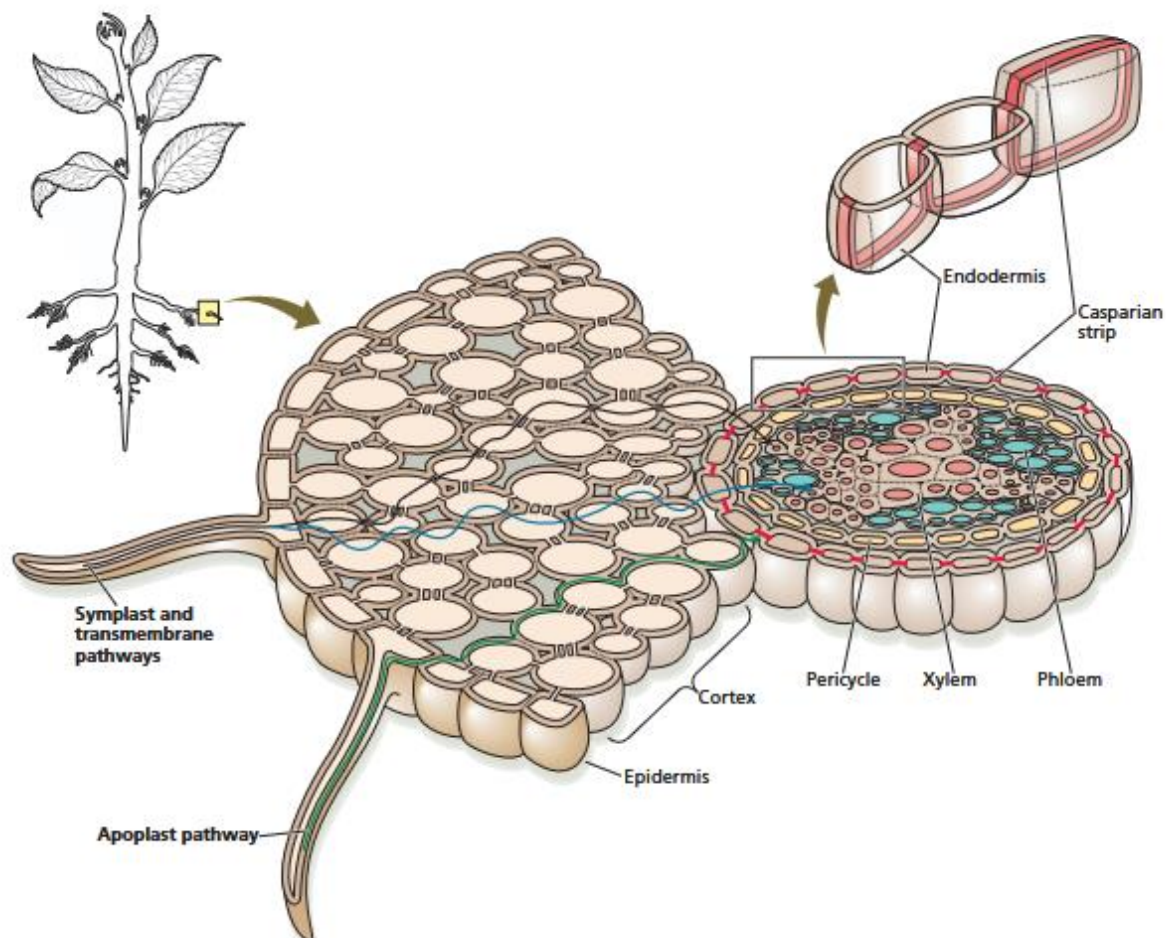


Figure 3 : Voies radiales de transport de l'eau dans la racine, distinguant les voies apoplastique, symplastique et transmembranaire.

2.4.4. Spécificités et enjeux fonctionnels chez le blé

Chez le blé (*Triticum aestivum*), l'intérêt agronomique de ces mécanismes tient au fait que la performance hydrique dépend moins d'une absorption maximale instantanée que d'une capture spatialement et temporellement optimisée. Les travaux de synthèse sur le blé soulignent qu'un enracinement plus profond, une redistribution de la densité racinaire vers la profondeur et une conductivité radiale suffisante dans les horizons profonds améliorent l'accès à l'eau stockée dans le sous-sol, particulièrement lorsque cette réserve soutient le remplissage du grain en fin de cycle (Wasson et al., 2012).

Cette idée est confirmée par les analyses de Manschadi et al. (2006), qui montrent que l'augmentation de l'extraction d'eau pendant la phase de remplissage peut se traduire par un gain direct de rendement, mais aussi que la valeur d'un trait racinaire dépend du scénario hydrique: dans certains environnements, une consommation trop précoce de l'eau du profil pénalise la disponibilité post-anthèse. Le lien entre captation racinaire et fonctionnement global est ici explicite. Si la racine maintient le flux d'eau vers la feuille au moment critique, elle préserve la turgescence, limite la fermeture stomatique, soutient l'activité photosynthétique et sécurise l'alimentation carbonée du grain. À l'inverse, une limitation hydraulique radiale ou un profil racinaire inadéquat réduit le potentiel hydrique foliaire, accélère les restrictions stomatiques et déplace la contrainte hydrique vers les organes aériens. Des résultats obtenus sur blé montrent d'ailleurs que, dans certaines conditions, la contribution de la voie cellulaire peut rester importante chez les jeunes racines, ce qui souligne que la base anatomique et membranaire de la conductivité racinaire entraîne des conséquences directes sur la réponse du couvert à la disponibilité en eau.

Enfin, sous régime hydrique limitant, des génotypes de blé de printemps produisant des racines plus fines et moins coûteuses en biomasse peuvent améliorer l'efficacité d'absorption de l'eau, ce qui rappelle qu'une « bonne » racine n'est pas nécessairement la plus volumineuse, mais celle dont l'architecture et les propriétés hydrauliques sont les mieux accordées au contexte pédoclimatique et au calendrier de demande de la plante (Kim et al., 2018; Manschadi et al., 2006; Brunel-Saldias et al., 2020; Wasson et al., 2012).

2.5. Inscription du mémoire dans le projet DROOGHT

2.5.1. Cadre scientifique

Dans le cadre du projet DROOGHT, ce mémoire s'inscrit dans une démarche plus large de compréhension de la réponse du blé à la sécheresse à partir de la variabilité entre génotypes. Cette orientation est scientifiquement cohérente avec la littérature actuelle, qui identifie plusieurs traits racinaires comme déterminants de l'accès à l'eau sous contrainte hydrique, notamment la profondeur d'enracinement, la densité de longueur racinaire, l'angle des racines, leur diamètre et certains traits anatomiques. Les travaux récents soulignent également que la valeur agronomique de ces traits dépend fortement du contexte environnemental dans lequel ils sont exprimés, ce qui renforce l'intérêt d'une approche articulant plusieurs dispositifs expérimentaux dans un contexte de changement climatique où les pertes agricoles liées à la sécheresse sont déjà importantes. (chen et al. 2025)

2.5.2. Référence agronomique du champ

Les mesures réalisées au champ constituent le référentiel agronomique du projet, parce qu'elles permettent d'observer le comportement des géotypes dans un profil de sol réel, avec des interactions complexes entre climat, structure du sol, disponibilité en eau, nutrition minérale et conduite culturale. C'est dans ce cadre que l'on peut apprécier la portée fonctionnelle de traits racinaires associés à l'acquisition de l'eau et de l'azote en profondeur. Toutefois, le phénotypage racinaire en conditions de champ demeure difficile : le sol est opaque, l'extraction des racines perturbe leur architecture, les méthodes restent limitées pour les racines profondes, et la variabilité augmente lorsque les dispositifs deviennent plus proches des conditions naturelles. Les données de champ sont donc essentielles, mais leur interprétation gagne à être complétée par des observations plus fines obtenues dans des conditions mieux maîtrisées. (odone 2025)

2.5.3. Apport méthodologique du rhizotron

C'est précisément à ce niveau que le travail en rhizotron prend sens comme contribution expérimentale et méthodologique au projet DROOGHT. Les rhizotrons permettent un suivi continu et non destructif de la croissance racinaire en conditions contrôlées, avec un accès direct à des variables qui sont beaucoup plus difficiles à obtenir au champ, comme la dynamique d'élongation, la longueur des racines, leur distribution spatiale, certains traits architecturaux et l'évolution temporelle du système racinaire. Ils offrent ainsi une lecture plus résolue du développement souterrain, tout en autorisant un phénotypage répétable sur un grand nombre d'individus. En contrepartie, ils simplifient le milieu et imposent une observation surtout bidimensionnelle ; leur intérêt n'est donc pas de remplacer le champ, mais d'apporter des mesures complémentaires capables d'enrichir l'interprétation agronomique. (INRAE, 2023)

2.5.4. Cohérence entre champ et rhizotron

Un enjeu central du mémoire est dès lors de tester si les relations observées entre géotypes au champ sont retrouvées en rhizotron. Cette question est méthodologiquement importante, car la littérature montre une situation contrastée : certaines études indiquent qu'un classement de géotypes obtenu à un stade précoce en système semi-contrôlé peut se maintenir plus tard lorsque les plantes sont cultivées en sol, tandis que d'autres montrent que les corrélations entre tubes ou rhizotrons et conditions de champ restent trop inconstantes pour prédire de manière robuste l'enracinement profond en situation réelle. Vérifier la cohérence des classements ou des relations entre traits dans les deux dispositifs permettrait donc d'évaluer la valeur du rhizotron comme outil de phénotypage complémentaire, non pas comme substitut au champ, mais comme appui pour interpréter plus finement les différences géotypiques observées en conditions agronomiques. (Figuerola-Bustos, 2018)

2.5.5. Relations allométriques et rationalisation du phénotypage

Cette comparaison a aussi un intérêt pratique pour la construction de protocoles de phénotypage plus efficaces. L'étude des relations allométriques entre traits aériens et souterrains permet en effet d'analyser les compromis de développement et d'allocation du carbone entre organes. Chez le blé, les relations entre biomasse aérienne et biomasse racinaire, entre hauteur ou surface foliaire et profondeur racinaire, ou encore entre longueur racinaire et dimensions de la partie aérienne, varient selon le géotype et les conditions hydriques. Plusieurs travaux montrent que certains indices allométriques fondés sur les surfaces ou les dimensions peuvent être plus informatifs du fonctionnement que de simples ratios de biomasse. Dans cette logique, si des corrélations robustes

émergent de vos données, certains traits rapides à mesurer pourraient servir de variables proxys pour d'autres traits plus coûteux, ouvrant la voie à une simplification raisonnée des protocoles sans perte majeure d'information. (Bochicchio et al., 2022)

2.5.6. Ouverture vers la modélisation racinaire

Enfin, les données produites dans ce mémoire peuvent contribuer à l'amélioration des modèles de simulation racinaire, en particulier CRootBox. Ce modèle structural-fonctionnel a été développé pour représenter la croissance de systèmes racinaires en trois dimensions, puis pour coupler cette architecture à des processus tels que l'absorption de l'eau et les flux dans le sol. Il repose explicitement sur des paramètres biologiques décrivant notamment l'élongation, la ramification, les angles et les réponses des racines à l'environnement, ainsi que sur des jeux de paramètres issus de données publiées. Dans cette perspective, les mesures générées par le mémoire peuvent fournir des informations utiles pour mieux paramétrer, calibrer ou évaluer le modèle pour le blé, en rapprochant les simulations d'un comportement observé à la fois en conditions contrôlées et au champ. Le mémoire apparaît ainsi comme une brique ciblée du projet DROOGHT : il produit des données fines, teste leur transférabilité entre dispositifs et renforce l'interface entre phénotypage expérimental et modélisation.

3. Objectifs

Ce mémoire s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés par Émile Davio et dans le cadre du projet DROOGHT, qui vise à mieux comprendre la réponse du blé aux contraintes hydriques à travers l'étude de traits racinaires, morphologiques et fonctionnels. L'objectif général de ce travail est de caractériser la diversité racinaire précoce de plusieurs génotypes de froment cultivés en rhizotron, en comparant des variétés issues de la collection INRAE et des accessions issues de la collection Watkins.

Le premier objectif est d'évaluer si la diversité génétique du matériel étudié se traduit par des différences phénotypiques mesurables au niveau du système racinaire. Pour cela, plusieurs traits ont été analysés, notamment la longueur racinaire, la vitesse de croissance, le diamètre moyen, la ramification, le nombre de racines, ainsi que les masses sèche foliaire et racinaire. Ces mesures permettent de comparer les génotypes entre eux, mais aussi d'identifier d'éventuelles tendances propres aux deux collections.

Le deuxième objectif est d'explorer les relations entre ces traits afin de mieux comprendre les stratégies de développement racinaire. Les différences de longueur, de diamètre, de ramification ou de biomasse peuvent traduire des stratégies contrastées d'allocation des ressources entre les parties aériennes et souterraines. Une attention particulière est portée à la relation entre diamètre et vitesse de croissance, afin d'évaluer si des racines plus épaisses correspondent à une croissance plus rapide ou à un investissement plus coûteux.

Enfin, ce travail vise à estimer la conductance du système racinaire, ou K_{rs} , afin de relier les différences phénotypiques observées à une dimension fonctionnelle. L'objectif est de déterminer si les variations de longueur, de diamètre, de nombre de racines ou de biomasse racinaire peuvent influencer la capacité potentielle du système racinaire à transporter l'eau vers la partie aérienne.

L'hypothèse générale est que la diversité génétique des génotypes étudiés se traduit par une diversité phénotypique observable dès les premiers stades de développement. Il est attendu que les accessions Watkins, issues d'un matériel ancien et géographiquement diversifié, présentent une variabilité plus importante que les variétés INRAE. Une seconde hypothèse est que ces différences morphologiques ne sont pas indépendantes, mais reflètent des compromis entre croissance, coût de construction et allocation de biomasse. Enfin, ces différences pourraient se traduire par des variations de K_{rs} , bien qu'un système racinaire plus développé ne corresponde pas nécessairement à une meilleure conductance hydraulique.

4. Matériel et méthode

4.1. Matériel végétal

Douze variétés de froment d'hiver (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*) ont été cultivées dans le cadre de cette étude. Six variétés proviennent de la collection INRAE : FEDOROVKA, TENOR, PROQUAL, TORRIL, BENNETT, CAYUGA. Six variétés sont issues de la collection Watkins: WATDE0230, WATDE0687, WATDE0044, WATDE0448, WATDE0918, WATDE0079.

Les variétés de la collection INRAE — FEDOROVKA, TENOR, PROQUAL, TORRIL, BENNETT, CAYUGA — sont des cultivars issus du centre INRAE de Clermont-Ferrand. Elles constituent des géotypes de référence couramment utilisés dans les expérimentations agronomiques et physiologiques pour étudier la variabilité génétique et l'interaction génotype × environnement.

Les accessions Watkins appartiennent à la Watkins Stabilised Collection, conservée au John Innes Centre (Royaume-Uni). Cette collection regroupe environ 827 blé tendre (chiffre 2024) collectées dans les années 1920-1930 dans 32 pays, stabilisées génétiquement par la méthode Single Seed Descent (SSD) afin d'être utilisées comme matériel expérimental. Elles présentent une diversité génétique considérablement plus large que celle des variétés modernes, ce qui en fait un matériel de choix pour l'étude de la diversité racinaire et de la tolérance aux stress abiotiques. Parmi les accessions utilisées, WATDE0044 est originaire de Chine, WATDE0230 de Roumanie, WATDE0687 d'Irak, WATDE0448 de crête, WATDE0918 d'Inde, et WATDE0079 de Bulgarie. Le préfixe WATDE indique une lignée stabilisée issue d'une accession Watkins, tandis que le numéro identifie le géotype spécifique dans la collection. La figure 4 illustre le dispersement de la collection Watkins étudiés.



Figure 4 : Origine géographique des accessions Watkins de blé étudiées

Deux expériences ont été menées. La première implique 12 variétés cultivées à raison de 5 réplicas chacune, pour un total de 60 plantes. La seconde constitue une duplication du protocole. Au total, 10 réplicas sont disponibles par variété.

4.2. Dispositif expérimental

Le protocole expérimental est inspiré des travaux de Davio (2025), dont ce travail constitue la suite directe. Avant la mise en place des expériences principales, un pré-test a été réalisé afin d'identifier les difficultés pratiques susceptibles d'être rencontrées lors de l'utilisation des rhizotrons. Notamment la formation de bulles entre le nylon et la vitre causé par un succion du substrat, qui prédestinerait le chemin du système racinaire.

Les graines ont été préalablement conservées en chambre froide avant le semis. Cette étape visait à maintenir les graines dans des conditions stables avant leur mise en culture et à favoriser une germination aussi homogène que possible entre les individus

Les plantes ont été cultivées en phytotron dans des conditions strictement contrôlées : température maintenue à 20°C et photopériode de 16 heures par jour. La durée de chaque expérience a été fixée à 15 jours à partir du semis, soit un cumul de 300 degrés-jour. La croissance a été volontairement arrêtée lorsqu'une majorité des plantes atteignaient le stade trois feuilles, afin d'éviter le besoin de vernalisation et que le système racinaire reste à une dimension scannable.

Le suivi racinaire a été rendu possible par l'utilisation de rhizotrons de 60 cm de hauteur et 20 cm de largeur. Chaque rhizotron est constitué d'une planche en bois sur laquelle des mousses sont fixées, remplie de substrat de manière compacte. Une membrane semi-perméable polyamide 32 μ (Inoviaflow) sépare physiquement les racines du substrat tout en laissant passer l'eau et les nutriments. Une vitre en plexiglas est placée en face avant pour permettre l'observation visuelle du système racinaire. Sur cette vitre sont collées des feuilles plastiques transparentes sur lesquelles les tracés racinaires sont effectués au marqueur ; ces feuilles peuvent ensuite être décollées et scannées directement. L'ensemble du matériel a été désinfecté à l'éthanol avant montage. Les rhizotrons sont positionnés verticalement avec une légère inclinaison et répartis de manière aléatoire dans six bacs afin d'éviter tout biais lié au positionnement.

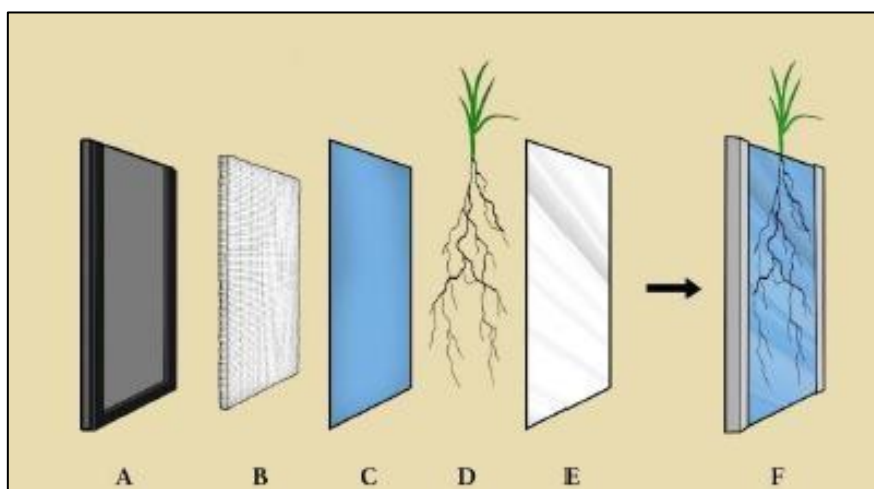


Figure 5 : schéma du dispositif de rhizotron utilisé pour le suivi de la croissance racinaire. Source : davio (2025).

Le substrat utilisé était composé d'un tiers de sable, d'un tiers de terreau et d'un tiers d'un mélange de terre de culture et de compost. Dans ce dernier tiers, le compost représentait un quart du mélange. Le terreau utilisé correspondait à un substrat d'argile DCM n° 9, à base de tourbes et contenant de l'argile, avec un pH compris entre 5,0 et 6,5. Il est préalablement homogénéisé à la bétonnière puis tamisé afin d'éliminer les agrégats susceptibles de perturber le développement racinaire. Les grains sont semés à une profondeur de 3 ± 1 cm, positionnés directement au-dessus de la membrane. L'arrosage est effectué trois fois par semaine à l'eau de pluie, jusqu'à saturation du sol, afin de maintenir une teneur en eau élevée et d'éviter tout stress hydrique.

4.3. Mesures et observations

4.3.1. Mesures dynamiques

La vitesse d'élongation racinaire ainsi que la hauteur des plantes sont mesurées trois fois par semaine tout au long de l'expérience. Pour la croissance racinaire, l'avancée des racines est tracée manuellement à l'aide d'un marqueur permanent directement sur les feuilles plastiques collées contre la vitre en plexiglas du rhizotron, avec notation de la date à chaque relevé, illustré à la figure 6. Pour chaque plante, le suivi dynamique a porté principalement sur deux axes racinaires : la racine présentant le plus fort développement visible, considérée opérationnellement comme la racine primaire, et une racine séminale secondaire. Ces deux racines ont été identifiées respectivement comme racines A et B afin de permettre leur suivi au cours du temps et leur association aux données de numérisation.

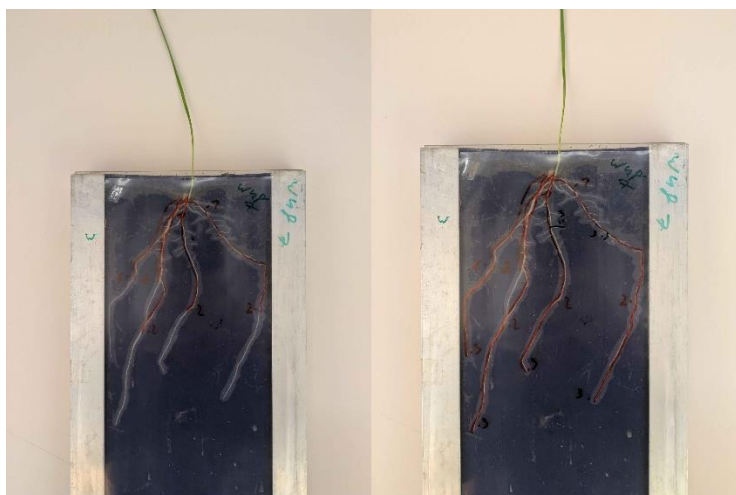


Figure 6 : Exemple de tracés successifs réalisés sur feuille transparente pour suivre l'élongation des racines au cours du temps.

4.3.2. Mesures statiques

Au quinzième et dernier jour de l'expérience, deux mesures statiques sont réalisées pour chaque plante. Le nombre de racines séminales est compté manuellement ; la racine primaire y est incluse en raison de la difficulté à la distinguer clairement des autres racines séminales. Le nombre de feuilles est également relevé, une feuille étant comptabilisée dès que son limbe est sorti de la gaine de la feuille précédente.



Figure 7 : Rhizotron ouvert en fin d'expérience, montrant le développement du système racinaire contre la membrane semi-permeable.

4.4. Numérisation et traitement d'image

Les feuilles plastiques sont décollées de la vitre et numérisées directement à l'aide d'un scanner à une résolution de 300 DPI. À la fin de l'expérience, les racines sont coupées, lavées puis conservées dans des tubes Falcon contenant de l'éthanol à 50 % jusqu'à leur numérisation, via un scanner EPSON Perfection V850, à une résolution de 1200 DPI. La racine présentant le plus fort développement visible, considérée opérationnellement comme la racine primaire, est stockée séparément. Pour chaque plante, cette racine primaire ainsi qu'une racine séminale secondaire sont numérisées selon le même protocole. Les racines sont numérotées afin de pouvoir associer les tracés réalisés sur feuilles transparentes aux scans correspondants.

Avant leur analyse dans SmartRoot, les scans racinaires ont été prétraités à l'aide du logiciel ImageJ. Ce traitement a été réalisé par lot afin d'appliquer les mêmes opérations à l'ensemble des images d'une même expérience. La macro utilisée, présentée en annexe 1, comprenait notamment une soustraction de fond, un ajustement du contraste et un lissage de l'image. Cette étape avait pour objectif d'améliorer la lisibilité des racines sur les scans et de faciliter leur tracé manuel ultérieur dans SmartRoot. Cette étape avait pour objectif d'améliorer la lisibilité des racines sur les scans, de faciliter leur tracé manuel ultérieur dans SmartRoot, et de permettre une estimation du diamètre davantage liée à l'ensemble de la racine qu'à la seule structure du xylème.

4.5. Analyse des données

4.5.1. Structure des données

Les images racinaires obtenues après numérisation ont été analysées à l'aide du logiciel SmartRoot. Ce logiciel permet de retracer manuellement les axes racinaires à partir d'images scannées (voir figure 8 et 9), puis d'en extraire différentes informations morphologiques et spatiales, telles que la longueur, le diamètre, la position des points successifs le long des racines ou encore l'évolution de la croissance dans le temps.

Les tracés réalisés dans SmartRoot peuvent être enregistrés au format RSML (*Root System Markup Language*) (Lobet et al., 2015). Ce format standardisé, basé sur la norme XML, a été développé afin de faciliter le stockage, l'échange et la réutilisation des données de phénotypage racinaire entre différents logiciels. Il permet de conserver de manière structurée des informations issues d'images 2D ou 3D, notamment la géométrie des racines, leur organisation et certaines de leurs propriétés

morphologiques. Dans le cadre de ce mémoire, le format RSML a constitué une étape intermédiaire permettant de conserver les tracés racinaires produits avec SmartRoot.

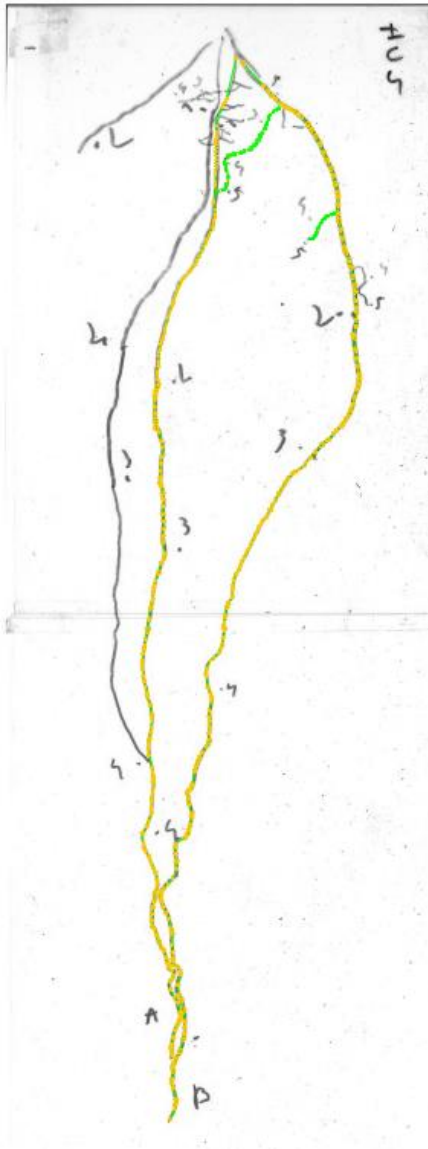


Figure 8 : Exemple de tracé SmartRoot réalisé à partir d'une feuille transparente scannée, montrant les axes racinaires suivis et les racines latérales associées.



Figure 9 : Exemple de scan racinaire traité dans smartroot, montrant le tracé des axes racinaires et des ramifications latérales.

Les données ont ensuite été exportées depuis SmartRoot sous forme de fichiers CSV (*Comma Separated Values*) afin de permettre leur traitement dans R. Quatre types de jeux de données ont été utilisés : *Global Root Data*, *Root Nodes*, *Growth Rate* et *All Marks*. Le fichier *Global Root Data* regroupe les informations générales relatives à chaque racine tracée, notamment les variables globales de longueur ou de diamètre. Le fichier *Root Nodes* contient les informations associées aux nœuds successifs le long des axes racinaires, comme leurs coordonnées et les mesures locales de diamètre. Le fichier *Growth Rate* renseigne la progression des racines entre les différentes dates de mesure et permet donc d'estimer leur vitesse d'élongation. Enfin, le fichier *All Marks* rassemble les repères temporels placés lors du suivi des racines sur les feuilles transparentes, permettant de relier les positions observées aux dates de mesure.

Ces fichiers CSV issus de SmartRoot ont ensuite été nettoyés et associés aux données expérimentales afin de relier chaque mesure racinaire à une plante, une variété, une collection et une expérience. Cette étape d'association a nécessité l'harmonisation des identifiants entre les noms d'images, les codes des plantes et les tableaux de mesures manuelles.

Les mesures manuelles réalisées au cours des expériences, telles que les hauteurs, le nombre de feuilles, le nombre de racines et les masses sèches, ont quant à elles été stockées sous format .xlsx afin de faciliter leur organisation. Ces fichiers Excel ont ensuite été importés dans R et combinés aux données issues de SmartRoot pour réaliser les analyses graphiques et statistiques.

4.5.2. Analyse des données

L'ensemble de l'analyse des données a été réalisé avec le logiciel RStudio. Les données manuelles, stockées au format .xlsx, et les données issues de SmartRoot, exportées au format CSV, ont été importées puis restructurées dans R. La librairie dplyr a été utilisée pour le nettoyage, le filtrage, le regroupement des observations et l'association des mesures aux variétés, collections et expériences. La librairie ggplot2 a été utilisée pour la réalisation des graphiques.

Avant les analyses, les identifiants des plantes ont été harmonisés afin d'associer chaque individu à sa variété, à sa collection d'origine et à son expérience. Les variétés ont été regroupées en deux collections, INRAE et Watkins. Les deux expériences ont d'abord été traitées séparément, puis fusionnées lorsque cela était pertinent. Les plantes considérées comme mortes ont été retirées des analyses morphologiques et de croissance. Une plante a été considérée comme morte lorsque sa hauteur finale était inférieure à 12 cm. L'accession WATDE0918 a également été exclue de plusieurs analyses en raison de sa forte mortalité.

Les comparaisons ont été réalisées à deux échelles : entre variétés et entre collections. Pour certaines variables, des modèles linéaires simples ont été construits avec la fonction `lm()`, en utilisant soit la variété, soit la collection comme facteur explicatif. Les comparaisons entre groupes ont ensuite été réalisées à l'aide de la librairie `emmeans`, puis synthétisées sous forme de lettres statistiques avec la fonction `clld()` de la librairie `multcomp`, avec un ajustement de Tukey. Ces lettres ont été ajoutées aux graphiques afin de faciliter la lecture des différences entre groupes.

Les variables analysées comprennent notamment la hauteur, la masse sèche foliaire, la masse sèche racinaire, le nombre de feuilles, le nombre de racines, la longueur racinaire, le diamètre moyen et certaines variables de croissance. Les résultats ont principalement été représentés sous forme de boîtes à moustaches accompagnées des points individuels, afin de visualiser à la fois les tendances générales et la dispersion des données.

Les traits dynamiques ont été analysés à partir de l'évolution des longueurs racinaires au cours du temps. La vitesse de croissance a été calculée comme la variation de longueur entre deux dates de mesure successives, rapportée au temps écoulé. Les profils de diamètre ont été étudiés le long des axes racinaires à partir des données issues de SmartRoot. Comme les mesures brutes présentaient de fortes fluctuations locales, des moyennes mobiles ou des ajustements de type LOESS ont été utilisés afin de faire apparaître les tendances générales.

Enfin, les relations entre traits racinaires, notamment entre diamètre et vitesse de croissance, ont été explorées graphiquement à l'aide de courbes de tendance ou de régressions linéaires. Ces analyses avaient pour objectif d'identifier d'éventuelles associations entre les traits, sans être interprétées comme des relations causales directes.

4.6. Simulation racinaire et estimation du Krs

Afin de relier les différences morphologiques observées à une dimension fonctionnelle, une estimation de la conductance hydraulique du système racinaire, ou Krs, a été réalisée par modélisation. Les simulations ont été construites à partir du fichier de paramètres de blé *Triticum_aestivum_Bingham_2011*, fourni avec CRootBox/CPlantBox. Ce paramétrage de référence a été utilisé comme base commune, puis certaines valeurs ont été remplacées par les données obtenues expérimentalement pour chaque variété. Les paramètres modifiés concernaient principalement la longueur maximale des axes racinaires (l_{max}), la vitesse de croissance racinaire (r), le rayon racinaire (a), calculé à partir du diamètre moyen mesuré, ainsi que le nombre de racines lorsque cette information était disponible. Les autres paramètres non mesurés ont été conservés à partir du fichier de référence.

Pour chaque variété, 100 architectures racinaires ont été simulées sur une durée de 15 jours. Les systèmes racinaires générés ont ensuite été exportés sous forme de segments individuels, décrits par leur longueur, leur rayon, leur position verticale et leur relation avec le segment parent. Ces architectures ont été utilisées comme données d'entrée dans MARSHAL, afin de calculer le Krs à partir du réseau hydraulique racinaire simulé.

Les conductivités radiales et axiales n'ayant pas été mesurées expérimentalement, elles ont été maintenues constantes entre variétés à partir de valeurs de référence. Cette approche permet donc de comparer les variétés à propriétés hydrauliques constantes, en isolant principalement l'effet de l'architecture racinaire simulée et du diamètre moyen mesuré. Les valeurs obtenues doivent ainsi être interprétées comme des estimations comparatives du Krs, et non comme des mesures physiologiques absolues propres à chaque génotype.

4.7. Différence entre les deux expériences

Les deux expériences ont suivi un protocole général similaire, mais présentent un léger décalage temporel dans le calendrier des mesures. Dans l'expérience 2, la première mesure des plantes a été réalisée un jour plus tôt par rapport au semis que dans l'expérience 1. Par conséquent, l'ensemble des mesures dynamiques de l'expérience 2 est décalé d'un jour par rapport à celles de l'expérience 1. De plus, la récolte finale de l'expérience 2 a été réalisée un jour plus tard que celle de l'expérience 1. Ces différences de calendrier doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats, car elles peuvent contribuer à certaines variations observées entre les deux expériences, notamment pour les traits liés à la croissance et à la longueur racinaire.

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 comparaison entre les génotypes étudiés est effectuée afin de mettre en évidence la diversité phénotypique observée pour les principaux traits racinaires mesurés. Dans un second temps, l'analyse se concentre sur la croissance racinaire, en particulier sur l'évolution des racines au cours du temps et sur les relations entre certains traits dynamiques, tels que la vitesse d'élongation, et des traits morphologiques comme le diamètre. Enfin, dans un troisième temps, les résultats sont abordés de manière plus intégrative à travers l'estimation de la conductance du système racinaire, ou Krs, ainsi que par une analyse en composantes principales visant à synthétiser les principaux axes de variation entre génotypes.

5.1. Comparaison des génotypes

5.1.1. Survivabilités des génotypes

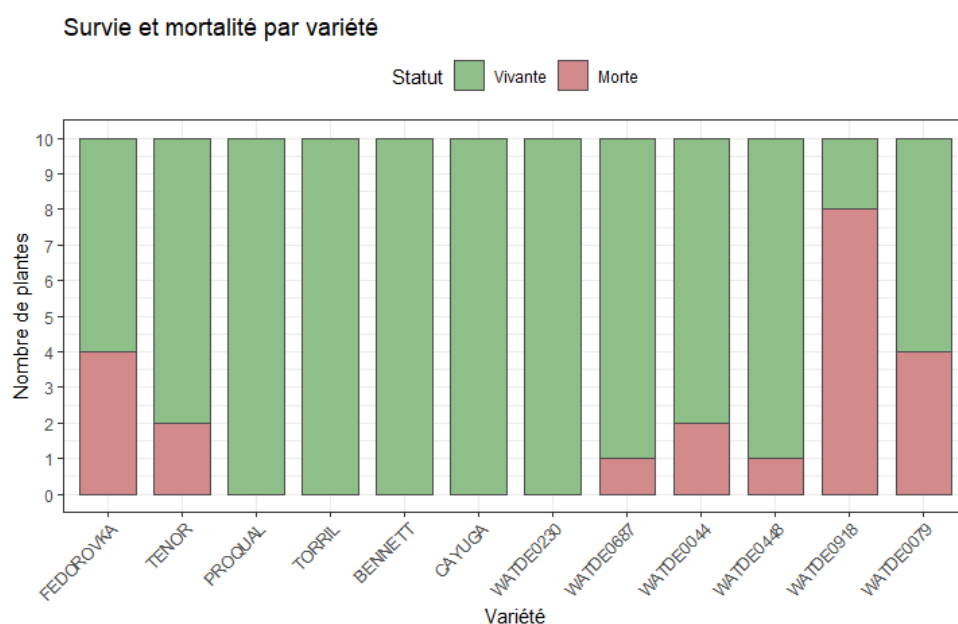


Figure 10 : Survie et mortalité des plantes par variété, toutes expériences confondues.

La survie des plantes, illustré à la figure 10, a été évaluée à la fin de l'expérience pour chaque variété. Une plante a été considérée comme morte lorsque sa hauteur à la récolte était inférieure à 12 cm. Ce seuil permet de distinguer les individus présentant un retard de croissance important des plantes viables mais naturellement plus petites.

Ce choix repose notamment sur l'observation qu'au-delà de 12 cm, certaines variétés de petite taille, comme TORRIL, sont rapidement retrouvées. À l'inverse, les plantes situées sous ce seuil correspondent généralement à des individus ayant mis plus de temps à atteindre la surface et dont le développement est fortement compromis.

La plupart des variétés présentent une bonne survie globale. WATDE0918 se distingue toutefois par une mortalité nettement plus élevée que les autres génotypes. Pour cette raison, cette accession a été retirée des analyses ultérieures. De même, toutes les plantes considérées comme mortes selon ce critère ont été exclues des résultats présentés par la suite.

La répartition des plantes mortes n'est toutefois pas uniforme entre les deux expériences. Certaines variétés présentent peu ou pas d'individus morts dans les deux essais, tandis que d'autres concentrent davantage de mortalité dans une expérience en particulier. Cette distribution ne semble donc pas entièrement aléatoire, mais conserve une certaine cohérence avec les génotypes, certains apparaissant plus sensibles aux conditions expérimentales ou plus sujets à un retard d'émergence. Le graphique détaillant la répartition des plantes mortes entre l'expérience 1 et l'expérience 2 est présenté en Annexe 2.

5.1.2. Tailles des plantes

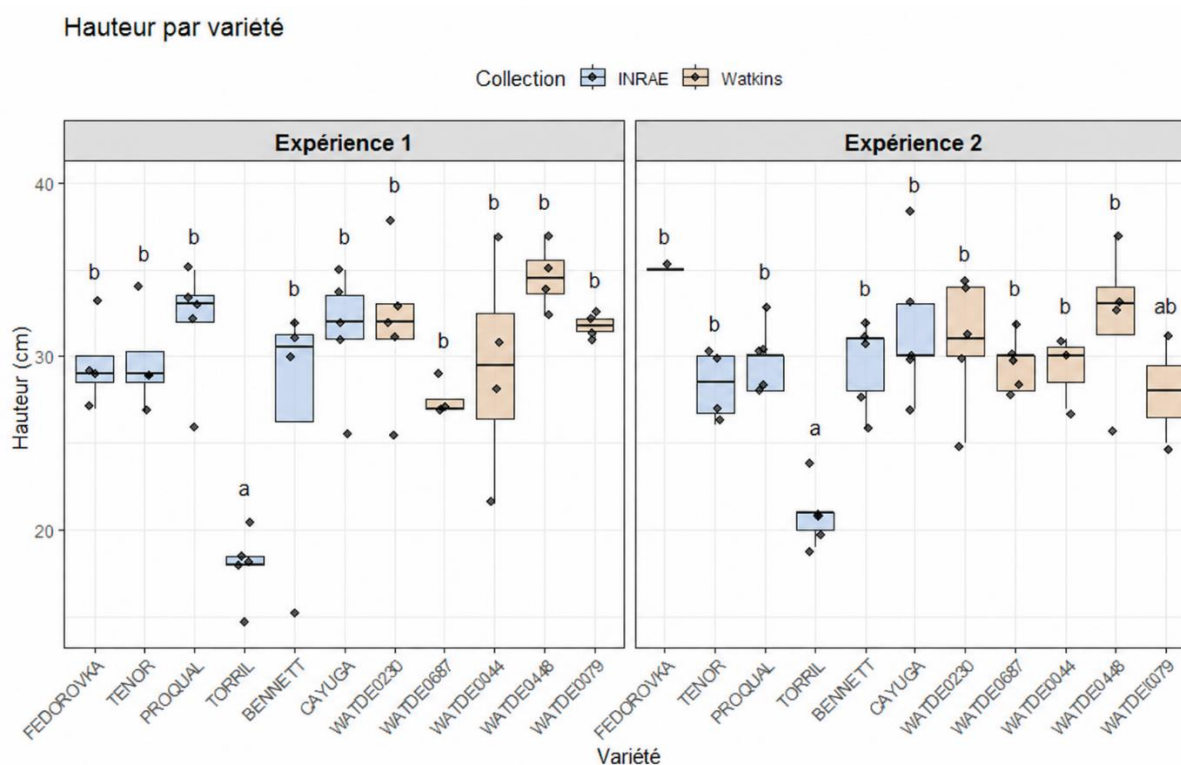


Figure 11 : Hauteur des plantes par variété dans les deux expériences.

La hauteur des plantes (la distance entre la graine et la hauteur tirée de la plus grande feuille) varie entre les génotypes, avec des tendances globalement comparables entre les deux expériences. Comme le montre la figure 11, la majorité des variétés présentent des hauteurs comprises autour de 25 à 35 cm. Les lettres statistiques montrent cependant que la plupart des génotypes ne se distinguent pas fortement les uns des autres, plusieurs variétés appartenant au même groupe statistique.

Un des éléments attendus dans cette étude est une variabilité plus importante au sein des accessions Watkins que parmi les variétés INRAE. Les Watkins correspondent en effet à des accessions issues de populations plus anciennes, ayant été sélectionnées dans des environnements locaux spécifiques,

tandis que les variétés INRAE correspondent davantage à du matériel moderne, sélectionné dans des contextes agronomiques plus contrôlés et homogénéisés. Cette différence d'origine peut théoriquement se traduire par une plus grande dispersion phénotypique chez les Watkins.

Cette tendance doit toutefois être interprétée avec prudence, car TORRIL présente un profil très particulier dans les deux expériences. Cette variété montre des hauteurs nettement plus faibles que celles observées chez les autres génotypes et constitue la seule variété associée à la lettre « a » dans les deux essais. Par sa stature très réduite, TORRIL contribue fortement à augmenter la variabilité apparente des INRAE. Son comportement ne doit donc pas être interprété uniquement comme une variation classique au sein de cette collection. Pour cette raison, le cas de TORRIL sera détaillé plus loin dans la suite des résultats, afin de déterminer si cette faible hauteur s'accompagne également de particularités au niveau des traits racinaires ou de la croissance générale.

La variabilité observée au sein des variétés INRAE est présentée de manière complémentaire en Annexes 3 et 4. L'Annexe 3 illustre cette variabilité en incluant TORRIL, tandis que l'Annexe 4 présente la même analyse après son retrait. Cette comparaison permet de visualiser l'influence importante de TORRIL sur la dispersion des hauteurs au sein du groupe INRAE, et de mieux distinguer la variabilité propre aux autres variétés de cette collection.

5.1.3. Longueur racinaire

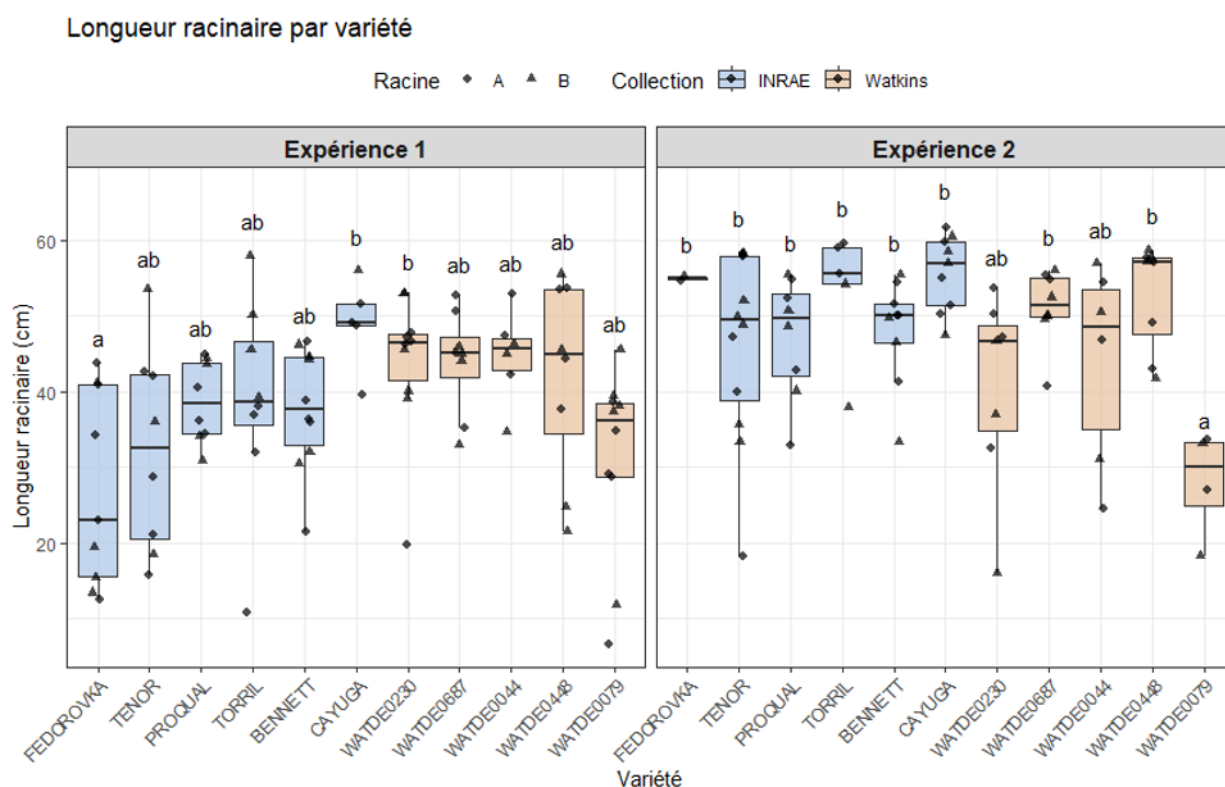


Figure 12 : Longueur racinaire des axes suivis A et B par variété dans les deux expériences.

La longueur racinaire varie entre les génotypes, mais également entre les deux expériences, comme le montre la figure 12. Les valeurs mesurées apparaissent globalement plus élevées dans l'expérience 2 que dans l'expérience 1. Cette différence doit cependant être interprétée en tenant compte du

calendrier expérimental : dans l'expérience 2, les mesures ont été initiées un jour plus tôt par rapport au semis, tandis que la récolte finale a été réalisée un jour plus tard. Les plantes de l'expérience 2 ont donc bénéficié d'une fenêtre de croissance légèrement différente, ce qui peut contribuer à expliquer une partie de l'augmentation générale des longueurs racinaires observées.

Dans l'expérience 1, les différences entre variétés restent relativement modérées, avec un recouvrement important entre les distributions. FEDOROVKA présente les longueurs racinaires les plus faibles et se distingue statistiquement du groupe des génotypes présentant les valeurs les plus élevées, comme CAYUGA ou WATDE0230. La majorité des autres variétés occupe une position intermédiaire, indiquée par la lettre « ab », ce qui suggère une variabilité inter-variétale présente mais limitée.

Dans l'expérience 2, les longueurs racinaires sont globalement plus importantes et plusieurs génotypes atteignent des valeurs proches ou supérieures à 50 cm. La plupart des variétés appartiennent au groupe statistique « b », ce qui traduit des longueurs comparables entre elles. WATDE0079 se distingue cependant par des longueurs plus faibles et appartient au groupe « a », tandis que WATDE0230 et WATDE0044 présentent une position intermédiaire. Cette différence avec l'expérience 1 peut refléter à la fois un effet génotypique et l'effet du léger décalage temporel entre les deux expériences.

Ainsi, ce graphique met en évidence une variabilité de la longueur racinaire entre génotypes, mais montre également que la comparaison directe entre les deux expériences doit rester prudente. Une partie des différences observées, notamment l'augmentation générale des longueurs dans l'expérience 2, peut être liée au calendrier expérimental plutôt qu'à une différence strictement biologique entre les lots.

5.1.4. Nombre de feuilles

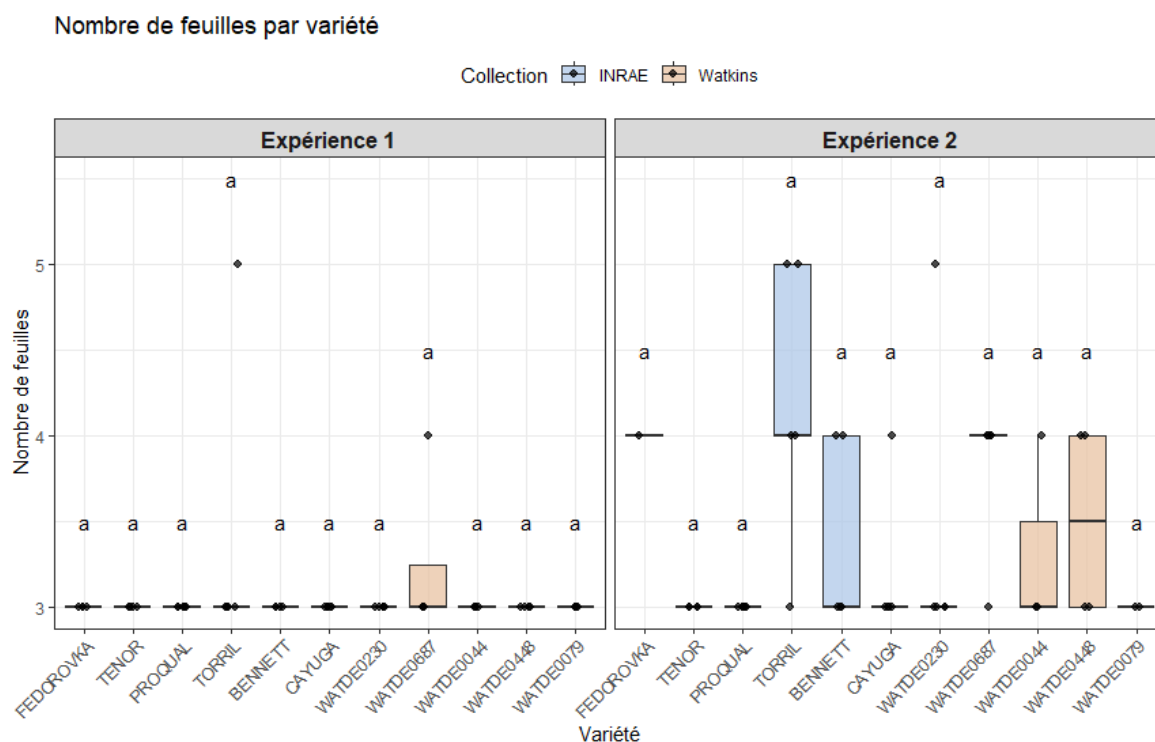


Figure 13 : Nombre de feuilles par variété dans les deux expériences.

La figure 13 montre que le nombre de feuilles varie peu dans l'expérience 1, où la quasi-totalité des plantes présente trois feuilles au moment de la mesure. Cette faible variabilité limite donc la capacité à distinguer les génotypes sur la base de ce trait dans cette première expérience. À l'inverse, l'expérience 2 montre une distribution plus étalée, avec certains individus atteignant quatre ou cinq feuilles, ce qui permet de mieux observer les différences de développement entre génotypes.

Ce graphique permet notamment de préciser le profil particulier de TORRIL. Bien que cette variété présente une hauteur maximale nettement plus faible que les autres, elle possède un nombre de feuilles relativement élevé dans l'expérience 2. TORRIL semble donc avoir un port plus court, sans pour autant présenter un développement aérien fortement réduit en nombre d'organes. Cela peut expliquer pourquoi ce génotype ressort peu dans les analyses de masse sèche foliaire, malgré sa faible hauteur : sa stature réduite ne correspond pas nécessairement à une biomasse aérienne proportionnellement plus faible.

5.1.5. Nombre de racine séminale

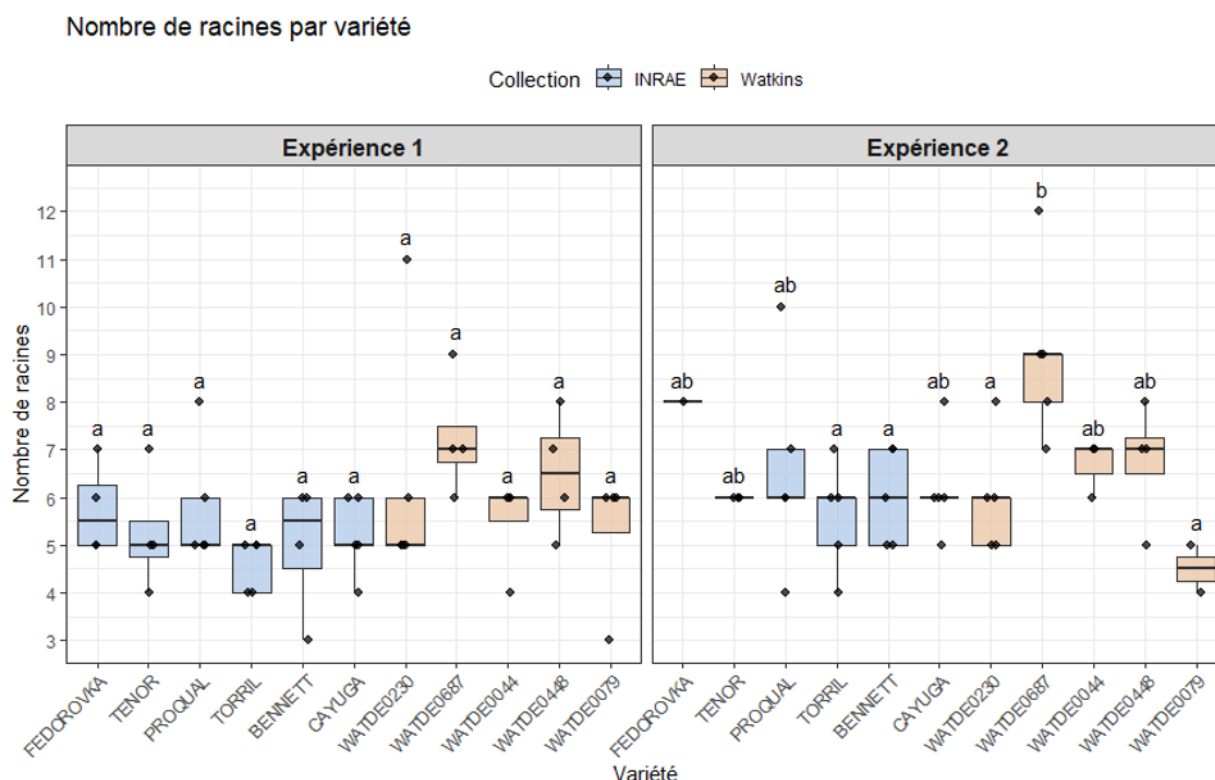


Figure 14 : Nombre de racines séminales par variété dans les deux expériences.

Le nombre de racines séminales varie entre les génotypes, illustré avec la figure 14, avec une variabilité légèrement plus marquée dans l'expérience 2. Dans l'expérience 1, les différences statistiques restent limitées, l'ensemble des variétés appartenant au même groupe. Certaines tendances apparaissent néanmoins, notamment chez WATDE0687 et WATDE0448, qui présentent des nombres de racines relativement élevés, alors que TORRIL se situe plutôt parmi les valeurs les plus faibles.

Dans l'expérience 2, les différences entre génotypes sont plus visibles. WATDE0687 se distingue par le nombre de racines le plus élevé, tandis que WATDE0079 présente les valeurs les plus faibles. Les autres variétés occupent une position intermédiaire, avec un recouvrement important entre les distributions. Ce graphique suggère donc une variabilité inter-variétale du nombre de racines, mais celle-ci reste moins marquée que pour d'autres traits comme la masse racinaire ou la hauteur maximale.

5.2. Masse des plantes

5.2.1. Masse sèche foliaire

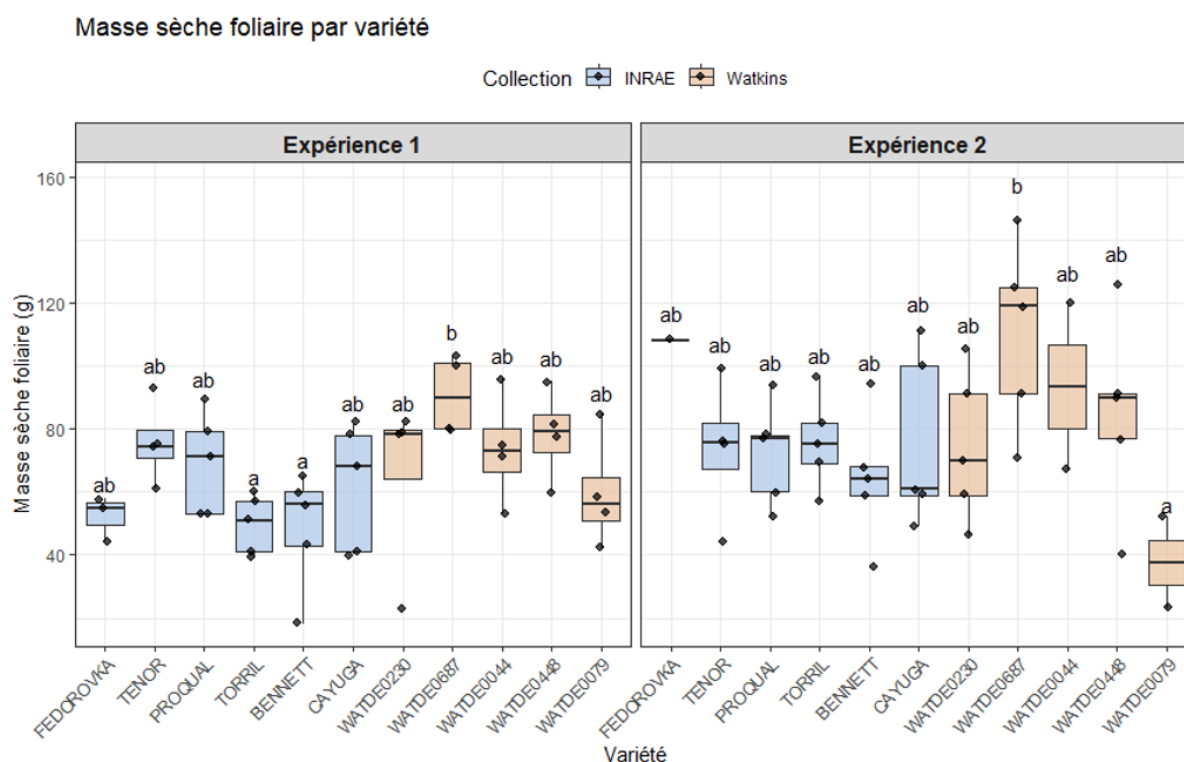


Figure 15 : Distribution de la masse sèche foliaire par variété dans les deux expériences.

La masse sèche foliaire varie entre les génotypes (voir figure 15), avec des différences globalement plus marquées dans l'expérience 2. Les valeurs y sont généralement plus élevées que dans l'expérience 1, ce qui peut en partie s'expliquer par la récolte réalisée un jour plus tard et donc par un temps de croissance légèrement plus long.

Dans l'expérience 1, TORRIL et BENNETT présentent les masses foliaires les plus faibles, tandis que WATDE0687 se distingue par des valeurs plus élevées. Dans l'expérience 2, WATDE0687 conserve des masses foliaires importantes, alors que WATDE0079 présente les valeurs les plus faibles. La majorité des autres variétés occupe une position intermédiaire, avec un recouvrement important entre les distributions.

Ce graphique montre donc une variabilité inter-variétale de la biomasse foliaire, mais la comparaison entre les deux expériences doit rester prudente en raison du décalage temporel du protocole.

5.2.2. Masse sèche racinaire

Masse sèche racinaire par variété

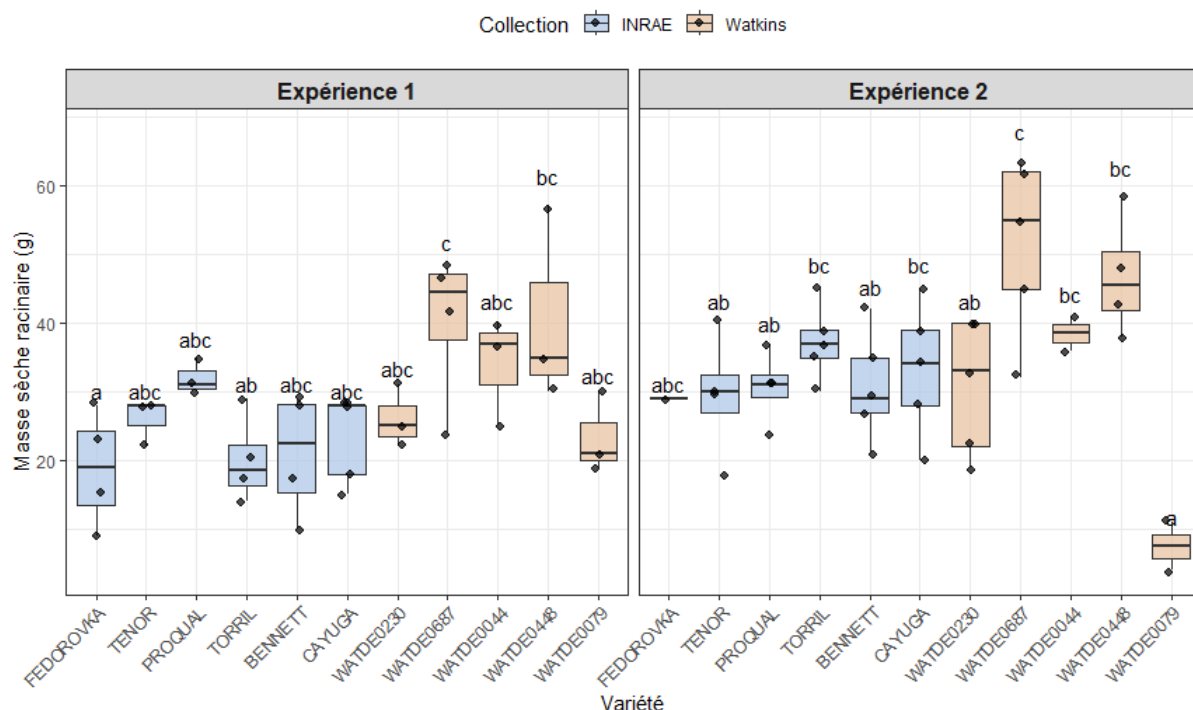


Figure 16 : Distribution de la masse sèche racinaire par variété dans les deux expériences.

La masse sèche racinaire, illustré à la figure 16, varie entre les génotypes, avec une dispersion parfois importante au sein d'une même variété. Dans l'expérience 1, FEDOROVKA présente les valeurs les plus faibles, tandis que WATDE0687 se distingue par une masse racinaire plus élevée. Dans l'expérience 2, les différences entre génotypes apparaissent plus marquées : WATDE0687 conserve les valeurs les plus importantes, alors que WATDE0079 présente une masse racinaire nettement inférieure aux autres variétés.

Ce graphique met donc en évidence une variabilité inter-variétale de la biomasse racinaire, avec certains génotypes Watkins présentant des profils plus extrêmes. Ces résultats suggèrent que l'investissement dans le système racinaire diffère selon les variétés, aussi bien en intensité qu'en régularité entre individus.

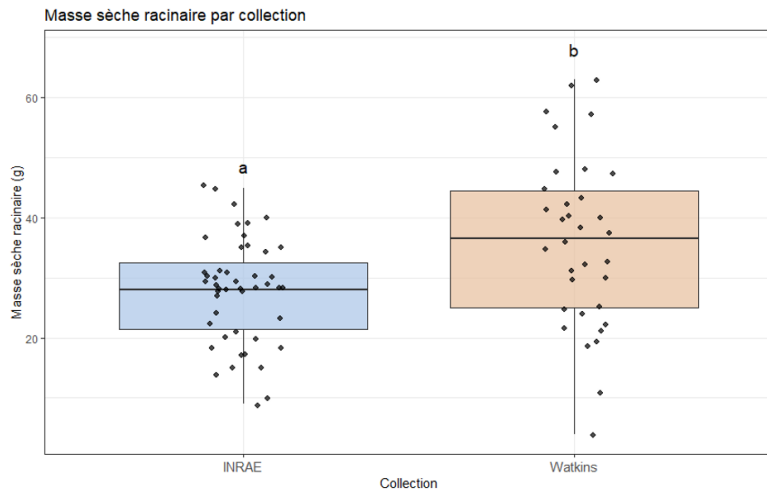


Figure 17 : Distribution de la masse sèche racinaire par collection.

Comme le montre la figure 17, à l'échelle des collections, la masse sèche racinaire apparaît plus faible chez les variétés INRAE que chez les accessions Watkins. Les Watkins présentent à la fois une médiane plus élevée et une dispersion plus importante, tandis que les INRAE semblent investir moins fortement dans leur système racinaire. Cette différence suggère un contraste d'allocation de biomasse entre les deux collections, avec un investissement racinaire globalement plus marqué chez les Watkins.

5.2.3. Rapport de masse racinaire sur la masse de la partie aérienne

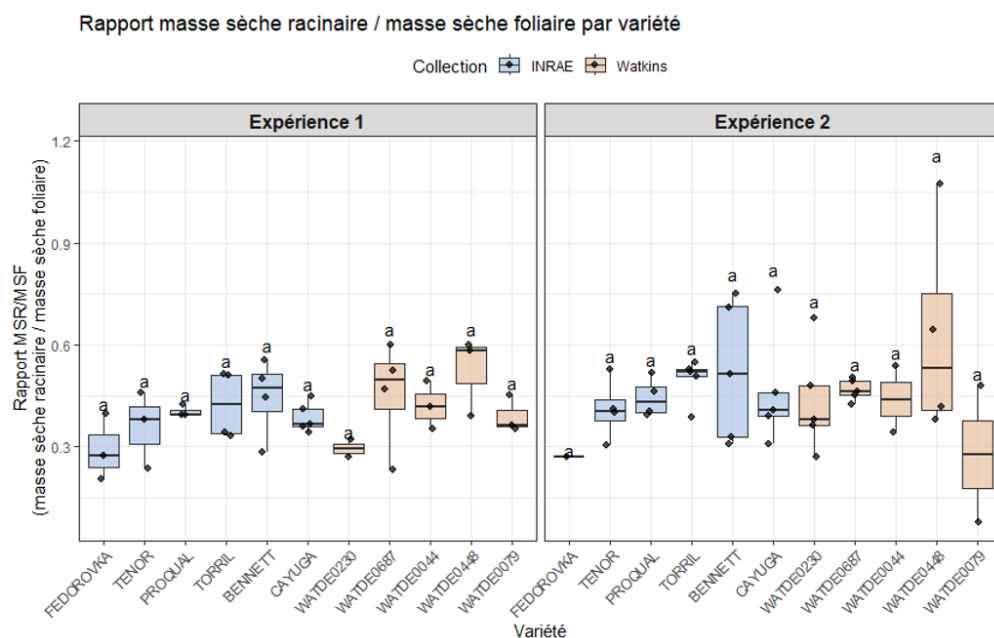


Figure 18 : Distribution du rapport entre masse sèche racinaire et masse sèche foliaire par variété dans les deux expériences.

Le rapport entre masse sèche racinaire et masse sèche foliaire, illustré à la figure 18, permet d'évaluer l'allocation relative de biomasse vers le système racinaire. Dans l'ensemble, les différences entre variétés restent peu marquées statistiquement, toutes les variétés appartenant au même groupe dans les deux expériences. Certaines tendances apparaissent toutefois : plusieurs génotypes, comme WATDE0448 ou WATDE0687, présentent des rapports relativement élevés, suggérant un investissement racinaire proportionnellement plus important. À l'inverse, des variétés comme FEDOROVKA ou WATDE0230 montrent des rapports plus faibles dans certaines conditions, indiquant une allocation relativement plus importante vers les parties aériennes. Ce graphique montre donc que les différences d'investissement racinaire existent, mais qu'elles restent variables et fortement dispersées entre individus.

5.3. Système racinaire

5.3.1. Diamètre moyen racinaire

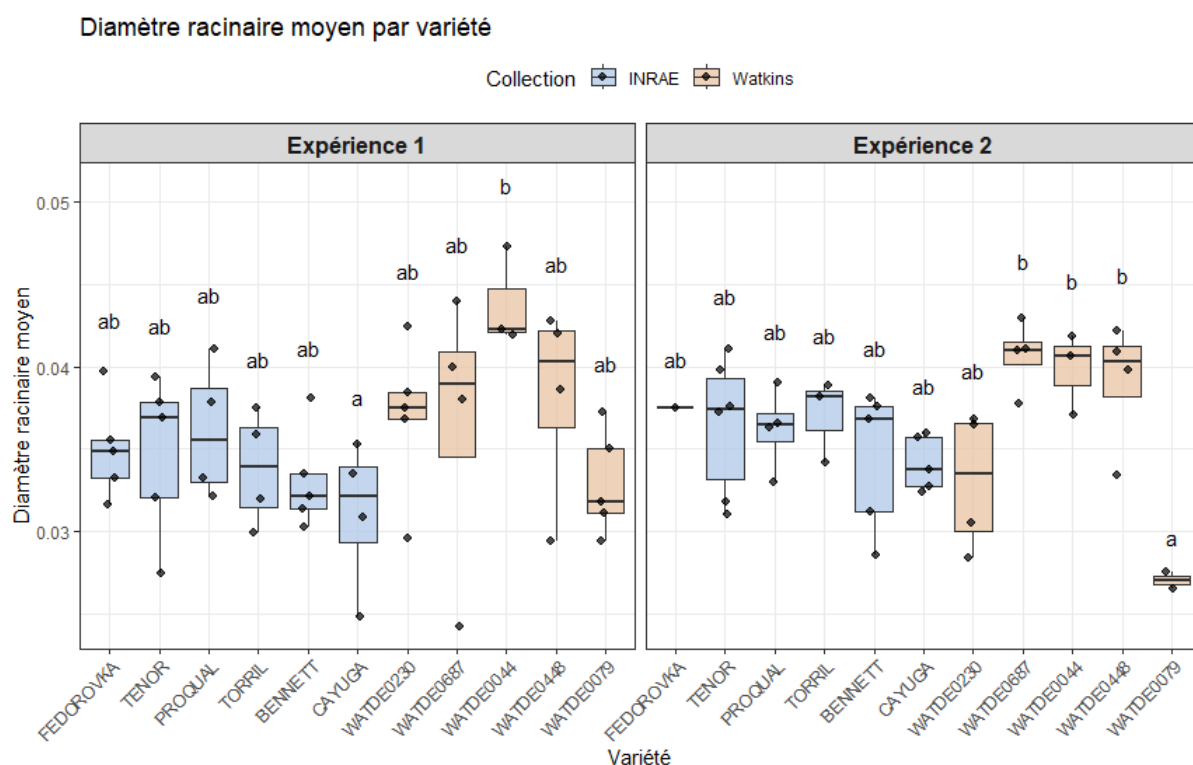


Figure 19 : Distribution du diamètre moyen des racines A et B par variété dans les deux expériences

La figure 19 présente les différences de diamètre racinaire moyen des racines A et B entre les génotypes, avec des différences plus visibles chez les accessions Watkins. Dans l'expérience 1, CAYUGA présente les diamètres les plus faibles, tandis que WATDE0044 se distingue par des valeurs plus élevées. Les autres variétés occupent des positions intermédiaires, avec un recouvrement important entre les distributions.

Dans l'expérience 2, les différences sont plus marquées pour certaines accessions Watkins. WATDE0687, WATDE0044 et WATDE0448 présentent des diamètres moyens relativement élevés, alors que WATDE0079 se distingue nettement par les valeurs les plus faibles. Ce graphique

suggère donc une variabilité inter-variétale du diamètre racinaire moyen, particulièrement au sein de la collection Watkins.

5.3.2. Vitesse de croissance aérienne

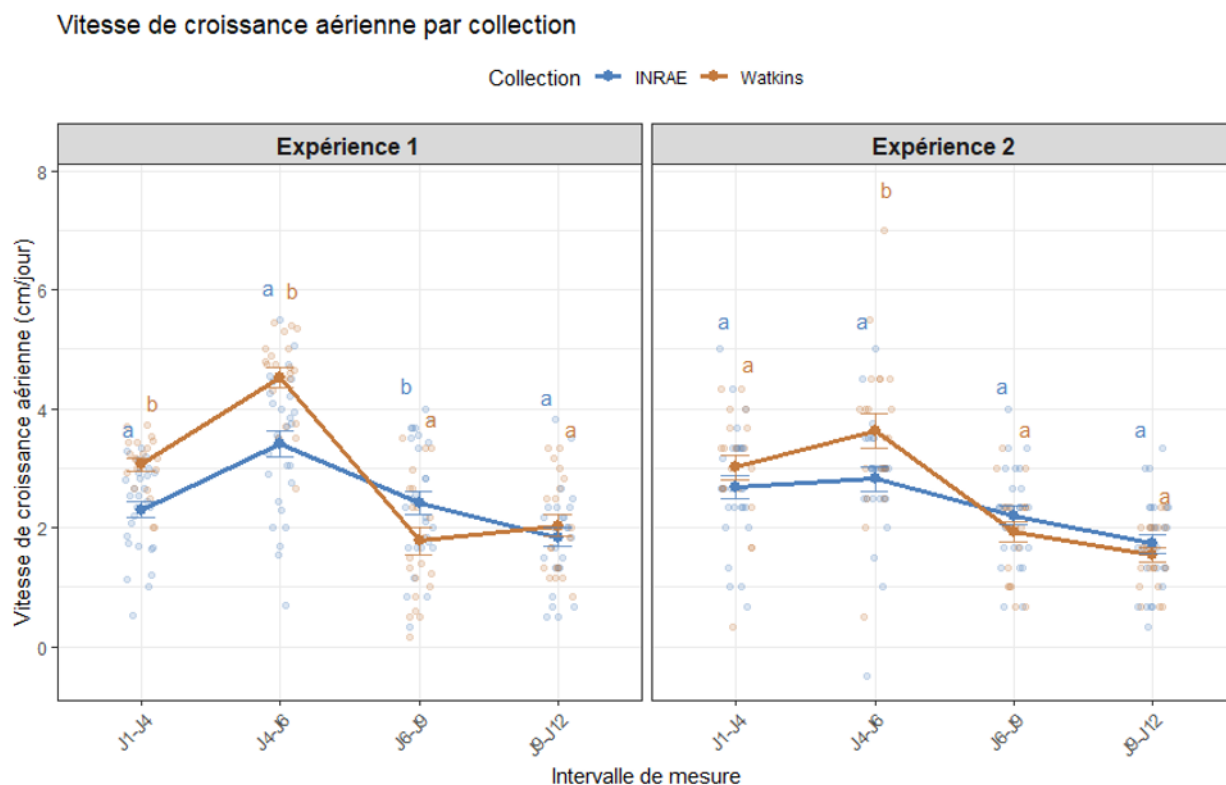


Figure 20 : Vitesse de croissance aérienne par collection au cours des intervalles de mesure, dans les deux expériences.

La vitesse de croissance aérienne varie au cours du temps et selon la collection considérée (figure 20). Dans les deux expériences, les accessions Watkins présentent globalement des vitesses plus élevées que les variétés INRAE au début du suivi, en particulier sur les intervalles J1-J4 et J4-J6. Cette différence est surtout visible lors de la phase précoce de développement, tandis que les vitesses deviennent plus proches entre les deux collections sur les intervalles suivants.

Un pic de croissance est observé entre J4 et J6, particulièrement chez les Watkins. Cette augmentation pourrait correspondre à une phase durant laquelle les jeunes plantules utilisent encore fortement les réserves contenues dans la graine. Ces ressources permettent de soutenir rapidement la croissance initiale des parties aériennes, avant que la plante ne devienne progressivement plus dépendante de sa propre activité photosynthétique et de l'acquisition des ressources par le système racinaire.

Après J6, la vitesse de croissance aérienne diminue dans les deux expériences. Ce ralentissement suggère une transition vers un fonctionnement plus autonome de la plante, où la croissance dépend davantage de l'efficacité photosynthétique, du développement racinaire et des ressources disponibles dans le milieu. Ainsi, les différences entre collections semblent surtout marquées durant les premiers jours de croissance, puis s'atténuent au cours du développement.

5.3.3. Vitesse de croissance racinaire

Vitesse de croissance racinaire par collection

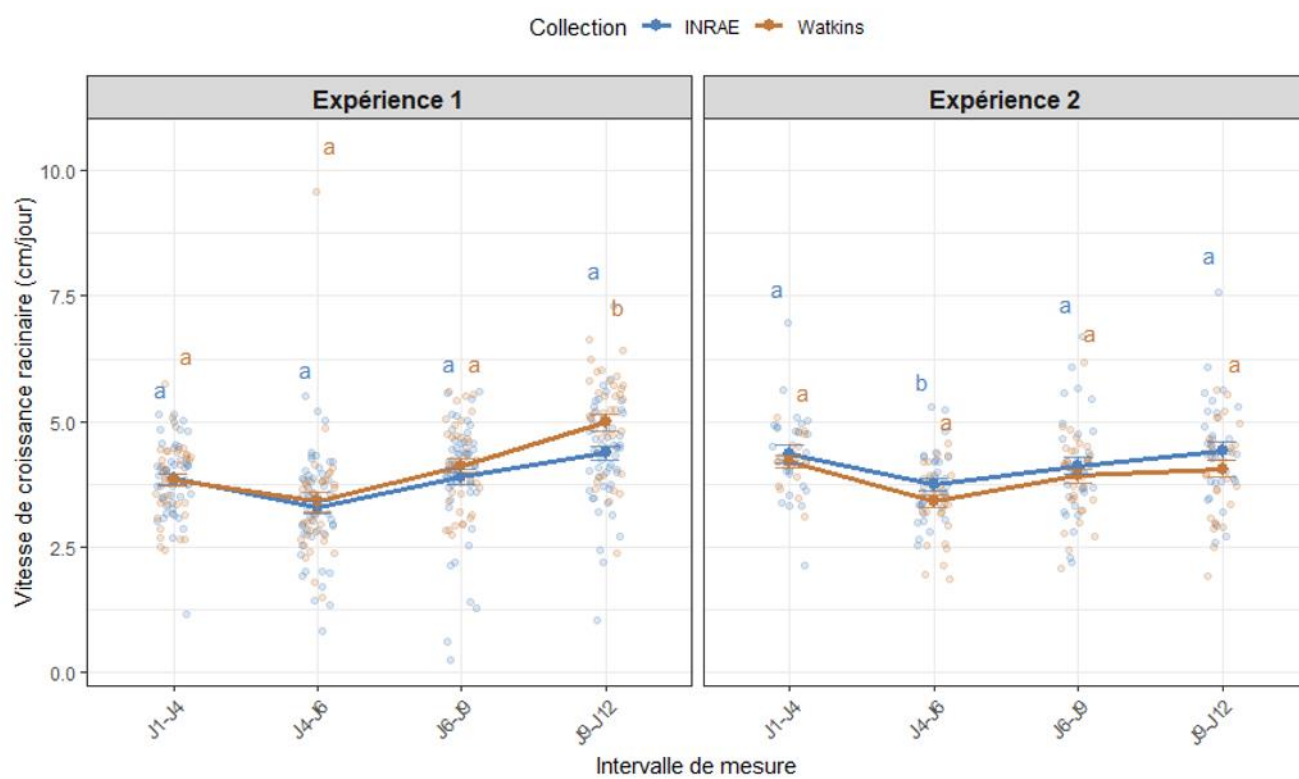


Figure 21 : Vitesse de croissance racinaire par collection au cours des intervalles de mesure, dans les deux expériences.

La vitesse de croissance racinaire varie relativement peu entre les collections au cours du temps (figure 21). On pouvait s'attendre à observer une croissance racinaire plus rapide chez les accessions Watkins, dans la mesure où elles présentent globalement un système racinaire plus développé, notamment en termes de masse racinaire. Cependant, cette tendance n'apparaît pas clairement dans les deux expériences : les courbes INRAE et Watkins restent proches, avec des différences limitées selon les intervalles de mesure.

Ce résultat reste cohérent avec les observations précédentes sur la longueur racinaire. En effet, les différences de longueur entre collections ou entre génotypes n'étaient pas très marquées, ce qui suggère que l'investissement racinaire plus important observé chez certaines Watkins ne se traduit pas nécessairement par une vitesse d'élargissement plus élevée. L'augmentation de biomasse racinaire pourrait donc être liée à d'autres traits, comme le diamètre, le nombre de racines ou la densité tissulaire, plutôt qu'à une croissance en longueur plus rapide.

Ainsi, malgré l'hypothèse d'un système racinaire Watkins plus important et potentiellement plus dynamique, les résultats ne montrent pas de différence nette de vitesse de croissance racinaire entre les deux collections. La dynamique d'élargissement racinaire semble donc relativement comparable entre INRAE et Watkins dans ces conditions expérimentales.

5.3.4. Vitesse de croissance des racines latérales

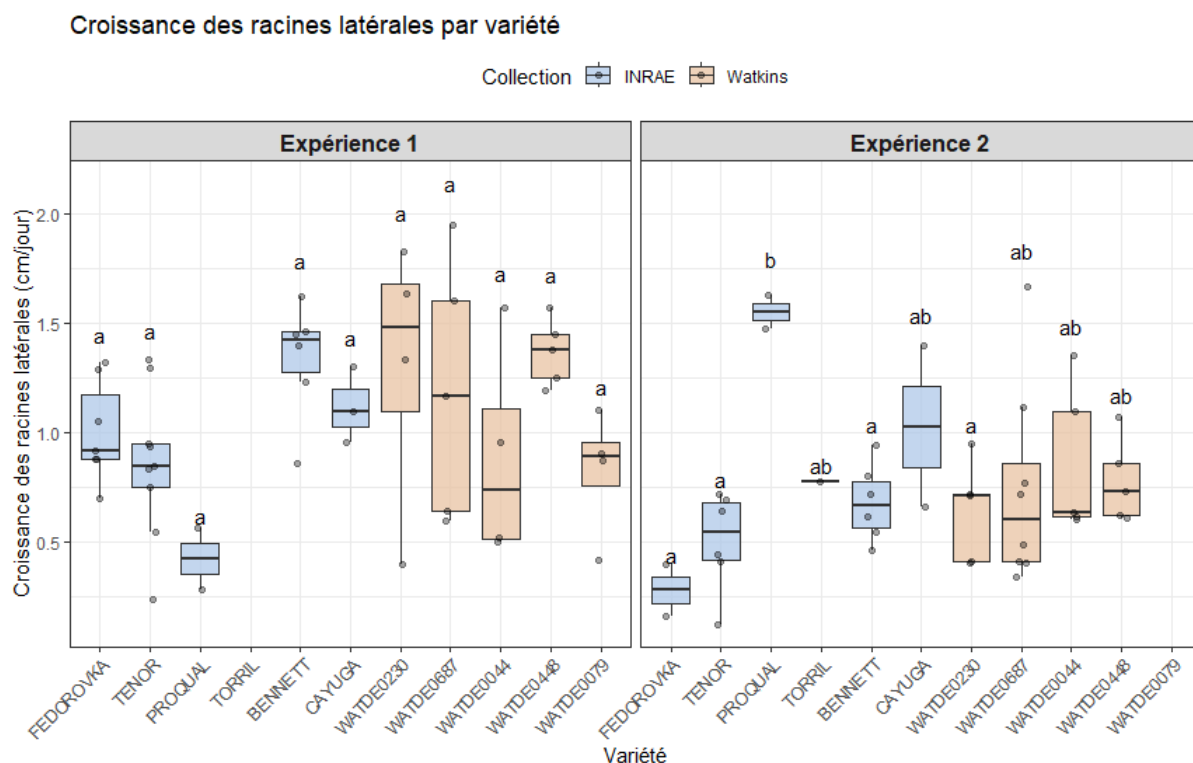


Figure 22 : Distribution de la croissance des racines latérales par variété dans les deux expériences

La croissance des racines latérales a été estimée sur le premier intervalle suivant leur apparition (figure 22). Ce choix permet de caractériser leur phase initiale d'élongation, avant que leur développement ne soit ralenti ou perturbé par les contraintes physiques du rhizotron, notamment la croissance horizontale et la rencontre rapide d'obstacles ou des limites du dispositif.

La croissance des racines latérales varie entre les génotypes, avec des tendances qui ne sont pas totalement identiques entre les deux expériences. Dans l'expérience 1, les différences statistiques restent limitées, mais certaines variétés comme BENNETT, WATDE0230 ou WATDE0448 présentent des valeurs relativement élevées, tandis que PROQUAL montre une croissance latérale plus faible.

Dans l'expérience 2, les différences entre génotypes apparaissent plus marquées. PROQUAL se distingue par une croissance latérale élevée, alors que FEDOROVKA et BENNETT présentent des valeurs plus faibles. Les accessions Watkins occupent globalement une position intermédiaire, avec une variabilité parfois importante entre individus.

TORRIL présente un profil particulier, car peu ou pas de racines latérales ont été observées pour cette variété. Cette absence limite son interprétation sur ce trait et renforce l'idée que TORRIL possède une architecture racinaire atypique par rapport aux autres génotypes étudiés. Ce résultat est cohérent avec son profil général déjà observé, caractérisé par une plante plus courte mais pas nécessairement moins développée au niveau aérien.

5.3.5. Profil de diamètre racinaire

Évolution du diamètre le long de la racine

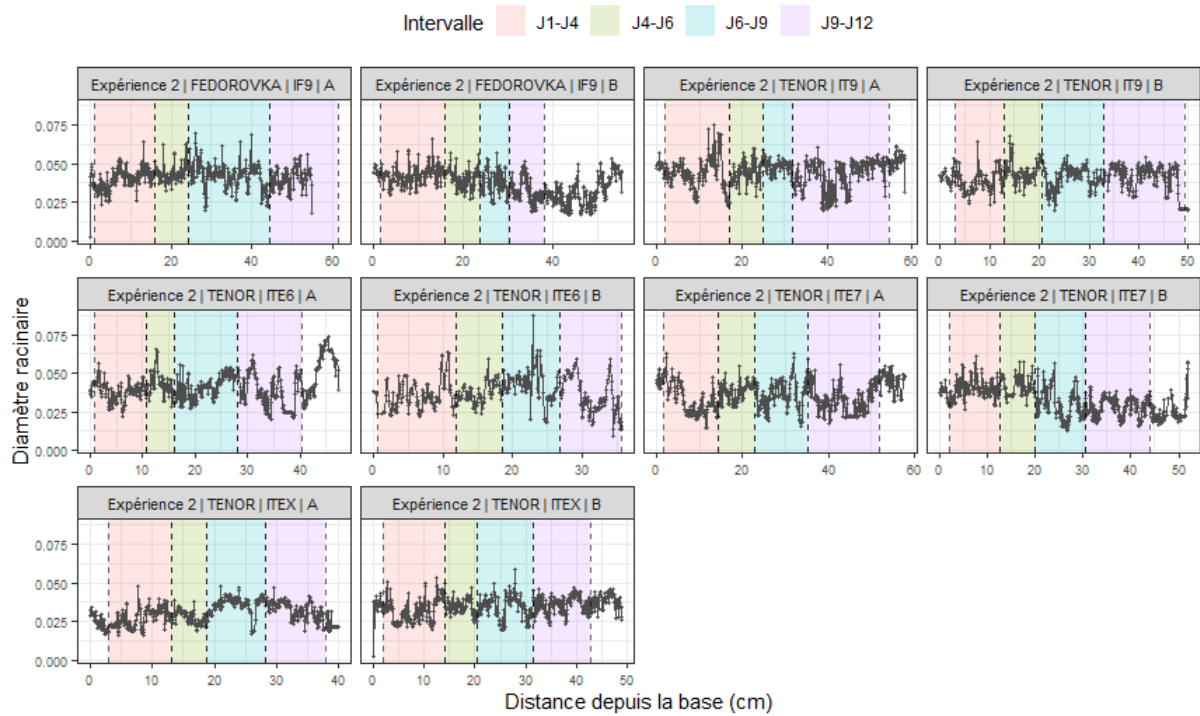


Figure 23 : Évolution du diamètre racinaire le long des axes A et B en fonction de la distance depuis la base, pour plusieurs individus de l'expérience

L'évolution du diamètre le long de la racine apparaît très variable entre individus (figure 23), mais également au sein d'une même racine. Les profils ne montrent pas toujours une tendance simple ou régulière depuis la base vers l'apex, avec des fluctuations locales parfois importantes. Cette variabilité sera discutée plus en détail dans la discussion, notamment afin de déterminer dans quelle mesure elle reflète de réelles différences biologiques ou des limites liées à la mesure du diamètre.

Afin d'interpréter correctement ce trait, il apparaît donc nécessaire de dépasser l'analyse point par point du diamètre brut. L'utilisation de moyennes mobiles permet de lisser les variations locales et de mieux faire ressortir les tendances générales le long de la racine. Cette approche facilite ainsi la comparaison entre génotypes, entre intervalles de croissance et entre expériences.

5.3.6. Profil de diamètre racinaire par expérience

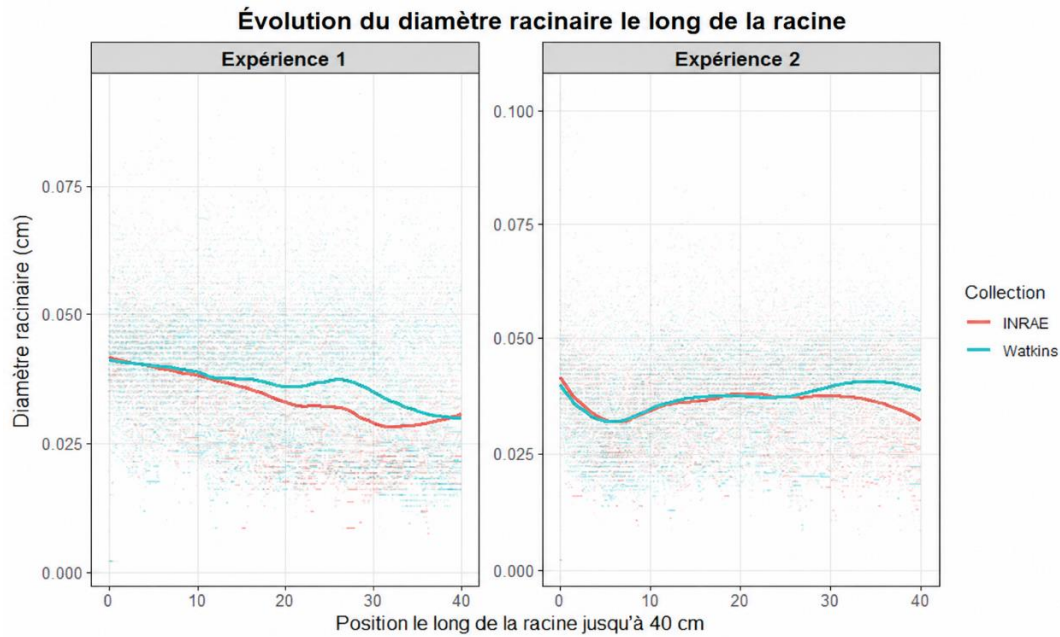


Figure 24 : Évolution du diamètre racinaire le long des racines A et B jusqu'à 40 cm, dans les deux expériences.

Cette figure 24 confirme l'intérêt d'utiliser une moyenne mobile pour analyser l'évolution du diamètre le long de la racine, car les points bruts présentent une forte variabilité locale. Dans l'expérience 1, le profil observé correspond à une tendance relativement attendue : le diamètre diminue progressivement avec la distance depuis la base. Cette évolution peut être interprétée comme une réduction progressive du diamètre des tissus formés au cours de l'élongation racinaire, avec des portions plus récentes généralement plus fines.

En revanche, ce profil est moins clairement retrouvé dans l'expérience 2. Le diamètre ne diminue pas de manière régulière le long de la racine et présente même une tendance plus stable, voire légèrement croissante sur une partie du profil, en particulier chez les Watkins. Cette différence entre expériences suggère que l'évolution du diamètre le long de la racine n'est pas parfaitement constante et peut dépendre des conditions expérimentales, du stade de développement ou de la variabilité propre aux génotypes. Ces résultats seront donc discutés plus en détail dans la discussion, notamment pour déterminer si ces profils reflètent une dynamique biologique réelle ou des effets liés à la mesure et au traitement des données.

5.3.7. Relation entre le diamètre et la croissance racinaire

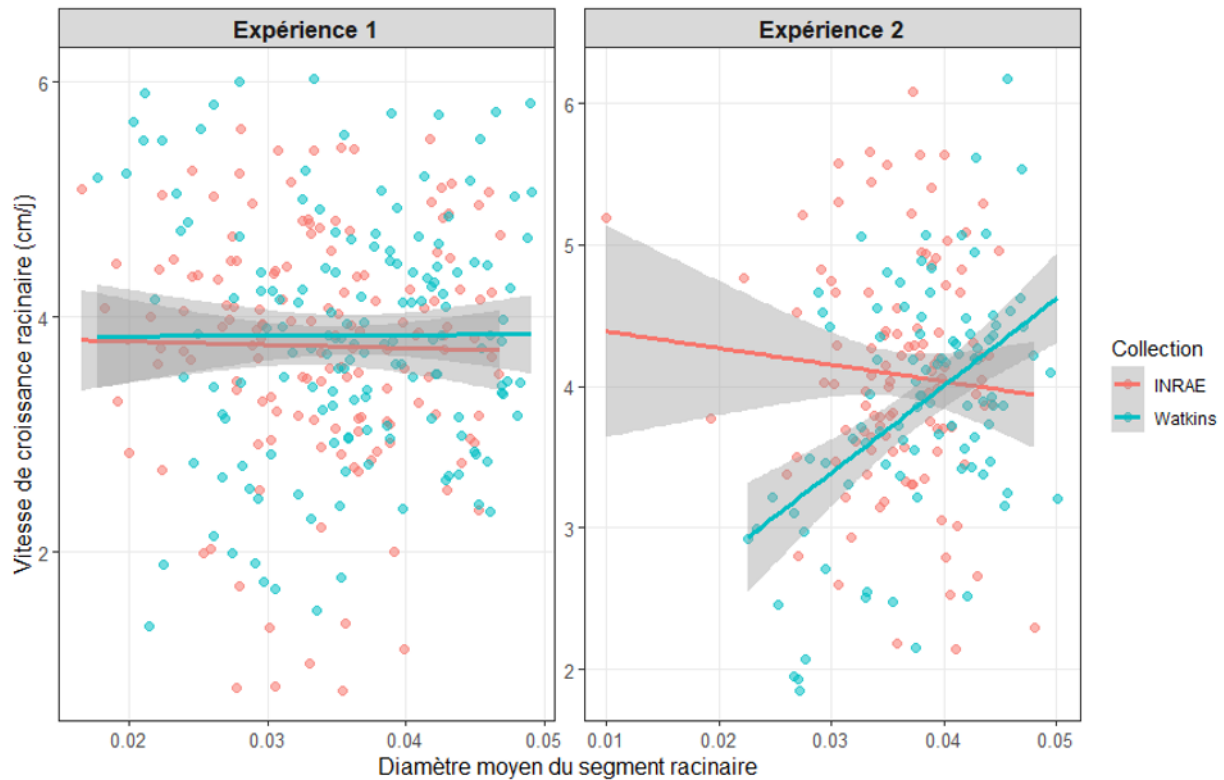


Figure 25 : Relation entre le diamètre moyen des segments racinaires et leur vitesse de croissance dans les deux expériences.

Cette figure 25 examine la relation entre le diamètre moyen d'un segment racinaire et sa vitesse de croissance. Dans l'expérience 1, aucune relation claire ne semble se dégager : les droites de tendance sont presque horizontales pour les deux collections, ce qui suggère que le diamètre moyen des segments n'explique pas fortement la vitesse de croissance racinaire dans cette expérience. Les points sont très dispersés, ce qui indique une forte variabilité individuelle.

Dans l'expérience 2, le profil est différent. Chez les Watkins, une tendance positive apparaît : les segments de plus grand diamètre semblent associés à des vitesses de croissance plus élevées. À l'inverse, chez les INRAE, la relation semble faible, voire légèrement négative. Cette différence entre collections pourrait suggérer que le lien entre diamètre et croissance dépend du matériel génétique étudié, mais elle doit être interprétée avec prudence étant donné la dispersion importante des points et l'intervalle de confiance assez large.

Ainsi, contrairement à ce qui pourrait être attendu si le diamètre était un bon prédicteur général de la vitesse d'élongation, la relation observée n'est pas stable entre les deux expériences. Le diamètre moyen du segment semble donc fournir une information intéressante, mais insuffisante à lui seul pour expliquer la croissance racinaire.

5.4. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales a été réalisée afin de synthétiser les relations entre les principaux traits mesurés et d'identifier d'éventuelles structurations des individus selon leur collection, leur expérience ou leur variété. Les deux premières dimensions expliquent ensemble 56,3 % de la variabilité totale, avec 36,4 % pour Dim1 et 19,9 % pour Dim2.

La projection des individus montre un recouvrement important entre les collections INRAE et Watkins, indiquant que les deux groupes ne se séparent pas nettement dans l'espace multivarié (Figure 26). Les ellipses associées aux collections se chevauchent fortement, ce qui suggère que la variabilité intra-collection est importante. La collection Watkins présente toutefois une dispersion plus marquée sur Dim1, traduisant des profils phénotypiques plus contrastés au sein de cette collection.

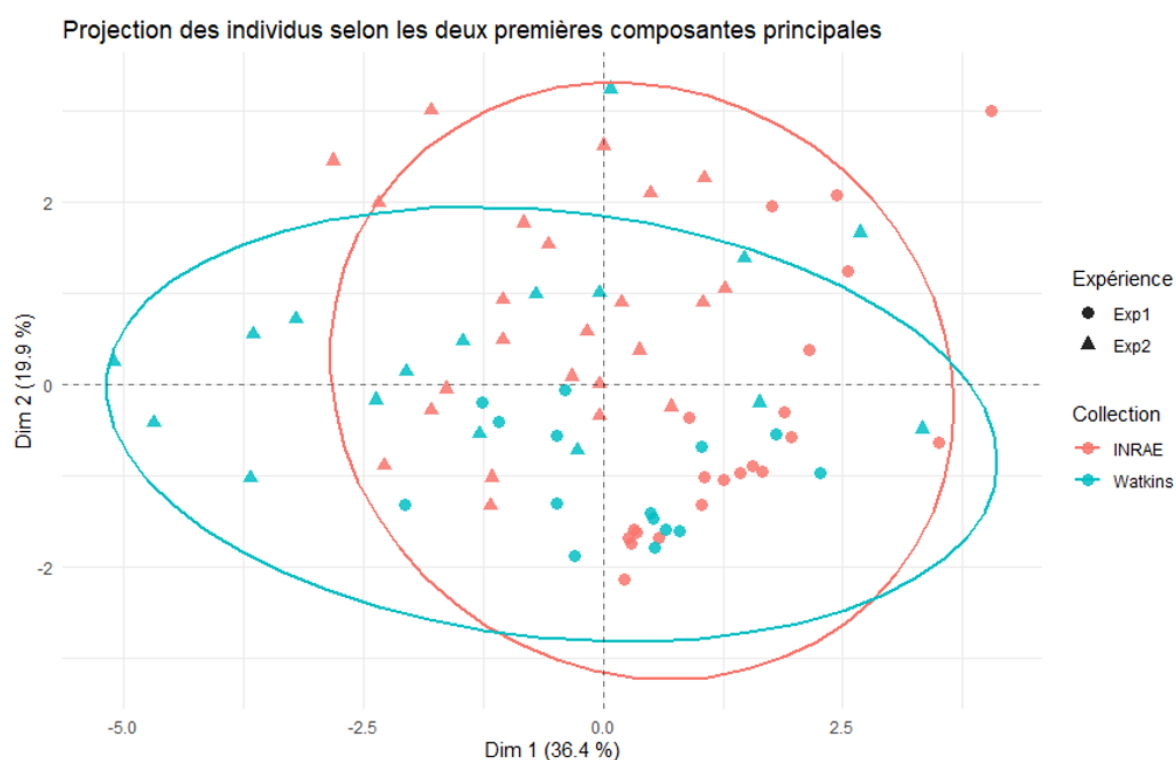


Figure 26 : Projection des individus selon les deux premières composantes principales de l'ACP.

Le cercle des corrélations permet d'interpréter la signification des deux premières dimensions (Figure 27). Dim1 oppose principalement, du côté négatif, plusieurs traits liés au développement racinaire et à la biomasse, notamment la masse sèche racinaire, la masse sèche foliaire, la longueur racinaire A/B et le nombre de racines, à la croissance aérienne située du côté positif. Cette dimension peut donc être interprétée comme un axe opposant un profil d'investissement structurel, notamment racinaire, à un profil davantage associé à la vitesse de croissance aérienne. Dim2 distingue plutôt le ratio MSR/MSF et le nombre de feuilles, situés du côté positif, de la hauteur finale et de la croissance aérienne, situées du côté négatif. Cette seconde dimension semble donc davantage liée à des différences d'allocation relative et de morphologie aérienne.

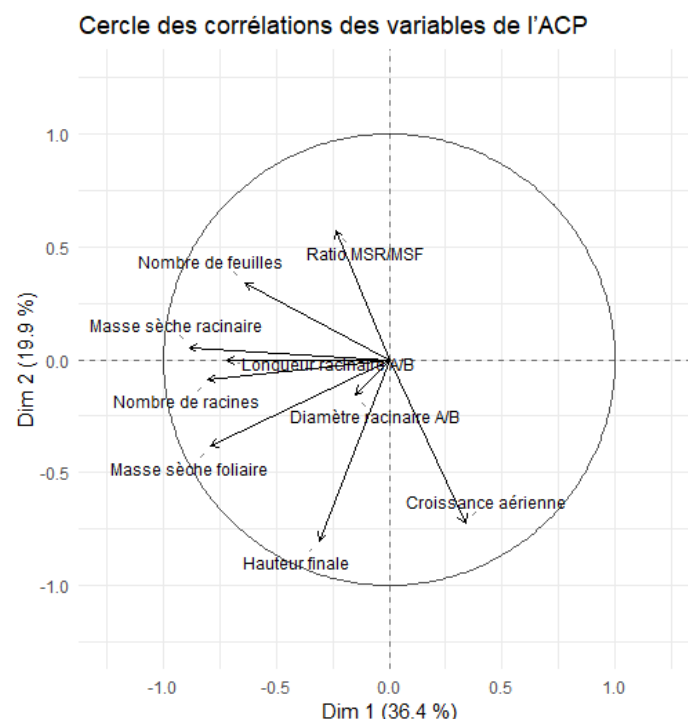


Figure 27 : Cercle des corrélations des variables utilisées dans l'ACP.

La projection des individus par variété montre également un fort chevauchement entre génotypes, ce qui indique que les variétés ne forment pas des groupes strictement séparés dans l'espace de l'ACP (Figure 28). Certaines tendances restent néanmoins visibles. TORRIL occupe une position plus distincte sur Dim2, confirmant son profil particulier déjà observé dans les analyses univariées. Plusieurs accessions Watkins présentent aussi des ellipses plus étendues, ce qui confirme l'existence d'une variabilité interne importante au sein de cette collection.

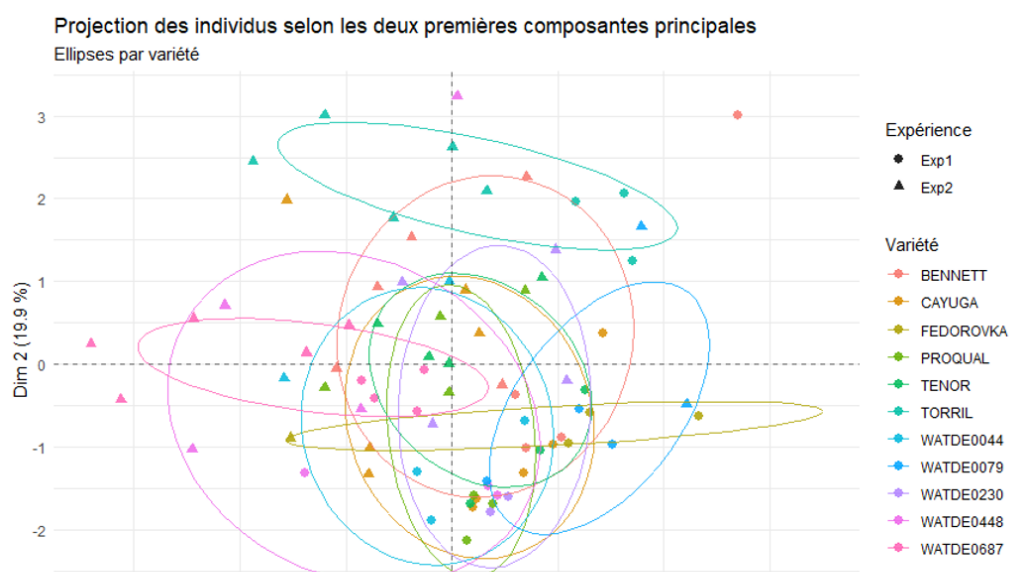


Figure 28 : Projection des individus selon les deux premières composantes principales de l'ACP, avec ellipses par variété.

5.5. Conductance du système racinaire

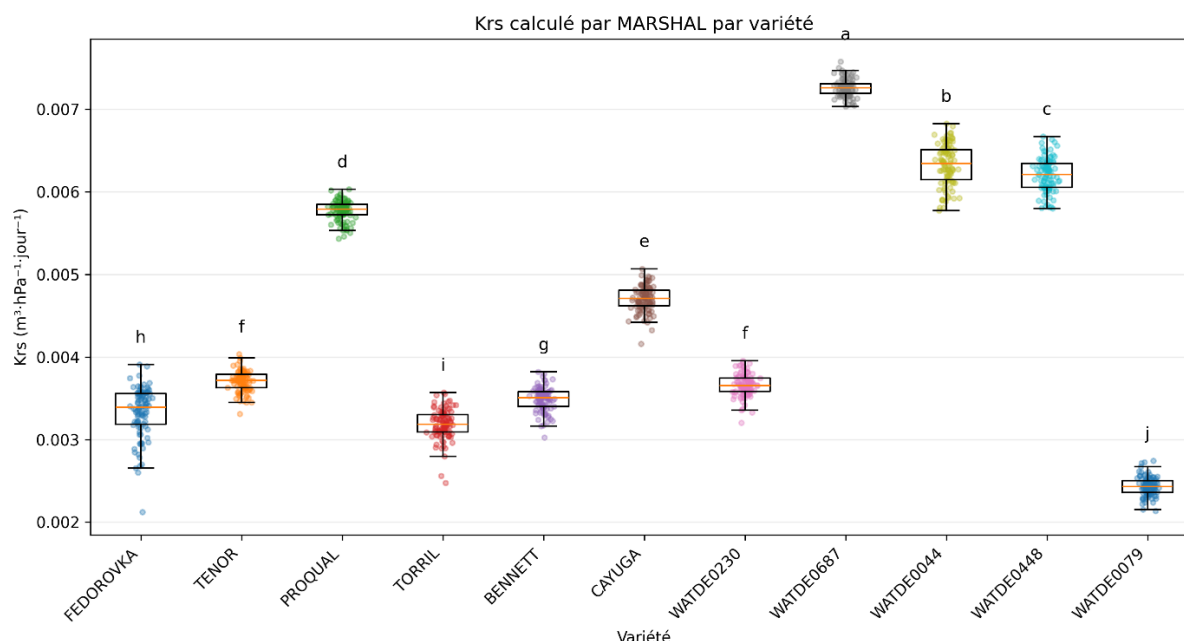


Figure 29 : Conductance hydraulique racinaire simulée (Krs) par variété.

L'estimation du Krs par MARSHAL (figure 29) permet de replacer les différences morphologiques observées dans une perspective plus fonctionnelle. Alors que certains traits racinaires pris individuellement présentent des différences parfois limitées ou difficiles à interpréter, leur intégration dans une architecture simulée conduit à des valeurs de Krs nettement différenciées entre variétés. Cette approche met donc en évidence que de faibles variations de longueur racinaire, de diamètre moyen ou de structure du système racinaire peuvent, une fois combinées, produire des différences plus marquées de conductance hydraulique simulée.

Les résultats montrent notamment des valeurs élevées pour WATDE0687, WATDE0044 et WATDE0448, tandis que WATDE0079 présente les valeurs les plus faibles. Globalement, les variétés issues de la collection Watkins présentent des valeurs de Krs souvent plus élevées que celles de la collection INRAE, bien que cette tendance ne soit pas uniforme pour l'ensemble des génotypes. Cette observation suggère que certaines accessions Watkins possèdent une architecture racinaire simulée plus favorable au transport de l'eau, en raison d'une combinaison de traits tels qu'une longueur racinaire plus importante, un diamètre moyen plus élevé ou une organisation segmentaire plus conductrice. À l'inverse, les variétés présentant des systèmes racinaires plus limités ou des diamètres plus faibles obtiennent des valeurs de Krs plus basses.

Ces résultats doivent toutefois être interprétés comme des estimations comparatives issues de la modélisation. Les conductivités radiales et axiales ayant été maintenues constantes entre variétés, les différences observées reflètent principalement l'effet de l'architecture racinaire simulée et des traits morphologiques intégrés dans le modèle. Le Krs calculé ici ne constitue donc pas une mesure physiologique absolue, mais il permet de mieux visualiser l'impact fonctionnel potentiel de différences racinaires parfois peu évidentes lorsqu'elles sont analysées trait par trait.

6. Discussion

6.1. Allocation de ressources et variabilité entre les collections Watkins et INRAE

Une première différence observée entre les deux collections concerne la manière dont les plantes semblent répartir leurs ressources entre les compartiments aérien et racinaire. Dans cette étude, les accessions Watkins et les variétés INRAE ne se distinguent pas uniquement par des différences de croissance brute, mais plutôt par des tendances contrastées d'allocation de biomasse. Les Watkins présentent globalement une masse racinaire plus élevée et une dispersion plus importante que les INRAE, ce qui suggère un investissement plus marqué, mais aussi plus variable, dans le système racinaire. À l'inverse, les variétés INRAE semblent former un ensemble plus homogène, avec un investissement racinaire plus limité. Cette différence est cohérente avec l'origine du matériel végétal étudié : les accessions Watkins correspondent à un matériel ancien et géographiquement diversifié, issu de contextes locaux variés, tandis que les variétés INRAE appartiennent davantage à un matériel sélectionné dans des cadres agronomiques plus homogènes. Il est donc attendu que les Watkins expriment une variabilité phénotypique plus large, y compris dans des traits liés à l'allocation des ressources.

Cette différence d'allocation doit cependant être interprétée avec prudence. Un investissement racinaire plus important ne signifie pas nécessairement une croissance racinaire plus rapide, ni une exploration du milieu plus efficace. Dans les résultats obtenus, les différences de longueur racinaire entre les deux collections restent relativement limitées, et la vitesse de croissance racinaire ne se distingue pas nettement entre Watkins et INRAE. On aurait pu s'attendre à ce que des plantes présentant une biomasse racinaire plus élevée montrent également une vitesse d'élongation supérieure, mais cette relation n'apparaît pas clairement. Cela suggère que la masse racinaire plus importante observée chez les Watkins ne résulte pas forcément d'une production plus rapide de longueur racinaire. Elle pourrait plutôt être liée à d'autres composantes du système racinaire, comme le diamètre des racines, le nombre de racines émises, la densité tissulaire ou encore la proportion relative de racines latérales.

Cette observation est importante, car elle montre que le développement racinaire ne peut pas être résumé à une seule variable. Deux plantes peuvent présenter une longueur racinaire comparable tout en différant fortement par leur masse racinaire, si l'une produit des racines plus épaisses ou plus denses. À l'inverse, une plante peut produire un système racinaire long mais peu coûteux, constitué de racines plus fines. Les résultats obtenus invitent donc à distinguer la croissance en longueur, qui traduit principalement la dynamique d'élongation, de l'investissement en biomasse, qui reflète davantage le coût de construction du système racinaire. Dans cette perspective, les Watkins semblent tendre vers une stratégie racinaire plus coûteuse ou plus investie, tandis que les INRAE présenteraient une stratégie plus modérée et plus homogène.

Cette différence peut être discutée à la lumière des compromis d'allocation entre organes. Chez une jeune plante, les ressources disponibles sont limitées et doivent être distribuées entre la croissance aérienne, nécessaire à l'interception lumineuse et à la photosynthèse, et la croissance racinaire, nécessaire à l'acquisition de l'eau et des nutriments. Un investissement plus important dans les racines peut donc représenter un avantage dans des milieux où les ressources du sol sont hétérogènes ou limitantes, mais il peut aussi avoir un coût si cet investissement réduit la croissance

aérienne précoce. Dans le cadre de cette expérimentation, menée en conditions contrôlées et sans stress hydrique volontaire, il n'est pas possible de conclure directement sur l'avantage fonctionnel de cette allocation. Néanmoins, le contraste entre Watkins et INRAE indique que les collections ne répondent pas exactement de la même manière au même environnement expérimental.

Le fait que les Watkins présentent une plus forte dispersion est également un résultat intéressant en soi. Cette variabilité peut être interprétée comme l'expression d'une diversité génétique plus large, héritée de leur origine de landraces et de leur sélection dans des environnements locaux contrastés. Contrairement aux variétés modernes, souvent sélectionnées pour des objectifs agronomiques plus définis, les accessions anciennes peuvent conserver des combinaisons de traits moins uniformisées. Dans cette étude, cela se traduit par une plus grande variabilité dans l'investissement racinaire, mais pas nécessairement par une séparation nette et systématique entre les deux collections pour tous les traits mesurés. Autrement dit, les Watkins ne peuvent pas être décrites simplement comme “plus vigoureuses” ou “plus rapides” que les INRAE. Elles semblent plutôt présenter une gamme plus large de stratégies de développement, dont certaines impliquent un investissement racinaire plus important.

Cette nuance est essentielle pour éviter une interprétation trop simpliste des résultats. Les données ne montrent pas une opposition stricte entre une collection Watkins à système racinaire systématiquement supérieur et une collection INRAE à système racinaire systématiquement réduit. Elles suggèrent plutôt que les différences entre collections portent davantage sur l'allocation et la variabilité que sur une supériorité générale d'un groupe. Les INRAE semblent former un groupe plus homogène, probablement en lien avec leur statut de matériel cultivé et sélectionné, tandis que les Watkins expriment une diversité plus importante de réponses morphologiques. Cette diversité constitue précisément l'intérêt de ce type de matériel : elle peut révéler des combinaisons de traits moins représentées dans les variétés modernes et potentiellement utiles pour comprendre ou améliorer l'architecture racinaire du blé.

Ainsi, cette première analyse met en évidence que les différences entre Watkins et INRAE ne doivent pas être lues uniquement comme des différences de taille ou de performance, mais comme des différences potentielles de stratégie d'allocation des ressources. Les Watkins semblent investir davantage, ou de manière plus variable, dans le système racinaire, sans que cela se traduise nécessairement par une croissance en longueur plus rapide. Cette dissociation entre biomasse racinaire, longueur et vitesse d'élongation souligne l'importance d'une approche multi-traits pour interpréter le fonctionnement racinaire. Elle justifie également la suite de l'analyse, qui devra examiner plus précisément quels traits morphologiques ou dynamiques expliquent cet investissement racinaire : diamètre, nombre de racines, ramification, longueur totale ou vitesse de croissance.

6.2. Différences au sein des collections Watkins et INRAE

Au-delà des tendances générales observées entre les collections Watkins et INRAE, les résultats montrent une variabilité importante à l'intérieur même de chaque groupe. Cette observation est essentielle, car elle empêche de réduire l'analyse à une opposition simple entre matériel ancien et matériel moderne. Les collections donnent un cadre général d'interprétation, mais les comportements les plus marqués apparaissent souvent au niveau des génotypes eux-mêmes.

Au sein du groupe INRAE, TORRIL constitue le cas le plus distinct. Cette variété présente une stature plus faible que les autres génotypes dans les deux expériences, ce qui suggère un développement globalement plus limité ou plus lent. Cette différence semble également s'accompagner d'une architecture racinaire particulière, marquée par une faible production de racines latérales. TORRIL ne doit donc pas seulement être considérée comme une variété moins vigoureuse, mais plutôt comme un profil morphologique atypique, caractérisé par une architecture plus compacte et moins ramifiée. Ce type de comportement est intéressant, car il montre que même au sein d'un matériel plus sélectionné, une diversité racinaire précoce reste observable.

Les autres variétés INRAE présentent des profils moins extrêmes, mais elles ne forment pas pour autant un groupe totalement homogène. Certaines, comme FEDOROVKA, apparaissent associées à des longueurs racinaires plus faibles dans certaines observations, tandis que d'autres, comme CAYUGA, peuvent atteindre des valeurs plus élevées. Cela indique que la collection INRAE conserve une variabilité morphologique mesurable, même si celle-ci semble généralement moins dispersée que chez les Watkins.

La collection Watkins présente, elle aussi, une forte hétérogénéité interne. Cette variabilité était attendue, étant donné l'origine plus ancienne et géographiquement diversifiée de ces accessions. Toutefois, les Watkins ne se distinguent pas toutes dans le même sens. Certaines accessions, comme WATDE0230 ou WATDE0448, semblent présenter des valeurs élevées pour certains traits de croissance ou de développement, tandis que d'autres, comme WATDE0079 dans l'expérience 2, montrent des longueurs racinaires plus faibles. La collection Watkins ne doit donc pas être décrite comme un groupe uniformément plus vigoureux, mais plutôt comme un ensemble de profils contrastés.

Cette variabilité interne est importante pour l'interprétation des résultats. Elle montre que les différences entre collections ne résument qu'une partie de la diversité observée. Les Watkins semblent globalement plus variables, ce qui correspond à leur intérêt comme réservoir de diversité génétique, mais cette diversité ne se traduit pas automatiquement par une supériorité pour chaque trait. De la même manière, les INRAE apparaissent plus homogènes, sans être dépourvues de contrastes internes.

Ainsi, l'analyse intra-collection met en évidence que la diversité racinaire observée dans cette étude se structure à plusieurs niveaux. L'opposition Watkins-INRAE permet de discuter les grandes tendances d'allocation et de variabilité, mais l'étude des génotypes révèle des profils plus fins, parfois atypiques, comme TORRIL.

6.3. Le rhizotron, comme outil et limite

L'utilisation des rhizotrons constitue un compromis méthodologique important dans cette étude. Leur principal avantage est de rendre accessible un compartiment normalement difficile à observer : le système racinaire. En conditions de champ, les racines se développent dans un sol opaque, hétérogène et structuré en trois dimensions. Leur observation directe est donc limitée, et les méthodes de prélèvement sont généralement destructives, longues et souvent incomplètes, en particulier pour les racines fines et profondes. Le rhizotron permet au contraire de suivre la croissance racinaire au cours du temps, de mesurer l'élongation des racines, d'observer leur trajectoire et de relier ces mesures dynamiques à des traits morphologiques mesurés après numérisation. Il apporte donc une information difficilement accessible au champ, notamment sur la dynamique précoce du développement racinaire.

Cependant, ce dispositif ne reproduit pas exactement les conditions naturelles de croissance. Le rhizotron impose une contrainte spatiale importante, car les racines se développent contre une surface plane, entre le substrat, la membrane en nylon et la vitre. Le système racinaire est donc observé dans une situation fortement simplifiée, proche d'une croissance en deux dimensions. Cette contrainte peut influencer la trajectoire des racines, leur angle de croissance et leur distribution spatiale. En champ, les racines peuvent explorer librement un volume de sol en trois dimensions, alors qu'en rhizotron elles sont en partie guidées par la surface observable. Les résultats obtenus doivent donc être interprétés comme une représentation simplifiée de l'architecture racinaire, et non comme une reproduction exacte de son organisation en conditions agronomiques.

Évolution de la croissance des mêmes racines latérales

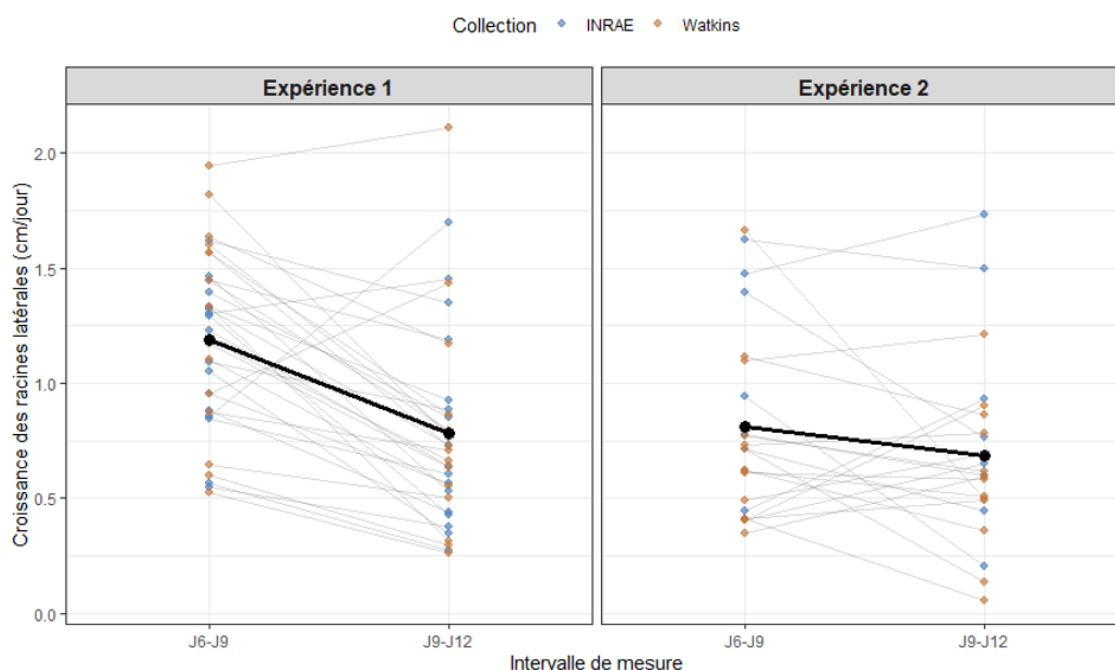


Figure 30 : Évolution de la croissance des mêmes racines latérales entre les intervalles J6-J9 et J9-J12, dans les deux expériences.

Cette limite concerne particulièrement les racines latérales. Leur croissance est majoritairement horizontale ou oblique par rapport à l'axe principal. Or, dans un rhizotron peu large et essentiellement bidimensionnel, cette croissance latérale peut rapidement être contrainte par les bords du dispositif ou par le plan d'observation, comme le montre la figure 30. Une partie de

l'expression naturelle de la ramification peut donc être limitée, soit parce que les latérales disposent de moins d'espace pour se développer, soit parce qu'elles ne suivent pas nécessairement le plan visible. Cela peut conduire à une sous-estimation de la longueur et du développement des racines latérales, et donc à une représentation incomplète de la complexité réelle du système racinaire. Ce point est particulièrement important dans une étude portant sur l'architecture racinaire, car la ramification contribue fortement à la surface d'exploration du sol et à l'acquisition des ressources.

Le dispositif peut également influencer les mesures de biomasse et de diamètre. Lors du démontage, le retrait des racines de la membrane en nylon peut arracher une partie du système racinaire, notamment les racines les plus fines ou les segments les plus fragiles (figure 31). Cette perte entraîne probablement une sous-estimation de la biomasse racinaire totale. Elle peut aussi affecter les mesures de diamètre, car les racines endommagées, écrasées ou partiellement arrachées ne conservent pas toujours leur structure initiale. L'effet pourrait être particulièrement marqué si certains géotypes présentent des tissus racinaires plus fragiles ou moins résistants mécaniquement. Dans ce cas, les différences observées entre géotypes ou entre collections pourraient être partiellement influencées par la résistance des tissus au prélèvement, et non uniquement par leur architecture réelle.



Figure 31 : Exemple de rhizotron en fin d'expérience, illustrant les pertes potentielles.

Cette possibilité doit être prise en compte dans l'interprétation des différences entre champ et rhizotron. Une divergence entre les deux dispositifs ne traduit pas nécessairement une réponse biologique différente à l'environnement. Elle peut aussi provenir du bruit expérimental introduit par la méthode elle-même : contrainte bidimensionnelle, limitation de la croissance latérale, perte de racines fines au démontage, déformation ou réduction apparente du diamètre. Ainsi, certaines différences entre rhizotron et champ pourraient être liées à la manière dont le dispositif sélectionne, contraint ou altère certains traits, plutôt qu'à une différence réelle de stratégie racinaire.

Enfin, même dans un environnement contrôlé, le rhizotron ne supprime pas totalement les hétérogénéités expérimentales. Des fluctuations locales peuvent exister, par exemple sous la forme de gradients de température ou de micro-variations liées à la position des rhizotrons dans le dispositif. Ce point, évoqué lors d'une discussion orale avec Tristan Gérault, rappelle que les

conditions de phytotron ne sont pas parfaitement uniformes. Ces micro-hétérogénéités peuvent contribuer à une partie de la variabilité observée, en particulier lorsque les différences entre géotypes sont faibles.

Ces limites ne remettent pas en cause l'intérêt du rhizotron, mais elles encadrent fortement l'interprétation des résultats. Le dispositif permet de comparer les géotypes dans un cadre plus contrôlé que le champ et de produire des mesures dynamiques difficiles à obtenir autrement. En revanche, il peut sous-estimer certains traits, notamment la biomasse racinaire, la ramification latérale et potentiellement le diamètre. Les résultats obtenus doivent donc être compris comme des différences exprimées dans un environnement semi-contrôlé, où le système racinaire est rendu visible, mais aussi partiellement contraint par le dispositif. Dans cette perspective, le rhizotron doit être considéré comme un outil complémentaire au champ : il ne remplace pas l'observation agronomique en conditions réelles, mais il permet d'identifier des contrastes de développement et de mieux comprendre certains mécanismes de croissance racinaire précoce.

6.4. Profils de diamètre racinaire et relation avec la croissance

L'analyse des profils de diamètre permet de compléter les mesures de longueur et de vitesse de croissance racinaire. En effet, une racine ne se définit pas uniquement par la distance qu'elle parcourt, mais aussi par la quantité de matière investie pour produire cette longueur. Le diamètre constitue donc un indicateur important du coût de construction de la racine : à longueur équivalente, une racine plus épaisse représente un investissement plus important qu'une racine plus fine.

Les profils obtenus montrent toutefois une forte variabilité le long des axes racinaires. Les mesures brutes présentent de nombreuses fluctuations locales, ce qui rend leur interprétation directe difficile. Ces variations peuvent être liées à des irrégularités biologiques, mais aussi à la segmentation des images, à la position des racines lors du scan ou à de légères déformations lors de la manipulation. L'utilisation de moyennes mobiles est donc nécessaire pour faire apparaître les tendances générales et éviter de donner trop d'importance à des variations ponctuelles.

Dans l'expérience 1, le profil de diamètre suit globalement une tendance attendue : le diamètre diminue avec la distance depuis la base de la racine. Cette diminution ne doit pas être principalement interprétée comme un épaississement progressif des tissus basaux par maturation. Chez le blé, qui ne présente pas de croissance secondaire marquée, cette explication reste limitée. L'interprétation la plus probable est plutôt que les premiers segments produits par l'apex sont plus larges, puis que les segments formés plus tardivement deviennent progressivement plus fins. Le profil observé reflète donc davantage une modification du diamètre produit au cours de l'allongement racinaire qu'un épaississement secondaire de la base.

Ce point est important, car il modifie la manière d'interpréter le diamètre. Une base plus large ne signifie pas nécessairement que la racine s'est épaissie avec le temps ; elle peut simplement indiquer que les premières portions de la racine ont été produites avec un diamètre initial plus élevé. À l'inverse, l'affinement vers les zones distales traduit probablement une réduction progressive du coût de construction par unité de longueur. Cette dynamique pourrait permettre à la plante de poursuivre l'exploration du milieu tout en limitant l'investissement en biomasse dans les segments les plus récents.

Dans l'expérience 2, cette tendance est moins régulière. Les profils sont plus variables et ne montrent pas toujours une diminution claire du diamètre avec la distance. Cette différence peut refléter une variation biologique entre expériences, mais elle peut aussi être liée au dispositif expérimental, au décalage temporel entre les deux essais ou à la qualité des mesures. Les profils de diamètre doivent donc être lus comme des tendances morphologiques globales, et non comme des trajectoires parfaitement stables.

Les graphiques reliant diamètre et vitesse de croissance montrent également que la relation entre ces deux traits n'est pas simple. Une racine plus épaisse pourrait être associée à une croissance plus rapide si elle reflète une plus grande vigueur ou une meilleure capacité de construction. Pourtant, cette relation n'apparaît pas de façon systématique. Dans plusieurs cas, le diamètre explique peu la vitesse d'élongation, ce qui suggère que d'autres facteurs interviennent, comme l'état physiologique de la plante, le type de racine, l'âge du segment observé ou les contraintes imposées par le rhizotron.

Lorsque des tendances positives apparaissent, notamment dans certains résultats de l'expérience 2, elles doivent donc être interprétées avec prudence. Elles peuvent indiquer que, pour certains groupes, des racines plus épaisses sont associées à une croissance plus rapide. Mais cette relation ne peut pas être généralisée à l'ensemble du matériel étudié. Une racine fine n'est pas nécessairement moins efficace : elle peut au contraire représenter une stratégie plus économique, permettant de produire plus de longueur pour un coût réduit en biomasse.

Ainsi, le diamètre ne peut pas être considéré comme un simple indicateur de vigueur. Il renseigne plutôt sur une stratégie de construction racinaire, située entre coût d'investissement, croissance en longueur et exploration du milieu. Les profils observés suggèrent que certaines racines s'affinent au cours de leur allongement, tandis que les relations diamètre-vitesse montrent que cet affinement ne se traduit pas mécaniquement par une diminution de la croissance. L'interprétation du diamètre doit donc rester intégrée aux autres traits mesurés, notamment la longueur, la vitesse d'élongation, la ramification et la biomasse racinaire.

Enfin, les limites méthodologiques doivent être gardées en tête. Le rhizotron peut contraindre la trajectoire des racines, et le retrait des racines de la membrane en nylon peut endommager les segments les plus fins. Ces effets peuvent entraîner une sous-estimation du diamètre ou augmenter la variabilité des mesures. Les profils de diamètre et leur relation avec la croissance sont donc utiles pour comparer les tendances entre groupes, mais ils ne doivent pas être interprétés comme une description parfaitement exhaustive du système racinaire en conditions de champ.

6.5. Intégration multivariée des traits racinaires et conséquences sur le Krs simulé

L'analyse en composantes principales permet d'aborder les traits mesurés de manière plus intégrée que les comparaisons variables par variable. Pris séparément, certains traits racinaires présentent des différences parfois limitées, variables selon l'expérience, ou difficiles à interpréter biologiquement. L'ACP montre cependant que ces traits ne varient pas de manière indépendante : les dimensions principales résument des combinaisons de variables liées à la taille du système racinaire, au développement aérien, au diamètre et à la biomasse. Cette approche met donc en évidence une structuration globale des phénotypes, même lorsque les différences observées sur un trait isolé restent modérées.

Cette lecture multivariée est particulièrement utile dans le cas du système racinaire, car la performance fonctionnelle d'une architecture ne dépend pas d'un seul trait. Une longueur racinaire plus élevée, un diamètre plus important ou un nombre de racines plus élevé peuvent avoir des effets différents selon la manière dont ces traits se combinent. L'ACP suggère ainsi que certaines variétés se distinguent davantage par un profil global que par un seul caractère fortement discriminant. Cela rejoint l'idée que l'étude des racines nécessite une approche intégrée, car des différences faibles ou diffuses sur plusieurs traits peuvent, une fois combinées, produire des contrastes fonctionnels plus importants.

Le calcul du Krs avec MARSHAL prolonge cette logique en traduisant les architectures simulées en une estimation fonctionnelle de la conductance hydraulique racinaire. Les résultats montrent que les différences parfois peu évidentes entre traits racinaires peuvent conduire à des valeurs de Krs nettement différenciées entre variétés. Les génotypes présentant les valeurs les plus élevées, notamment WATDE0687, WATDE0044, WATDE0448 et PROQUAL, semblent combiner des architectures racinaires plus favorables au transport de l'eau, tandis que WATDE0079 présente les valeurs les plus faibles. De manière générale, les variétés Watkins tendent à présenter des Krs plus élevés en moyenne, bien que cette tendance ne soit pas uniforme pour l'ensemble des accessions.

Ces résultats montrent l'intérêt de combiner analyses multivariées et modélisation hydraulique. L'ACP permet d'identifier les grands axes de variation phénotypique, tandis que MARSHAL permet d'évaluer les conséquences potentielles de ces différences sur la conductance hydraulique du système racinaire. Ainsi, même si certains traits mesurés ne permettent pas toujours de séparer clairement les variétés, leur intégration dans une architecture simulée peut révéler des différences fonctionnelles plus marquées. Cela suggère que la diversité racinaire observée ne doit pas être interprétée uniquement à travers des traits isolés, mais aussi à travers leur combinaison et leurs effets potentiels sur le fonctionnement hydraulique.

Ces estimations doivent toutefois rester interprétées avec prudence. Les conductivités radiales et axiales ont été maintenues constantes entre variétés, ce qui signifie que les différences de Krs simulé reflètent principalement l'effet de l'architecture racinaire, du diamètre moyen et des paramètres intégrés dans le modèle. Elles ne constituent donc pas des mesures physiologiques absolues de la conductance racinaire propre à chaque génotype. Néanmoins, cette approche fournit un outil pertinent pour comparer le potentiel fonctionnel des architectures racinaires simulées et pour identifier les variétés dont les traits combinés pourraient favoriser une meilleure capacité de transport de l'eau.

6.6. Variabilité entre expériences et influence du dispositif expérimental

Les différences observées entre l'expérience 1 et l'expérience 2 doivent être interprétées avec prudence, car les deux essais ne sont pas parfaitement identiques sur le plan expérimental. Le protocole général est resté similaire, mais plusieurs éléments peuvent avoir introduit une variabilité entre les deux séries de mesures. Une première différence concerne le substrat, et plus particulièrement l'origine du sable utilisé. Dans l'expérience 1, le sable présentait une origine davantage organique, visible notamment par la présence de fragments de coquillages, tandis que le sable utilisé lors de l'expérience 2 était davantage d'origine minérale. Cette différence n'a probablement pas modifié la fonction principale attendue du sable, c'est-à-dire son rôle dans le

drainage et l'aération du substrat. Néanmoins, elle peut avoir légèrement modifié certaines propriétés physiques ou chimiques du milieu, comme la granulométrie, la rétention en eau, la disponibilité de certains éléments ou la résistance mécanique rencontrée par les racines.

Une seconde différence concerne le calendrier expérimental. Le temps écoulé entre la mise en terre des graines, les premières mesures et la récolte finale n'était pas strictement identique entre les deux expériences. Ce point est important, car les traits étudiés, en particulier la longueur racinaire, la vitesse de croissance, le diamètre et la ramification, évoluent rapidement durant les premiers stades de développement. Une différence même limitée dans le moment de mesure peut donc influencer les valeurs observées, surtout lorsque les plantes sont suivies sur une période courte. Cela pourrait expliquer une partie des écarts entre expériences, sans qu'il soit nécessaire d'invoquer uniquement des différences biologiques entre génotypes ou collections.

Ces éléments conduisent à considérer que le temps de mesure est probablement un facteur important dans l'interprétation des résultats. Toutefois, cette conclusion doit rester prudente. Les données disponibles ne permettent pas d'isoler précisément l'effet du calendrier expérimental de celui du substrat, du dispositif ou de la variabilité biologique propre aux plantes. Les différences entre l'expérience 1 et l'expérience 2 doivent donc être comprises comme le résultat possible d'une combinaison de facteurs : variation du substrat, léger décalage temporel, conditions locales de croissance et variabilité intrinsèque du matériel végétal.

Ainsi, les deux expériences ne doivent pas être opposées comme deux systèmes indépendants, mais plutôt considérées comme deux répétitions proches, présentant néanmoins quelques différences méthodologiques. Ces différences n'invalident pas les tendances observées, mais elles limitent la portée des comparaisons directes entre expériences. Elles rappellent surtout que, dans un dispositif de phénotypage précoce en rhizotron, la standardisation du substrat et du calendrier de mesure est essentielle pour réduire le bruit expérimental et améliorer la comparabilité des résultats.

6.7. Perspectives

Les résultats obtenus dans ce mémoire ouvrent plusieurs perspectives pour la poursuite du travail sur la diversité racinaire du froment, tout en s'inscrivant dans la continuité directe des travaux précédents. Ce mémoire ne constitue pas un point de départ isolé, mais prolonge le travail réalisé par Émile Davio, dont il reprend et adapte le dispositif expérimental. Il s'insère ainsi dans une dynamique progressive de construction de données sur les traits racinaires du blé en rhizotron, avec pour objectif d'améliorer la compréhension des différences entre génotypes et de fournir des informations complémentaires aux observations réalisées dans le cadre du projet DROOGHT.

Une première perspective concerne l'amélioration du dispositif expérimental. Le rhizotron a permis de suivre finement la croissance racinaire précoce et d'accéder à des mesures difficiles à obtenir en conditions de champ. Toutefois, les limites identifiées au cours de l'étude montrent l'importance d'une standardisation encore plus stricte du protocole. Dans de futurs essais, il serait utile d'uniformiser totalement le substrat entre expériences, notamment l'origine du sable, ainsi que le calendrier de semis, de mesure et de récolte. Cette standardisation permettrait de réduire le bruit expérimental et de mieux distinguer les différences réellement liées aux génotypes de celles introduites par le dispositif.

Une deuxième perspective concerne l'amélioration de l'observation des racines latérales. Dans le dispositif utilisé, leur développement peut être limité par la largeur du rhizotron et par la croissance essentiellement bidimensionnelle imposée par la vitre et la membrane. Or, les racines latérales jouent un rôle majeur dans l'exploration du sol et dans l'acquisition des ressources. Il serait donc

pertinent de tester des rhizotrons plus larges, ou des dispositifs permettant une meilleure expression de la ramification. Des mesures destructives plus ciblées pourraient également compléter les observations dynamiques afin de mieux estimer la longueur totale des latérales, leur densité et leur contribution réelle à la biomasse racinaire.

Une troisième perspective concerne le lien entre les résultats obtenus en rhizotron et les observations au champ. Le rhizotron permet de produire des mesures dynamiques précises, mais il ne reproduit pas l'ensemble des contraintes physiques, hydriques et biologiques du sol. Il sera donc nécessaire de comparer plus systématiquement les classements observés en rhizotron avec ceux obtenus en conditions de champ. Cette comparaison permettra d'identifier quels traits mesurés précocement en conditions contrôlées sont réellement informatifs du comportement des géotypes en situation agronomique. Si certaines relations sont conservées entre les deux dispositifs, le rhizotron pourra servir d'outil complémentaire pour orienter le phénotypage et cibler plus efficacement les mesures lourdes au champ.

Les relations entre traits constituent également une perspective importante. Les résultats suggèrent que la longueur racinaire, la vitesse de croissance, le diamètre, la ramification et la biomasse ne varient pas toujours de manière coordonnée. Il serait donc pertinent de poursuivre l'analyse à travers une approche multi-traits, en intégrant davantage les relations allométriques entre parties aériennes et souterraines. L'objectif serait d'identifier si certains traits simples à mesurer, comme la hauteur, la longueur racinaire visible ou le diamètre moyen, peuvent servir de proxys pour estimer des traits plus difficiles à obtenir, comme la biomasse racinaire ou la conductance du système racinaire. Cette approche pourrait contribuer à rationaliser les protocoles de phénotypage et à réduire le nombre de mesures destructives nécessaires.

Une autre perspective concerne l'étude plus fine du diamètre racinaire. Les profils observés montrent que le diamètre varie le long des racines et que cette variation n'est pas toujours reliée simplement à la vitesse de croissance. Des mesures complémentaires permettraient de mieux comprendre si ces différences traduisent des stratégies de construction racinaire, des différences de coût en biomasse ou des variations de résistance mécanique des tissus. Il serait également utile de vérifier si les profils observés en rhizotron sont retrouvés sur des racines développées en conditions de champ, afin de distinguer les effets propres au géotype de ceux induits par le dispositif expérimental.

Enfin, les données produites dans ce mémoire alimenteront le projet DROOGHT, notamment en fournissant des mesures fines de croissance, de longueur, de diamètre, de ramification et de biomasse racinaire. Ces données pourront être mobilisées pour enrichir l'interprétation des observations de terrain, mais aussi pour contribuer au paramétrage et à l'évaluation de modèles de développement racinaire comme CRootBox. Cette intégration est importante, car elle permet de relier des observations expérimentales précises à des simulations du développement racinaire et de l'absorption de l'eau. À terme, ce type d'approche aidera à mieux comprendre comment différents géotypes de blé explorent le sol et répondent à des scénarios hydriques contrastés.

Ainsi, ce mémoire s'inscrit comme une étape supplémentaire dans un travail déjà engagé sur la caractérisation des traits racinaires du froment. En prolongeant les travaux d'Émile Davio, il apporte de nouvelles données expérimentales, identifie des contrastes de développement entre géotypes, met en évidence certaines limites méthodologiques du rhizotron et renforce le lien entre phénotypage contrôlé, observations de terrain et modélisation. Les perspectives principales consistent donc à améliorer la standardisation du dispositif, à mieux relier les mesures en rhizotron aux performances au champ, à approfondir l'analyse multi-traits et à intégrer ces données dans le cadre plus large du projet DROOGHT.

7. Conclusion

Ce mémoire s'inscrit dans la continuité des travaux visant à mieux comprendre les systèmes racinaires du froment, longtemps difficiles à étudier en raison des contraintes pratiques liées à leur observation. Il prolonge directement le mémoire d'Émile Davio, en poursuivant la caractérisation de traits racinaires précoces en rhizotron, et s'intègre dans le cadre plus large du projet DROOGHT.

L'objectif principal de ce travail était d'analyser la diversité racinaire de douze géotypes de froment appartenant à deux groupes distincts : des variétés issues de la collection INRAE et des accessions issues de la collection Watkins. Cette comparaison avait pour but d'identifier d'éventuelles différences de développement racinaire entre un matériel plus moderne et un matériel ancien, issu de landraces géographiquement diversifiées. Un second objectif était d'étudier les relations entre plusieurs traits, notamment la longueur racinaire, la vitesse de croissance, le diamètre, la ramification et la biomasse, afin de mieux comprendre les stratégies de développement exprimées par les plantes.

Pour répondre à ces objectifs, deux expériences ont été menées en conditions contrôlées à l'aide de rhizotrons. Ce dispositif a permis de suivre dynamiquement la croissance racinaire et d'obtenir des mesures difficilement accessibles en conditions de champ. Les résultats montrent des différences entre les collections Watkins et INRAE, mais celles-ci ne correspondent pas à une opposition simple entre un groupe plus performant et un autre moins développé. Les Watkins semblent globalement présenter une plus forte variabilité et, dans certains cas, un investissement racinaire plus marqué, tandis que les INRAE apparaissent plus homogènes. Toutefois, la variabilité interne à chaque groupe reste importante, comme l'illustre notamment le profil atypique de TORRIL.

L'analyse du diamètre montre également que ce trait ne peut pas être interprété comme un simple indicateur de vigueur. Les profils observés suggèrent une diminution du diamètre le long de la racine, probablement liée à un affinement progressif des segments produits au cours de l'élongation. La relation entre diamètre et vitesse de croissance reste cependant variable et ne permet pas de conclure à un lien systématique entre racines plus épaisses et croissance plus rapide. Ces résultats soulignent l'intérêt d'une approche multi-traits, intégrant à la fois longueur, diamètre, vitesse, ramification et biomasse.

Les différences observées entre les deux expériences rappellent enfin l'importance des conditions méthodologiques. L'origine différente du sable utilisé, le léger décalage temporel entre les mesures et les contraintes propres au rhizotron peuvent avoir introduit une part de variabilité expérimentale. Le dispositif reste donc un outil complémentaire au champ : il permet de révéler des tendances et de comparer les géotypes dans un cadre contrôlé, mais il ne reproduit pas entièrement la complexité du sol.

En conclusion, ce mémoire met en évidence des contrastes de développement racinaire chez le froment, à la fois entre collections et entre géotypes. Il montre que les différences observées relèvent davantage de stratégies d'allocation et de construction racinaire que d'une supériorité simple d'un groupe sur l'autre. Les données produites alimenteront le projet DROOGHT et pourront contribuer à relier phénotypage en rhizotron, observations de terrain et modélisation racinaire. Les perspectives principales concernent la validation des tendances en champ,

l'amélioration de la standardisation expérimentale et l'intégration de traits anatomiques pour mieux relier structure et fonction du système racinaire.

8. Bibliographie

« Agriculture en 2024: moins de cultures d'hiver en raison des fortes pluies | Statbel ». Consulté le 20 mars 2026. <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/agriculture-en-2024-moins-de-cultures-dhiver-en-raison-des-fortes-pluies>.

Asseng, S., F. Ewert, P. Martre, et al. « Rising Temperatures Reduce Global Wheat Production ». *Nature Climate Change* 5, n° 2 (2015): 143-47. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>.

Bohicchio, Rocco, Rosanna Labella, Antonella Vitti, Maria Nuzzaci, Giuseppina Logozzo, et Mariana Amato. « Root Morphology, Allometric Relations and Rhizosheath of Ancient and Modern Tetraploid Wheats (*Triticum Durum* Desf.) in Response to Inoculation with *Trichoderma Harzianum* T-22 ». *Plants* 11, n° 2 (2022). <https://doi.org/10.3390/plants11020159>.

Brajkovic, Josip, Xavier Fettweis, Brice Noël, et al. « Increased intensity and frequency of extreme precipitation events in Belgium as simulated by the regional climate model MAR ». *Journal of Hydrology: Regional Studies* 59 (juin 2025): 102399. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102399>.

Brunel-Saldias, Nidia, Juan Pedro Ferrio, Abdelhalim Elazab, Massiel Orellana, et Alejandro del Pozo. « Root Architecture and Functional Traits of Spring Wheat Under Contrasting Water Regimes ». *Frontiers in Plant Science* 11 (novembre 2020). <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.581140>.

Carpenter, Stephen R., Kanchan Chopra, Partha Dasgupta, et al. *A Report of the Millennium Ecosystem Assessment*. s. d.

Cavalet-Giorsa, Emile, Andrea González-Muñoz, Naveenkumar Athiyannan, et al. « Origin and Evolution of the Bread Wheat D Genome ». *Nature* 633, n° 8031 (2024): 848-55. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07808-z>.

Chantret, Nathalie, Jérôme Salse, Sadequr Rahman, et al. « Molecular Basis of Evolutionary Events That Shaped the Hardness Locus in Diploid and Polyploid Wheat Species (*Triticum* and *Aegilops*) ». *The Plant cell* 17 (mai 2005): 1033-45. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.029181>.

Chaussebourg, Lou, Florian Baijot, Noémie Maughan, Marjolein Visser, et Kevin Maréchal. « Beyond Industrial Standards: Crafting Quality Bread with Heritage Wheat in Walloon Alternative Bread Supply Chains ». *Frontiers in Sustainable Food Systems* 9 (juillet 2025). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1522643>.

Chen, Si, Lizhi Long, Xiaolei Sun, David Parsons, et Zhenjiang Zhou. « Responsive root traits and mitigating strategies for wheat production under single or combined abiotic stress ». *European Journal of Agronomy* 162 (janvier 2025): 127393. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127393>.

Cheng, Shifeng, Cong Feng, Luzie U. Wingen, et al. « Harnessing landrace diversity empowers wheat breeding ». *Nature* 632, n° 8026 (2024): 823-31. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07682-9>.

« Chiffres clés de l'agriculture 2024 | Statbel ». Consulté le 20 mars 2026. <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/chiffres-cles-de-lagriculture-2024>.

« Common wheat and spelt production across EU regions ». Consulté le 20 mars 2026. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/edn-20201014-2>.

Davio, Emile. *Étude de la diversité racinaire inter-variétale du froment (Triticum aestivum subsp. aestivum) et analyse des relations entre traits racinaires*. 2025. <https://hdl.handle.net/2078.2/44695>.

De Swaef, Tom, Olivier Pieters, Simon Appeltans, et al. « On the Pivotal Role of Water Potential to Model Plant Physiological Processes ». IN *SILICO PLANTS* 4, n° 1 (2022). <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab038>.

Dietrich, Daniela, Lei Pang, Akie Kobayashi, et al. « Root Hydrotropism Is Controlled via a Cortex-Specific Growth Mechanism ». *Nature Plants* 3 (mai 2017): 17057. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.57>.

Dubcovsky, Jorge, et Jan Dvorak. « Genome plasticity a key factor in the success of polyploid wheat under domestication ». *Science (New York, N.Y.)* 316, n° 5833 (2007): 1862-66. <https://doi.org/10.1126/science.1143986>.

EL Jarroudi, Moussa, Louis Kouadio, Martin Bertrand, et al. « Integrating the impact of wheat fungal diseases in the Belgian crop yield forecasting system (B-CYFS) ». *European Journal of Agronomy* 40 (juillet 2012): 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.02.003>.

El-Esawi, Mohamed A., Jacques Witzak, Abd El-Fatah Abomohra, Hayssam M. Ali, Mohamed S. Elshikh, et Margaret Ahmad. « Analysis of the Genetic Diversity and Population Structure of Austrian and Belgian Wheat Germplasm within a Regional Context Based on DArT Markers ». *Genes* 9, n° 1 (2018). <https://doi.org/10.3390/genes9010047>.

Figueroa-Bustos, Victoria, Jairo A. Palta, Yinglong Chen, et Kadambot H. M. Siddique. « Characterization of Root and Shoot Traits in Wheat Cultivars with Putative Differences in Root System Size ». *Agronomy* 8, n° 7 (2018). <https://doi.org/10.3390/agronomy8070109>.

Frodyma, Katarzyna, Monika Papież, Sławomir Śmiech, Katarzyna Frodyma, Monika Papież, et Sławomir Śmiech. « Decoupling Economic Growth from Fossil Fuel Use—Evidence from 141 Countries in the 25-Year Perspective ». *Energies* 13, n° 24 (2020). <https://doi.org/10.3390/en13246671>.

Gaurav, Kumar, Sanu Arora, Paula Silva, et al. « Population Genomic Analysis of Aegilops Tauschii Identifies Targets for Bread Wheat Improvement ». *Nature Biotechnology* 40, n° 3 (2022): 422-31. <https://doi.org/10.1038/s41587-021-01058-4>.

Hayashi, Kohma, Junko Hasegawa, et Sachihiko Matsunaga. « The boundary of the meristematic and elongation zones in roots: endoreduplication precedes rapid cell expansion ». *Scientific Reports* 3 (octobre 2013): 2723. <https://doi.org/10.1038/srep02723>.

Hoban, Sean, Michael Bruford, Josephine D'Urban Jackson, et al. « Genetic diversity targets and indicators in the CBD post-2020 Global Biodiversity Framework must be improved ». *Biological Conservation* 248 (août 2020): 108654. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108654>.

Kim, Hyejeong, Kiwoong Kim, et Sang Joon Lee. « Hydraulic Strategy of Cactus Root–Stem Junction for Effective Water Transport ». *Frontiers in Plant Science* 9 (juin 2018). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00799>.

Kramer, Paul J., et John S. Boyer. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, 1995.

Krouk, Gabriel, Benoît Lacombe, Agnieszka Bielach, et al. « Nitrate-Regulated Auxin Transport by NRT1.1 Defines a Mechanism for Nutrient Sensing in Plants ». *Developmental Cell* 18, n° 6 (2010): 927-37. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2010.05.008>.

Levernier, Nicolas, Olivier Pouliquen, et Yoël Forterre. « An Integrative Model of Plant Gravitropism Linking Statoliths Position and Auxin Transport ». *Frontiers in Plant Science* 12 (mars 2021). <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.651928>.

Levy, Avraham A., et Moshe Feldman. « Evolution and origin of bread wheat ». *The Plant Cell* 34, n° 7 (2022): 2549-67. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac130>.

Lobet, Guillaume, Michael P. Pound, Julien Diener, et al. « Root System Markup Language: Toward a Unified Root Architecture Description Language ». *Plant Physiology* 167, n° 3 (2015): 617-27. <https://doi.org/10.1104/pp.114.253625>.

Lopes, Marta S., Ibrahim El-Basyoni, Peter S. Baenziger, et al. « Exploiting genetic diversity from landraces in wheat breeding for adaptation to climate change ». *Journal of Experimental Botany* 66, n° 12 (2015): 3477-86. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv122>.

Lynch, Jonathan P. « Harnessing root architecture to address global challenges ». *The Plant Journal* 109, n° 2 (2022): 415-31. <https://doi.org/10.1111/tpj.15560>.

Lynch, Jonathan P. « Steep, Cheap and Deep: An Ideotype to Optimize Water and N Acquisition by Maize Root Systems ». *Annals of Botany* 112, n° 2 (2013): 347-57. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs293>.

Lynch, Jonathan P., et Kathleen M. Brown. « Topsoil Foraging – an Architectural Adaptation of Plants to Low Phosphorus Availability ». *Plant and Soil* 237, n° 2 (2001): 225-37. <https://doi.org/10.1023/A:1013324727040>.

Manschadi, Ahmad M., John Christopher, Peter deVoil, et Graeme L. Hammer. « The Role of Root Architectural Traits in Adaptation of Wheat to Water-Limited Environments ». *Functional Plant Biology* 33, n° 9 (2006): 823-37. <https://doi.org/10.1071/FP06055>.

Marcussen, Thomas, Simen R. Sandve, Lise Heier, et al. « Ancient Hybridizations among the Ancestral Genomes of Bread Wheat ». *Science* (New York, N.Y.) 345, n° 6194 (2014): 1250092. <https://doi.org/10.1126/science.1250092>.

Maurel, Christophe, Yann Boursiac, Doan-Trung Luu, Véronique Santoni, Zaigham Shahzad, et Lionel Verdoucq. « Aquaporins in Plants ». *Physiological Reviews* 95, n° 4 (2015): 1321-58. <https://doi.org/10.1152/physrev.00008.2015>.

Merchuk-Ovnat, Lianne, Vered Barak, Tzion Fahima, et al. « Ancestral QTL Alleles from Wild Emmer Wheat Improve Drought Resistance and Productivity in Modern Wheat Cultivars ». *Frontiers in Plant Science* 7 (avril 2016). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00452>.

Nielsen, Nanna Hellum, Gunter Backes, Jens Stougaard, Stig Uggerhøj Andersen, et Ahmed Jahoor. « Genetic Diversity and Population Structure Analysis of European Hexaploid Bread Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Varieties ». *PLOS ONE* 9, n° 4 (2014): e94000. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094000>.

Nobel, Park S. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press, 1991.

Odone, Arnesta, Satyasan Changdar, et Kristian Thorup-Kristensen. « Winter wheat phenotyping for deep root growth and function, reduced water stress and increased uptake of deep N and water ». *Annals of Botany* 136, n° 5-6 (2025): 1101-14. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaf160>.

Our World in Data. « Global Cereal Production Has Grown Much Faster than Population in the Last Half-Century ». Consulté le 29 mai 2026. <https://ourworldindata.org/data-insights/global-cereal-production-has-grown-much-faster-than-population-in-the-last-half-century>.

Overvoorde, Paul, Hidehiro Fukaki, et Tom Beeckman. « Auxin Control of Root Development ». *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 2, n° 6 (2010): a001537. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a001537>.

P. Pais, Isabel, Rita Moreira, José N. Semedo, et al. « Phenotypic Diversity of Seminal Root Traits in Bread Wheat Germplasm from Different Origins ». *Plants* 11, n° 21 (2022): 2842. <https://doi.org/10.3390/plants11212842>.

Pascual, Laura, Mario Fernández, Nieves Aparicio, et al. « Development of a Multipurpose Core Collection of Bread Wheat Based on High-Throughput Genotyping Data ». *Agronomy* 10, n° 4 (2020): 534. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040534>.

« Phenotyping Root Growth Using Rhizotrons | INRAE ». Consulté le 6 mai 2026. <https://www.inrae.fr/en/news/phenotyping-root-growth-using-rhizotrons>.

ResearchGate. « (PDF) Water Relations of Plants and Soils ». Consulté le 5 mai 2026. https://www.researchgate.net/publication/371631998_Water_Relations_of_Plants_and_Soils.

ResearchGate. « The Dynamics of Social Practice: Everyday Life and How It Changes | Request PDF ». Consulté le 29 mai 2026. https://www.researchgate.net/publication/291279974_The_dynamics_of_social_practice_Everyday_life_and_how_it_changes.

Rivas, María Dolores Gadea, et Jesús Gonzalo. « Climate Change Heterogeneity: A New Quantitative Approach ». *PLOS ONE* 20, n° 1 (2025): e0317208. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317208>.

Seto, Karen C., Steven J. Davis, Ronald B. Mitchell, Eleanor C. Stokes, Gregory Unruh, et Diana Ürge-Vorsatz. « Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications ». *Annual Review of Environment and Resources* 41, n° 1 (2016): 425-52. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934>.

Sharma, Shivali, Albert W. Schulthess, Filippo M. Bassi, et al. « Introducing Beneficial Alleles from Plant Genetic Resources into the Wheat Germplasm ». *Biology* 10, n° 10 (2021): 982. <https://doi.org/10.3390/biology10100982>.

Smith, F. Andrew. « Plant roots. Growth, activity and interaction with soils ». *Annals of Botany* 100, n° 1 (2007): 151-52. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm099>.

Soriano, Jose Miguel, et Fanny Alvaro. « Discovering Consensus Genomic Regions in Wheat for Root-Related Traits by QTL Meta-Analysis ». *Scientific Reports* 9, n° 1 (2019): 10537. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47038-2>.

Steudle, E. « Water Uptake by Roots: Effects of Water Deficit ». *Journal of Experimental Botany* 51, n° 350 (2000): 1531-42. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1531>.

Taiz, Lincoln, Eduardo Zeiger, Ian Max Moller, et Angus Murphy. *Plant Physiology and Development, Sixth Edition*. s. d.

Tehseen, Muhammad Massub, Fatma Aykut Tonk, Muzaffer Tosun, et al. « Exploring the Genetic Diversity and Population Structure of Wheat Landrace Population Conserved at ICARDA Genebank ». *Frontiers in Genetics* 13 (juin 2022). <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.900572>.

« The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration - Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney, Cornelia Ludwig, 2015 ». Consulté le 5 janvier 2026. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2053019614564785>.

Wasson, A. P., R. A. Richards, R. Chatrath, et al. « Traits and Selection Strategies to Improve Root Systems and Water Uptake in Water-Limited Wheat Crops ». *Journal of Experimental Botany* 63, n° 9 (2012): 3485-98. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers111>.

Watson, Robert T., Ivar A. Baste, Anne Larigauderie, et al. *MEMBERS OF THE MANAGEMENT COMMITTEE WHO PROVIDED GUIDANCE FOR THE PRODUCTION OF THIS ASSESSMENT*: s. d.

« WMO E-Library ». Consulté le 29 mai 2026. <https://library.wmo.int>.

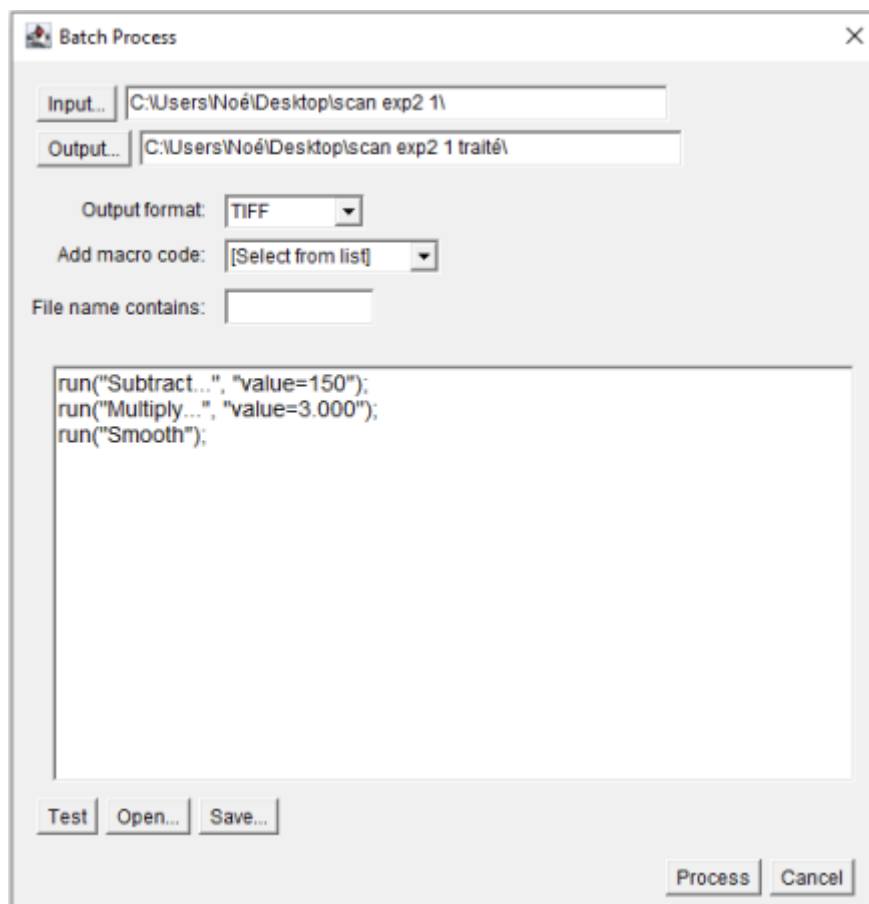
Xiong, Yali, Xiaoyun Song, Poonam Mehra, et al. « ABA-auxin cascade regulates crop root angle in response to drought ». *Current Biology* 35, n° 3 (2025): 542-553.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.12.003>.

Xu, Fengdan, Shulin Chen, Xiwen Yang, et al. « Genome-Wide Association Study on Seminal and Nodal Roots of Wheat Under Different Growth Environments ». *Frontiers in Plant Science* 11 (janvier 2021). <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.602399>.

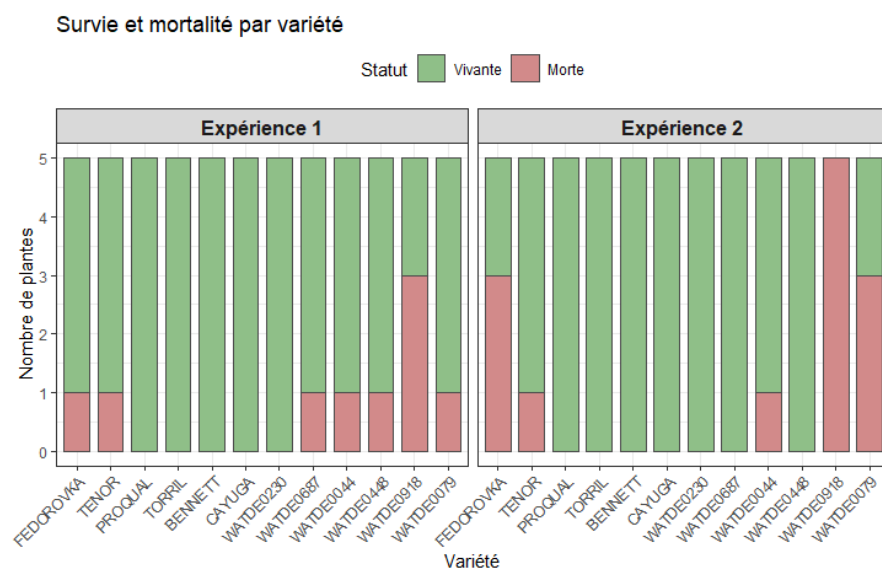
Yang, Jianfeng, Yun Yu, Teng Ma, Cuiguang Zhang, et Quan Wang. « Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis ». *Chinese Journal of Population, Resources and Environment* 19, n° 3 (2021): 256-64. <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2021.12.028>.

Yang, Xiu, Binwen Tan, Haijiao Liu, et al. « Genetic Diversity and Population Structure of Asian and European Common Wheat Accessions Based on Genotyping-By-Sequencing ». *Frontiers in Genetics* 11 (septembre 2020): 580782. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.580782>.

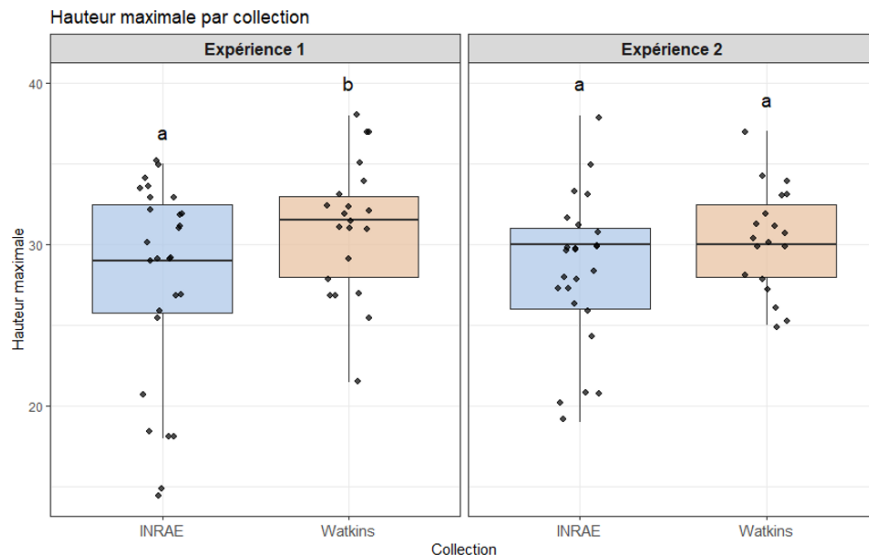
9. Annexes



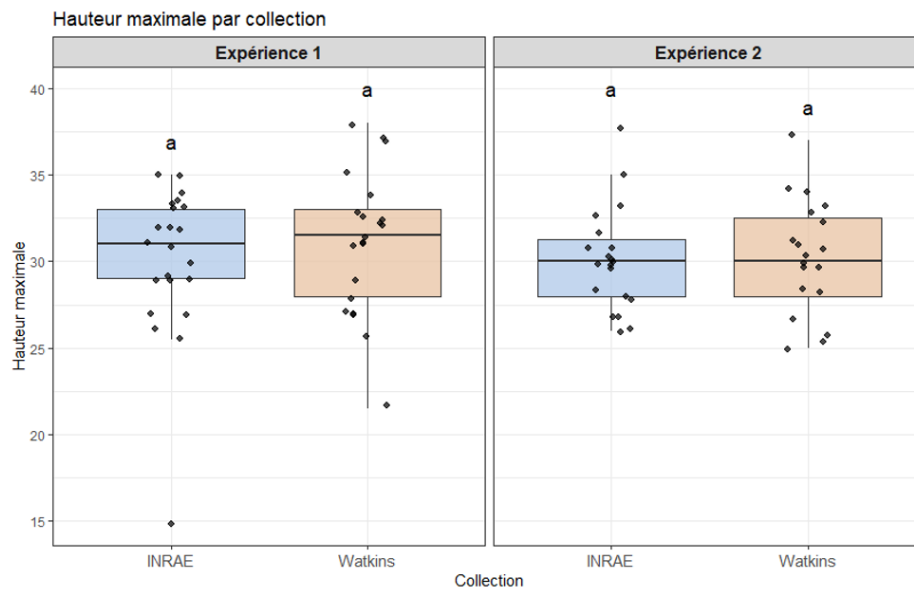
Annexe 1 : Macro ImageJ



Annexe 2 : Survie et mortalité par variété et experience.



Annexe 3 : Hauteur (cm) par collection et expérience avec TORRIL.



Annexe 4 : Hauteur (cm) sans TORRIL

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

Wuidart Noé

Dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des épisodes de sécheresse, la compréhension de la diversité racinaire du froment constitue un enjeu important pour l'amélioration variétale. Ce mémoire étudie la diversité racinaire précoce de plusieurs génotypes de froment (*Triticum aestivum* subsp. *aestivum*), issus de deux origines principales : des variétés INRAE et des accessions de la collection Watkins. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure cette diversité génétique se traduit par des différences phénotypiques au niveau du système racinaire, et si ces différences peuvent avoir des conséquences fonctionnelles sur la conductance hydraulique racinaire.

Deux expériences en rhizotron ont été menées afin de suivre le développement aérien et racinaire des plantes dans des conditions contrôlées. Plusieurs traits ont été mesurés, notamment la hauteur, le nombre de feuilles, le nombre de racines séminales, la longueur racinaire, la vitesse de croissance, le diamètre moyen, la croissance des racines latérales ainsi que les masses sèches aérienne et racinaire. Ces données ont permis de comparer les génotypes entre eux, mais aussi d'analyser les relations entre traits à l'aide d'approches statistiques et multivariées.

Les résultats montrent une variabilité importante entre génotypes, avec certaines tendances différenciant les accessions Watkins des variétés INRAE. Les Watkins présentent globalement une variabilité plus marquée et, dans plusieurs cas, un système racinaire plus développé. Toutefois, les différences entre traits isolés restent parfois limitées ou difficiles à interpréter directement. L'analyse en composantes principales montre que les génotypes se distinguent davantage par des combinaisons de traits que par un seul caractère racinaire dominant.

Afin de relier ces différences morphologiques à une dimension fonctionnelle, les architectures racinaires ont été simulées avec CPlantBox/CRootBox puis utilisées dans MARSHAL pour estimer la conductance hydraulique racinaire, ou K_{rs}. Cette modélisation montre que des différences parfois modérées de longueur, de diamètre ou de structure racinaire peuvent conduire à des valeurs de K_{rs} nettement différenciées. Les accessions Watkins tendent globalement à présenter des valeurs de K_{rs} plus élevées, bien que cette tendance ne soit pas uniforme pour l'ensemble des génotypes.

Ce travail met ainsi en évidence l'intérêt d'une approche intégrée combinant phénotypage racinaire, analyse multivariée et modélisation hydraulique. Il souligne que la diversité racinaire du froment ne doit pas être interprétée uniquement à travers des traits isolés, mais également à travers leurs combinaisons et leurs conséquences fonctionnelles potentielles. Ces résultats contribuent au projet DROOGHT et ouvrent des perspectives pour l'identification de traits racinaires utiles à la sélection de variétés plus résilientes face aux contraintes hydriques.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

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