

Faculté des bioingénieurs

**Étude en champ de l'architecture
racinaire du froment d'hiver
(*Triticum aestivum*) : effets du
contexte pédologique, des pratiques
culturales et de l'association
froment–féverole (*Vicia faba*)**

Auteur : Jeremiah Georges

Promoteur(s) : Guillaume Lobet

Lecteurs : Xavier Dray, Fanny Boeraeve

Année académique 2024-2025

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

Remerciements

À chaque étape de ce mémoire, j'ai pu compter sur le soutien et l'aide de nombreuses personnes que je souhaite remercier.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, Guillaume Lobet, pour son accompagnement et son soutien tout au long de ce projet. Merci pour le temps consacré, ta disponibilité, ta capacité à t'adapter à mes besoins, ton encouragement dans les moments de doute, ainsi que pour ta bienveillance et tes grandes qualités humaines. Travailler avec toi m'a permis de vivre ce travail non pas comme une corvée, mais comme l'aboutissement et l'accomplissement final de ma formation universitaire.

Merci également à Lucia et Corentin pour leur aide précieuse au laboratoire, que ce soit dans l'organisation des échantillons, la planification ou les différentes formations à l'utilisation du matériel.

Je souhaite aussi remercier tous les agriculteurs qui ont accepté de collaborer avec moi, en m'accordant de leur temps déjà si précieux pour me montrer les parcelles et me fournir les données sur leurs pratiques agricoles.

Mes remerciements vont aussi aux membres de Farm For Good avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger : Lucas Van den Abeele, Marie-Aline Cornue et Judith Braconnier. Sans leur aide, la recherche des parcelles d'étude n'aurait pas été possible.

Je remercie chaleureusement mes parents, Brigitte Genin et Dominique Georges, pour le temps et l'énergie qu'ils m'ont consacrés dans ce long travail fastidieux. Merci également à mes amis, Louis Dawans, Romane Dupont, Léa Godefroid et bien d'autres, pour leur aide précieuse, qu'il s'agisse des scans racinaires, des prélèvements sur le terrain ou de la résolution de nombreux problèmes de codage.

Enfin, je remercie Xavier Dray et Fanny Boeraeve d'avoir accepté de relire mon travail et de faire partie du jury de ce mémoire.

Table des matières

Remerciements.....	1
Table des matières.....	2
Liste des figures	5
Liste des tableaux	6
1. Introduction.....	7
2. État de l’art	9
2.1. Contexte.....	9
2.1.1. Limites et problématiques des systèmes de productions agro-alimentaires.....	9
2.1.2. La place du blé d’hiver	9
2.1.3. Les intrants chimiques dans l’agriculture.....	11
2.2. Les cultures associées.....	12
2.2.1. Interactions entre cultivars	13
2.2.2. Indicateurs des mécanismes de complémentarité et de compétition	13
2.2.3. Bénéfices liés aux cultures associées	14
2.2.4. Points négatifs	15
2.2.5. Intérêt générale des cultures intercalaires de type céréale/légumineuse.....	15
2.3. Le froment d’hiver	17
2.3.1. Caractéristiques générales.....	17
2.3.2. Variétés et aptitude à la panification	17
2.3.3. Caractéristiques physiologiques principales	18
2.3.4. L’échelle de Zadoks : repère phénologique international.....	19
2.3.5. Cycle de développement	20
2.4. La féverole	21
2.4.1. Valeur nutritionnelle, production et usages	21
2.4.2. Caractéristiques physiologiques principales	22
2.4.3. Cycle de développement	23
2.5. Effets synergiques de culture associée froment d’hiver et féverole.....	24
2.6. Impacts des pratiques agricoles	24
2.6.1. Fertilisation azotée	24
2.6.2. Semis simultanés ou décalés	25
2.6.3. Organisation spatiale	25
2.6.4. Densité de semis.....	26
2.6.5. Choix variétal	26
2.7. Les systèmes racinaires	27

2.7.1. Etat de la recherche scientifique	27
3. Objectifs et démarche	28
3.1. Objectif général	28
3.2. Sous-objectifs spécifiques	28
3.2.1. Association blé/féverole	28
3.2.2. Données réutilisables.....	29
3.2.3. Farm For Good et Open Compass.....	29
4. Matériels et méthodes	30
4.1. Sites d'études.....	30
4.1.1. Contexte climatique.....	30
4.1.2. Saison agricole 2024-2025 : un climat atypique	30
4.1.3. Localisation des sites d'étude et contexte pédologique	31
4.2. Echantillonnage	33
4.2.1. Echantillons de sols.....	33
4.2.2. Echantillons végétaux	34
4.3. Gestion des échantillons.....	35
4.3.1. Scanners racinaires	35
4.3.2. QuantiSlake Test	36
4.3.3. Biomasse.....	38
4.3.4. Analyses chimiques de sol.....	38
4.4. Résumé des données collectées.....	40
4.5. Analyse des données et traitement statistique.....	41
4.6. Outil de rédaction	42
5. Résultats et discussion	43
5.1. Environnement pédologique	43
5.2. Analyse des variables séparément	44
5.2.1. QuantiSlake Tests.....	44
5.2.2. Combinaison des QuantiSlake Tests avec les autres paramètres pédologiques	46
5.2.3. Analyse préliminaire des paramètres racinaires	48
5.2.4. Analyse des paramètres catégoriels	49
5.3. Modèle mixte global	51
5.4. Modèle précis pour le stade de développement	51
5.5. Liens entre le stade de développement et diamètre racinaire	53
5.5.1. Nature de la relation.....	53
5.5.2. Différences entre racines nodales et séminales	53

5.6. Influence des paramètres extérieurs.....	54
5.6.1. Influence du système culturelle sur les paramètres racinaires.....	54
5.6.2. Influence de la variété génétique	55
5.6.3. Influence des antécédents cultureaux	56
5.7. Les modèles d’Open Compas	56
6. Conclusion	58
7. Limites et perspectives.....	61
7.1. Limites et données non exploitées.....	61
7.2. Perspectives de recherche.....	62
Références.....	64
8. Annexe	72

Liste des figures

Figure 1 : l'évolution de l'énergie investie dans l'agriculture en France entre 1900 et 2013 (Nowak B., 2024)	12
Figure 2 : Représentation schématique (A ; G. Lobet, 2024) et illustration à la plume (B ; (Lichtenegger, E., 2009a)) de <i>Triticum aestivum</i>	19
Figure 3 : Illustration à la plume <i>Vicia faba</i> (A ; Lichtenegger, E., 2009b) et féverole en fleur (B ; CARTRYSSSE C. et al., 2024)	22
Figure 4 : Répartition spatiale des fermes ayant fait l'objet de prélèvements et contexte pédologique.....	31
Figure 5 : Exemple de traitement des scans racinaires montrant la distinction entre racines principales (jaune) et secondaires (vert).....	36
Figure 6 : xemple de résultat standard d'un test QuantiSlake	38
Figure 7 : Évolution normalisée de la perte de masse du sol par parcelle	43
Figure 8 : Représentation des corrélations entre indicateurs du QuantiSlake Test selon les deux premières composantes principales (CP1 ; CP2 ; détail précis des indicateurs Annexe 2 ; $\cos^2$ est le carré du cosinus de l'angle entre la variable et l'axe considéré, plus il est proche de 1 plus la variable est bien représentée sur le plan choisi)	45
Figure 9 : Projection ACP des indicateurs du QuantiSlake Test — Clustering Ward, 4 groupes	45
Figure 10 : Représentation des corrélations entre les paramètres pédologiques selon les deux premières composantes principales (CP1 ; CP2 ; $\cos^2$ est le carré du cosinus de l'angle entre la variable et l'axe considéré, plus il est proche de 1 plus la variable est bien représentée sur le plan choisi)	47
Figure 11 : Projection des échantillons selon CP1 et CP2 de la figure 9 (référence détaillée Tableau 2 ; Tableau 3)	47
Figure 12 : Distribution du diamètre racinaire moyen normalisé selon les parcelles	48
Figure 13 : Diamètre racinaire normalisé en fonction de la variété génétique	50
Figure 14 : Diamètre racinaire en fonction de la variété génétique et du stade de développement Zadok: précoce (1), intermédiaire (2), Tardif (3)	50
Figure 15 : : Évolution du diamètre racinaire selon le stade Zadoks (ajustements linéaire et quadratique).....	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Catégorie de qualité technologique des froments spécifiques à l'AB en Wallonie - 2025(Godin B., 2023).....	18
Tableau 2 : Description des caractéristiques générales des exploitations agricoles étudiées	32
Tableau 3 : Caractéristiques techniques des exploitations agricoles (semis, précédents et travail du sol).....	33
Tableau 4 : Résumé des données collectées.....	40
Tableau 5 : Résumé des statistiques descriptives des paramètres chimiques du sol : moyenne, déviation standard (Std), variance (Var) et coefficient de variation (CV)	44
Tableau 6 : Résumé des composantes principales (ACP) pour les indicateurs du QuantiSlake Test	46
Tableau 7 : Tests du Chi ² appliqués aux paramètres racinaires : p-valeurs obtenues	48
Tableau 8 : Regroupement des différentes variétés génétiques de froment en fonction du diamètre racinaire moyen	49
Tableau 9 : Résultats du modèle linéaire reliant le diamètre racinaire moyen aux composantes principales (CP1, CP2) et au stade de développement Zadoks (données normalisées).	51
Tableau 10 : Comparaison des modèles linéaire et quadratique de la relation entre le stade Zadoks et le diamètre.....	52

1. Introduction

Depuis ses origines, l'agriculture joue un rôle fondamental dans le développement des sociétés humaines. En assurant la sécurité alimentaire, elle a permis la libération progressive de temps et de ressources, conditionnant ainsi l'émergence et la diversification des autres secteurs d'activité qui structurent notre environnement socio-économique.

L'agriculture a connu une évolution spectaculaire, notamment depuis les années 1950, avec une forte augmentation des rendements. Cependant, cette intensification s'est accompagnée d'effets environnementaux préoccupants, tels que le dérèglement climatique et la perturbation des cycles biogéochimiques. Aujourd'hui, l'agriculture figure parmi les principaux contributeurs à ces crises écologiques. Pourtant, des alternatives émergent, portées par une vision où l'agriculture ne serait plus un facteur de dégradation, mais un levier actif de régénération environnementale. Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique, en explorant des pistes de pratiques agricoles plus durables, en rupture avec l'agro-industrie conventionnelle.

Dans cette perspective, l'étude des systèmes racinaires constitue un axe de recherche intéressant. La sélection variétale s'est historiquement concentrée sur les parties aériennes des plantes, les racines jouent pourtant un rôle central dans l'acquisition de nutriment, l'accès à l'eau, la stabilité mécanique et les interactions symbiotiques avec les autres organismes du sol. Le système racinaire est également un indicateur sensible des conditions de cultures (pratiques agricoles), en particulier dans les systèmes à faible niveau d'intrants. Sa morphologie, sa distribution et sa plasticité sont influencées par une multitude de facteurs allant de la nature du sol aux interactions interspécifiques dans le cas des cultures associées.

Le blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum*) représente une des grandes cultures céréalières. En agriculture biologique, où les possibilités de fertilisation sont limitées, la structure racinaire devient un élément déterminant dans les performances de cultures. De plus, la diversification des pratiques agricoles, notamment via les associations culturales avec des légumineuses comme la féverole (*Vicia Faba*) suscitent un intérêt croissant. Ces associations sont supposées améliorer la disponibilité en azote via la fixation symbiotique, renforcer la couverture du sol et induire des complémentarités racinaires. Toutefois, les effets réels de ces associations sur les traits racinaires, spécifiquement en champ, dans des conditions de culture réelles, restent à ce jour assez peu documentés.

Le présent mémoire vise donc à améliorer les connaissances sur les caractéristiques racinaires du froment d'hiver en fonction de différents paramètres agronomiques tels que les facteurs édaphiques, génétiques et culturaux. L'ensemble des recherches a été réalisé en conditions réelles de terrain et la sélection des parcelles agricoles s'est faite au sein du réseau d'agriculteurs partenaires de la coopérative Farm For Good (FFG). Ce réseau, engagé dans une agriculture biologique de conservation, offre un terrain d'étude riche mais également très hétérogène en termes de précédents culturaux, de types de sols et de pratiques agricoles.

Plus précisément, ce travail poursuit les objectifs suivants :

- Évaluer l'effet du type de système culturale (monoculture vs association froment-féverole) sur les caractéristiques du système racinaire du blé
- Étudier la relation entre stade de développement et morphologie racinaire
- Identifier l'influence des paramètres pédologiques (structure, teneur en C/N, ph, ...)
- Analyser l'effet éventuel de la variété génétique du blé sur les caractéristiques mesurées
- Comparer les mesures de terrains aux données de FFG
- Enrichir la base de données sur les systèmes racinaires du blé du labo PEPA de l'UCLouvain

Pour répondre à ces objectifs, un ensemble d'analyses a été conduit sur différentes parcelles sélectionnées dans le réseau, en intégrant à la fois des mesures racinaires in situ, des analyses physico-chimiques des sols et des approches statistiques multivariées. Ce travail ambitionne également de dégager des pistes méthodologiques pour la conception de futurs dispositifs expérimentaux en agroécologie, tout en apportant un éclairage sur la complexité des interactions plante-sol en contexte biologique.

2. État de l'art

2.1. Contexte

2.1.1. Limites et problématiques des systèmes de productions agro-alimentaires

Les défis majeurs du 21^e siècle liés aux changements environnementaux anthropologiques tels que la modification du climat, la raréfaction des ressources naturelles et la destruction des écosystèmes peuvent tous être en partie reliés à l'agriculture moderne. Cette réalité alarmante pousse à une remise en question de nos systèmes de production (Fradgley et al., 2020). A l'heure actuelle, l'agriculture représente 24% des émissions totales de CO₂, occupe 37% de la surface émergée du globe, accapare deux tiers de la consommation d'eau humaine, dégrade et appauvrit les sols et est la principale responsable du dérèglement des cycles du phosphore et de l'azote entre autres (Harrison, P., 2002). Ces effets impactent l'environnement, mais également la durabilité même de l'agriculture qui n'est pas soutenable à long terme. En outre, l'agriculture est l'une des principales victimes des changements climatiques, des sécheresses, des événements climatiques extrêmes et des perturbations des saisons de culture. Ces changements impactent déjà la productivité et la résilience de nos systèmes de productions. En conséquence, ce secteur représente un acteur clé de la transition. L'évolution des pratiques et des méthodes de culture pourrait permettre d'inverser la tendance et donner à l'agriculture un rôle actif et positif dans la lutte contre les changements environnementaux.

Face à ces enjeux, la Commission européenne a fixé des objectifs ambitieux à l'horizon 2030 pour favoriser la transition. Ces objectifs prévoient notamment de convertir 25% des surfaces agricoles de l'Union européenne à l'agriculture biologique, de réduire de 50% l'usage de pesticides, de diminuer de moitié les pertes d'azote dans l'environnement et de réduire d'au moins 20% la consommation globale d'engrais azotés. Pour atteindre ces cibles dans de bonnes conditions, en limitant les pertes de rendement, les méthodes de productions et les pratiques agricoles doivent être remises en question (European Commission. Directorate General for Research and Innovation., 2023; Schneider et al., 2023).

2.1.2. La place du blé d'hiver

Historiquement, le blé (*Triticum spp.*) est l'une des premières plantes domestiquées par l'homme. Les premières traces de cultures remontent à plus de 10 000 ans. Elle est, à l'origine, cultivée dans le Croissant fertile du proche orient et s'étend progressivement à toutes les civilisations néolithiques du Moyen-Orient et de la Méditerranée. Son arrivée est toujours accompagnée par un développement démographique important. Le blé revêt, encore aujourd'hui, une importance culturelle et symbolique forte (Levy & Feldman, 2022).

Aujourd'hui le blé est la deuxième céréale la plus cultivée mondialement et représente environ 20% du total des apports caloriques dans l'alimentation humaine ainsi que 20% des apports protéiques (notamment le gluten) (Wuletaw Tadesse, 2019). Outre les glucides complexes qui

constituent l'essentiel du grain, le blé fournit également des quantités non négligeables de fibres et de micronutriments. C'est particulièrement le cas pour les grains de blé complet qui contiennent des vitamines du groupe B (principalement B1, B3 et B6) et des minéraux tels que le fer, le zinc, le phosphore et le magnésium (Shewry & Hey, 2015). Ces qualités nutritionnelles ainsi que l'excellent potentiel de conservation des grains expliquent en partie le rôle central que joue cette culture dans la sécurité alimentaire (Curtis, B.C. et al., 2002). Il est estimé qu'environ 80% de la production mondiale de blé est destinée à l'alimentation humaine (Yildiz, 2024).

Malgré son importance universelle, les chiffres avancés au niveau mondial cachent une fluctuation importante selon les régions. En Wallonie (Belgique), le blé tendre représente la céréale dominante en grande culture et occupe la surface céréalière la plus importante (18% de la surface agricole utile wallonne) (SPW ARNE, 2024). Cependant la grande majorité de cette production est valorisée hors circuit humain, seule une fraction de l'ordre de 10 à 15% est destinée à la consommation directe. Les 85% restants sont liés à l'alimentation animale ou à la production de bioéthanol (Sytra, 2021). Ce paradoxe s'explique par les exigences qualitatives élevées des filières de la panification auxquelles le blé régional répond rarement de façon constante. Ces exigences sont principalement liées aux critères technologiques standardisés de l'agro-industrie. Les blés ne répondant pas à ces attentes sont automatiquement déclassés en « blé fourrager » destinés à l'élevage. Paradoxalement, bien que la Wallonie soit une terre céréalière excédentaire, elle demeure dépendante d'importations extérieures pour couvrir ses besoins en farines panifiables (Sytra, 2021).

En termes de production, le blé est cultivé sur plus de 220 millions d'hectares à l'échelle du globe ; ce qui a représenté, en 2024, 797 millions de tonnes produites. Les principaux producteurs sont actuellement la Chine, l'Inde et la Russie. En Europe, la production de blé tendre atteint 125 millions de tonnes par an bien que les aléas climatiques soient responsables d'une baisse historique de 10% sur l'année 2024 (112 Mt) (Hannah Ritchie, 2024).

Les projections climatiques à l'horizon de la fin du 21^e siècle prédisent une évolution contrastée de la productivité des grandes cultures céréalières. Les rendements moyens du maïs, du riz et du sorgho sont estimés décroissants sous l'effet du réchauffement global, particulièrement dans les régions tropicales déjà chaudes. Le blé, en revanche, pourrait faire figure d'exception par sa capacité d'adaptation aux climats tempérés. Sous le scénario pessimiste d'émissions élevées (SSP5-8.5), les estimations convergent vers une hausse de 10% à 18% de la production de blé d'ici 2100 (Jägermeyr et al., 2021). Cette croissance s'explique par une extension géographique des zones cultivables vers les hautes latitudes. Il est cependant important de nuancer ces projections optimistes, basées sur l'augmentation des températures, avec les incertitudes de l'évolution des pratiques agricoles, des contraintes hydriques, de la disponibilité en eau et de l'augmentation des événements extrêmes. Ceux-ci conditionneront fortement la réalisation de ces gains potentiels (Skea J. et al., 2019).

A l'aube des défis du 21^e siècle, la culture du blé demeure plus que jamais d'une importance stratégique majeure dans la sécurité alimentaire mondiale. Le développement des connaissances sur cette culture est donc capital pour consolider la sécurité alimentaire mondiale future.

2.1.3. Les intrants chimiques dans l'agriculture

Un domaine dans lequel des changements peuvent être faits pour améliorer le système agricole est celui des apports en intrants chimiques. Leur production représente une part considérable des besoins en énergie avec une fraction de consommation énergétique de 50% pour les engrais azotés et 9% pour les pesticides par rapport à la consommation d'énergie totale liée à la production de froment (figure 1; Audsley, E. et al., 2009; Nowak B., 2024). Les pesticides sont à l'heure actuelle centraux dans nos systèmes de productions et, sans eux, les pertes de rendements estimés s'élèvent à 45% (Zhou et al., 2025). Cependant en plus de la consommation d'énergie, ils polluent le sol, l'eau et l'air, affectent les écosystèmes naturels, la survie de nombreuses espèces et représentent une menace pour la santé humaine (Zhou et al., 2025). En ce qui concerne spécifiquement les engrais azotés et phosphatés, les pertes dans l'environnement par lessivages et ruissèlement entraînent de nombreuses conséquences, notamment une réduction de la biodiversité, une diminution d'espèces locales aux bénéfices de quelques espèces très compétitives, mais plus globalement un remodelage négatif des services écosystémiques rendus par l'environnement (Guignard et al., 2017). Les services écosystémiques, au sens académique, désignent « les bénéfices multiples que les sociétés humaines retirent des écosystèmes » (Walter V Reid et al., 2005), et sont généralement classés en quatre grandes catégories : (1) les services d'approvisionnement, qui concernent les biens matériels produits par les écosystèmes (par ex. nourriture, eau douce, fibres) ; (2) les services de régulation, qui incluent les processus naturels maintenant la qualité de l'air, de l'eau, du sol et régulant le climat ou les maladies ; (3) les services culturels, englobant les valeurs récréatives, spirituelles et éducatives ; et (4) les services de soutien, qui rendent possible les autres services, tels que la formation des sols, le cycle des nutriments et la photosynthèse (Robert Costanza & Karin Limburg, s. d.). Dans le cadre agricole, les intrants chimiques peuvent perturber ces services, par exemple en altérant la pollinisation, la régulation des ravageurs ou le maintien de la fertilité des sols.

Les intrants chimiques représentent aujourd'hui un besoin inévitable au bon fonctionnement de nos systèmes agricoles, mais l'évolution des pratiques agricole pourra permettre de réduire cette dépendance et minimiser les dommages environnementaux qui y sont liés. Les pistes de solutions sont nombreuses et certaines pratiques bénéfiques se sont déjà largement répandues. Une amélioration intéressante du système est le passage de monoculture à des cultures associées.

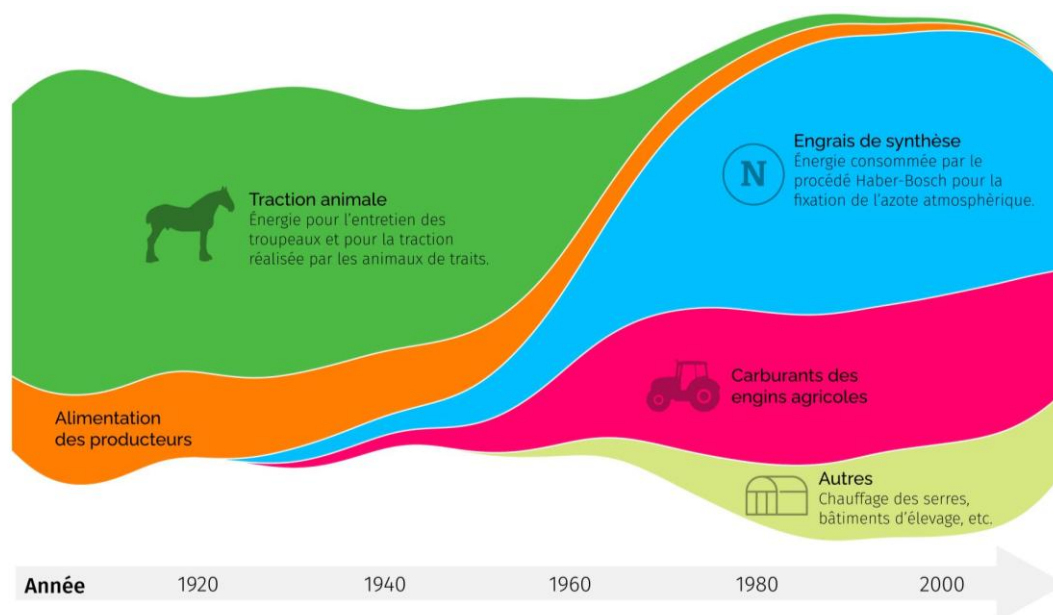


Figure 1 : l'évolution de l'énergie investie dans l'agriculture en France entre 1900 et 2013 (Nowak B., 2024)

2.2. Les cultures associées

Les cultures associées sont communément définies comme la culture d'au minimum deux espèces différentes sur une même parcelle simultanément. Les différentes cultures doivent, au moins pendant une partie de leur développement, se chevaucher (Hailu Gebru, 2015).

Les cultures associées permettent de contribuer directement à au moins deux objectifs proposés par la FAO dans son rapport « agriculture mondiale : horizon 2015/2030 » dont le but est de rendre l'agriculture plus durable. Ces deux objectifs consistent à améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais et à restaurer les terres dégradées (Harrison, P., 2002).

De nombreux facteurs rentrent en compte dans le choix d'association : l'architecture morphologique, la physiologie des cultivars, les habitudes de croissances, la durée de vie, les pratiques agricoles, les conditions climatiques, la longueur des saisons de cultures, les préférences locales et les demandes des agriculteurs pour ne citer que ceux-là (Yahuza, 2011).

La proximité spatiale et temporelle entre les espèces donne lieu à toute une série d'interactions positives et négatives. Ces pratiques permettent notamment d'augmenter la durée durant laquelle la parcelle est couverte et d'améliorer le leaf area index (LAI) maximisant ainsi la photosynthèse. Elles permettent également de protéger les sols en limitant l'érosion, elles améliorent la fertilité et l'utilisation de l'eau. Toute la complexité de ce type de cultures est de maximiser les effets de synergies positifs tout en réduisant aux maximums les effets négatifs (Hailu Gebru, 2015).

2.2.1. Interactions entre cultivars

Deux types d'interactions opposées ont donc lieu simultanément entre les espèces cultivées : la complémentarité (effet synergique positif) et la compétition (lutte pour la ressource). Comme expliqué juste au-dessus, il convient de maximiser la complémentarité. Trois cas généraux sont possibles : l'inhibition mutuelle, le mutualisme et la compensation. Ces termes font uniquement référence aux niveaux de production de chaque espèce. Pour simplifier la compréhension des trois situations, le cas de deux espèces cultivées ensemble est repris à partir de maintenant. L'inhibition mutuelle signifie que les deux espèces produisent chacune moins en cultures associées qu'en monocultures, en termes de production il n'y a donc aucun intérêt à les cultiver ensemble, c'est la situation la moins souhaitable. Le mutualisme, à l'opposé, est la situation dans laquelle les deux cultures produisent chacune plus qu'en monocultures, c'est la situation idéale. Enfin, le cas le plus commun, la compensation, fait référence à une situation où l'une des deux espèces produit plus qu'en monoculture, mais l'autre moins. Pour maximiser la complémentarité, l'objectif est de sélectionner des espèces avec des caractéristiques morphologiques et physiologiques différentes. En choisissant des cultivars aux besoins complémentaires, on limite la compétition (Hailu Gebru, 2015).

De nombreux paramètres rentrent en compte dans le choix des espèces à associer. Dans le cadre de ce travail de recherche, le focus est mis sur les avantages de production et de services écosystémiques. Les problématiques liées aux coûts de production et à la complexité technique de l'association ne sont pas spécifiquement étudiées, mais, ils jouent cependant un rôle important dans les choix cultureux.

Deux complémentarités différentes peuvent être étudiées, la complémentarité temporelle et la complémentarité spatiale. La première consiste à avoir des stades de développement qui diffèrent dans le temps (généralement minimum 30 à 40 jours d'écart entre les différents stades de maturité), soit en décalant les dates de semis des espèces, soit par des différences morphologiques intrinsèques aux cultivars. Cette forme de complémentarité permet de séparer dans le temps les moments durant lesquelles les ressources sont critiques pour le rendement respectif de chaque espèce. La deuxième forme de complémentarité se concentre sur les différences d'occupation de l'espace des différents organes racinaires et foliaires. Par exemple avec des racines qui explorent des horizons de sols différents ou des feuillages avec des besoins lumineux différents. L'objectif est de maximiser l'efficacité avec laquelle les ressources sont utilisées (Hailu Gebru, 2015).

2.2.2. Indicateurs des mécanismes de complémentarité et de compétition

Plusieurs indicateurs permettent de mesurer l'efficacité des différents systèmes de cultures intercalaires. Ils permettent de comparer différentes associations et d'évaluer leurs performances combinées en termes de rendement. Dans le cadre de ce travail deux d'entre eux sont présentés, le Land Equivalent Ratio (LER) et le ratio de compétitivité (CR) (Hailu Gebru, 2015). L'indicateur plus commun est le LER. Une valeur plus petite que 1 indique une production plus faible (à surface équivalente) pour la culture en association. Un LER plus grand

que 1 traduit la situation inverse. Les équations 2.1, 2.2 et 2.3 permettent de calculer le LER a partir des rendements.

$$LER\ total = LERa + LERb \quad (2.1)$$

$$LERa = \frac{\text{Rendement de l'espèce "a" en intercalaire (Yab)}}{\text{Rendement de l'espèce "a" en monoculture (Yaa)}} \quad (2.2)$$

$$LERb = \frac{\text{Rendement de l'espèce "b" en intercalaire (Yba)}}{\text{Rendement de l'espèce "b" en monoculture (Ybb)}} \quad (2.3)$$

Cet indicateur communique une information générale sur les performances du système. LERa et LERb sont également intéressants, car ils quantifient la variation de production individuelle.

Le CR, quant à lui, donne l'information du degré de dominance compétitive entre les espèces présentes ; en d'autres termes, quel cultivar domine l'autre dans l'accès aux ressources. Il est calculé séparément pour chaque espèce de la culture associée via les équations 2.4 et 2.5

$$CRa = \frac{LERa}{LERb} * \frac{Zba}{Zab} \quad (2.4)$$

$$CRb = \frac{LERb}{LERa} * \frac{Zab}{Zba} \quad (2.5)$$

Avec :

Zab : fraction d'occupation de la culture a par rapport à la surface totale

Zba : fraction d'occupation de la culture b par rapport à la surface totale

Dans le cas de figure où la culture a domine la culture b, le CRa sera plus grand que 1 alors que le CRb sera plus petit que 1.

2.2.3. Bénéfices liés aux cultures associées

Les synergies liées à l'association de cultures sont nombreuses et leurs impacts divers. Dans cette section, les éléments les plus importants et les plus connus sont présentés.

Un premier bénéfice est l'utilisation plus efficace et complète des ressources disponibles. Des structures foliaires et des besoins lumineux différents pour chaque cultivar peuvent permettre d'améliorer le LAI et la quantité totale de rayonnement solaire intercepté (jusqu'à 40% d'interception en plus). En termes de nutriments, des systèmes racinaires aux caractéristiques complémentaires permettent une meilleure exploration du sol. La quantité totale des différents nutriments est largement améliorée. Les études de Morris et Garritty montrent que

la quantité de phosphore et de potassium absorbée en plus peut atteindre respectivement 43% et 35% (Hailu Gebru, 2015; Morris & Garrity, 1993). L'azote est également mieux valorisé : les pertes dans l'environnement diminuent grâce à la présence accrue de racines qui, en plus d'augmenter la capacité de prélèvement, améliorent la structure générale du sol avec tous les bénéfices qui y sont liés.

L'amélioration de la couverture végétale permet également de limiter les pertes en eau par évaporation et de lutter contre les adventices qui se retrouvent dans un milieu plus compétitif. Les insectes et les maladies font également moins de dégâts et, dans les pires cas où tout une espèce est décimé, au moins l'une des deux cultures est encore valorisable.

Un autre mécanisme encore assez peu étudié et compris, mais potentiellement bénéfique est lié à l'allopathie. L'allopathie désigne un certain type d'interaction biochimique entre la plante et son environnement. Des composés libérés dans l'environnement par le système racinaire inhibent ou stimulent la germination, la croissance ou le développement d'autres organismes voisins (généralement des végétaux). Ce type d'interactions pourrait également permettre de lutter contre les adventices (Hailu Gebru, 2015).

Enfin, un autre bénéfice est lié à la modification des microclimats. En fonction des espèces, la vitesse du vent, l'intensité lumineuse et la température de l'air peuvent être modifiées.

2.2.4. Points négatifs

En termes de désavantages, il est souvent relevé que le rendement de la culture principale diminue pour permettre à la culture associée de se développer. Cette réduction peut entraîner des pertes économiques si le prix des cultures est fortement différent REF.

L'association de cultures représente également une complexification du système qui entraîne une quantité de travail plus importante et demande des investissements économiques supplémentaires REF.

Enfin, un autre désavantage, qui peut s'avérer très impactant, est lié à l'augmentation de l'humidité par la modification du microclimat sur les parcelles. Cet effet peut favoriser l'apparition et la propagation de pathogènes, spécialement ceux de type fongique. L'effet est également présent en monoculture densément semée, mais avec des systèmes foliaires complémentaires, la rétention d'humidité est généralement plus importante.

2.2.5. Intérêt générale des cultures intercalaires de type céréale/légumineuse

Un des exemples les plus anciens de culture associée, plus répandu, est l'association de céréales et de légumineuses. Les légumineuses ayant la particularité physiologique de pouvoir fixer l'azote atmosphérique, elles sont particulièrement adaptées en culture intercalaire avec des espèces très demandeuses en azote. Ce mécanisme se base sur une symbiose : des bactéries spécialisées (rhizobiums) s'associent aux systèmes racinaires des légumineuses. Celles-ci transforment l' N_2 en NH_4^+ directement assimilable par la plante qui partage en échange des sucres nécessaires à leurs survies (Hailu Gebru, 2015).

Une partie de cet azote est relibéré par la légumineuse et réutilisé par la céréale associée. Ce transfert a lieu par 3 voies distinctes. Premièrement, par dégradations de racines mortes, c'est le mécanisme de transfert le plus important. Cependant il faut attendre que la légumineuse se développe suffisamment pour que ce phénomène prenne de l'ampleur. Cette voie bénéficie généralement plus aux cultures suivantes qu'à la culture associée (Chu et al., 2004; Shao et al., 2020). Le deuxième type de transfert se fait par contacts racinaires directs ou très proches. Des essais en pots, avec et sans barrière en mailles ont démontré un passage de 2mg à 6mg transférés entre plantes de blé et de fèverole (Xiao et al., 2004). Enfin la troisième voie de transfert se fait par des réseaux mycorhiziens à arbuscules (CMA) connectant les différentes espèces. Les études sur le sujet sont relativement rares. Il est difficile d'isoler spécifiquement cette voie de transfert. Dans un système pois-triticales, ce réseau joue un rôle modéré avec 10% des transferts de nutriments passant par cette voie (Hupe et al., 2021).

Ces transferts d'azote vers la céréale entraînent généralement une allocation plus importante des nutriments dans les parties récoltables des cultures. La mesure de ces changements se fait généralement via le grain protéine content (GPC) ou amino acide content et essential amino acide content (AAC et EAAC) (Hailu Gebru, 2015).

En plus de ces transferts d'azote, le phosphore est également partagé, majoritairement par les CMA (Johansen & Jensen, 1996).

L'amélioration de la fertilité est également accentuée par le degré de complémentarité racinaire entre les céréales et les légumineuses. Les légumineuses explorent généralement des horizons plus profonds et elles recyclent les nutriments lixiviés en surface.

Il est important de noter que, malgré l'apport de fertilisants par les légumineuses, cet effet n'est généralement pas suffisant pour assurer le maintien d'une fertilité suffisante. Un apport extérieur au système reste nécessaire bien que les quantités requises soient moindres et que la fraction de l'apport réellement utilisé par les cultures est maximisée.

Les associations de type céréale-légumineuse sont nombreuses et diverses. Pour le riz on peut citer le soja REF, les lentilles REF le lupin REF ou encore les pois chiches REF. Le maïs, quant à lui, est souvent associé au haricot commun REF, au soja REF ou au pois d'Angole REF. Enfin, le blé est souvent associé à la fèverole, aux pois protéagineux, au trèfle (blanc, violet ou hybride) et à la luzerne (Schneider et al., 2023). Comme expliqué ci-dessus, le choix d'association dépend de nombreux facteurs, et chaque combinaison comprend des avantages et des points faibles.

Dans le cadre de ce projet de recherche, l'association spécifique étudiée est le blé avec la fèverole. Les sections suivantes visent à présenter les caractéristiques générales de cette culture associée et les interactions entre ces deux cultivars.

2.3. Le froment d'hiver

2.3.1. Caractéristiques générales

Le terme « blé » désigne en réalité différentes espèces de graminées, toutes associées au genre *Triticum*. Les espèces principalement cultivées de nos jours sont le blé tendre d'hiver ou de printemps (*Triticum aestivum* L.), le blé dur (*Triticum durum* Desf.) et dans une moindre mesure l'épeautre (*Triticum spelta* L.). Le blé dur et le blé tendre se distinguent par la morphologie et la composition de leurs grains, par leurs usages ainsi que par leurs zones de cultures. Le blé dur (tétraploïde, 28 chromosomes) présente des grains vitreux, durs et généralement plus riches en protéines et en pigments caroténoïdes. Il est particulièrement adapté à la fabrication des pâtes, couscous, boulgours et autres produits à base de semoule. Il est cultivé principalement sous climat sec et chaud (zones méditerranéennes). Le blé dur ne représente qu'une fraction minoritaire de la production mondiale de blé (entre 5% et 8%). À l'inverse, le blé tendre (hexaploïde, 42 chromosomes) produit des grains plus farineux avec un gluten moins tenace bien que certaines variétés dites « de force » à haute teneur protéique existent aussi et sont principalement utilisées pour la panification. Le blé tendre est de loin le plus cultivé, occupant les régions aux climats tempérés. Ces grains sont utilisés pour la production de farine panifiable, pour l'alimentation animale et pour des usages industriels (amidons, bioéthanol,) (Schneider et al., 2023).

Une deuxième séparation peut être faite au sein d'une même espèce entre blé d'hiver et blé de printemps. Cette distinction vient d'un besoin en vernalisation pour le blé d'hiver, non nécessaire pour le blé de printemps, pour initier la phase reproductive. Semé dès l'automne, le blé d'hiver a un cycle de croissance plus long, ce qui lui permet de développer plus de talles et donc de bénéficier d'un rendement potentiel plus important.

Dans le cadre de ce mémoire, c'est le froment d'hiver ou blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) qui est étudié, un blé panifiable, hexaploïde, semé à l'automne et requérant une vernalisation hivernale. Les classifications ci-dessus permettent de situer précisément la plante d'intérêt principale de ce mémoire et d'éviter toute confusion avec d'autres types de blé.

Dans les paragraphes suivants, les différentes variétés de ce blé d'hiver, ses caractéristiques physiologiques principales ainsi que ses différents stades de développement seront brièvement détaillées.

2.3.2. Variétés et aptitude à la panification

Comme expliqué dans la mise en contexte, ce mémoire s'inscrit dans l'étude des systèmes de culture du froment d'hiver en agriculture biologique en Wallonie.

Il existe différentes catégories de variétés de froment avec des qualités technologiques de panification bien distinctes (Tableau 1). Dans cette étude, seuls des blés de la catégorie Q1A BIO (panifiable premium améliorant belge) et Q1 BIO (panifiable premium belge) ont été étudiés. Les variétés spécifiques sont détaillées dans le tableau 3. À titre de comparaison, ces

deux classifications sont respectivement comparables aux catégories VRM et BPMF en France et aux qualités A et B en Allemagne. Comme montré en Annexe 1, la sélection de variétés est toujours un compromis entre quantité et qualité de protéines par rapport au rendement à l’hectare.

Tableau 1 : Catégorie de qualité technologique des froments spécifiques à l'AB en Wallonie - 2025(Godin B., 2023)

Q1A BIO	Q1 BIO	Q2 BIO	Q3 BIO	Q4 BIO
Panifiable premium améliorant belge	Panifiable premium belge	Panifiable Supérieur belge (et amidonnerie)	Amidonnerie belge	Basique belge
Adamus	Christoph	Camillus	Emotion	Chevignon
Alessio	Enegro	Chaussy	Geny	Gergovie
Arameus	Montalbano	Cubitus	Glaz	Gwenn
Arminius	Moschus	KWS Emerick	Glénan	SU Ecusson
Grannosos	Mossette	Phildor	KWS Corole	Winner
Tillexus	Renan	RGT Farneo	KWS Eternel	
Togano	Wital	SY Revolution	LD Cape	
		Wendelin	LG Keramik	
			SU Tarrafal	

2.3.3. Caractéristiques physiologiques principales

Le froment possède un système racinaire de type fasciculé, c’est-à-dire qu’il n’y a pas de racine pivotante dominante. De nombreuses racines primaires ou racines séminales se développent dès le début de la germination suivi de racines adventives ou nodales développées à partir des nœuds de la tige. La plante peut posséder jusqu’à 30 racines primaires. À partir de ces axes primaires se développent des racines secondaires puis tertiaires. Ce réseau très ramifié, dense et fin donne au blé une capacité d’exploration très performante. Une illustration de la densité du système racinaire par rapport aux partie aérienne en début de tallage ainsi qu’une vue schématiques des différentes parties est présenté dans la figure 2 ci-dessous. Lors des premières phases de développement, le blé investit une part importante de sa biomasse vers ses racines et colonise le sol de manière très compétitive. Généralement, 70 à 80% de ses racines se situent dans les premiers 20 à 40 cm de sol, bien que ces racines les plus profondes descendent jusqu’à 2 mètres de profondeur (Lobet, 2024). Cet enracinement profond lui permet d’aller puiser l’eau dans des couches beaucoup plus profondes en cas de sécheresse. Le blé possède également de nombreuses racines latérales et poils absorbants. Ceux-ci lui confèrent une longueur

racinaire importante par unité de sol et donc une capacité d'absorption spécialement importante.

En ce qui concerne les organes foliaires, le blé possède des feuilles fines, allongées et à nervures parallèles. De nombreuses talles sont produites au cours de son développement aboutissant à une couverture dense et stratifiée. Chaque feuille a une durée de vie limitée et une sénescence programmée, cette sénescence progresse du bas vers le haut de la plante.

Le blé est donc une plante à croissance déterminée ; cette caractéristique permet de mesurer avec une grande précision le stade de développement et de comparer facilement les cultures entre elles, indépendamment du contexte agricole. Dans l'optique de standardiser les mesures du stade de développement, l'échelle de Zadoks est l'outil le plus communément utilisé (Zadoks et al., 1974).

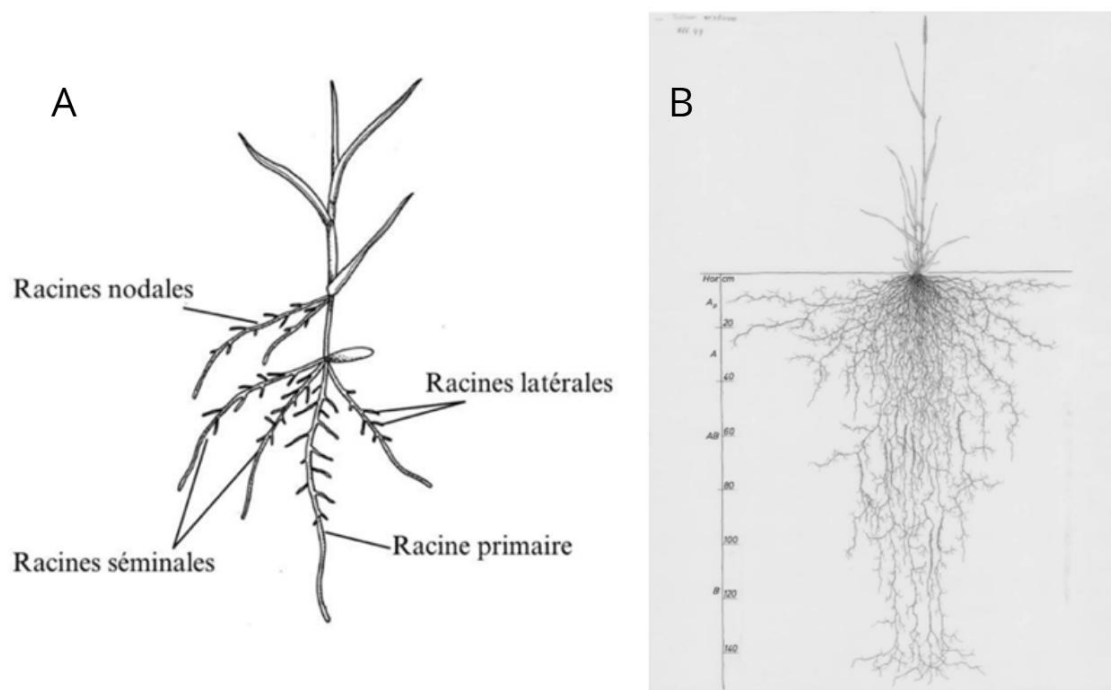


Figure 2 : Représentation schématique (A ; G. Lobet, 2024) et illustration à la plume (B ; (Lichtenegger, E., 2009a)) de *Triticum aestivum*

2.3.4. L'échelle de Zadoks : repère phénologique international

Pour décrire précisément les stades de développement du blé, l'échelle de Zadoks est généralement utilisée. Cette échelle codifie une centaine d'étapes du cycle de la plante à l'aide d'un code à 2 chiffres allant de 00 (graine sèche) à 99 (fin de cycle). Chaque phase est divisée en sous-stade plus fin en fonction de la formation des talles et des différentes étapes de développements (Zadoks et al., 1974). Cette échelle permet d'identifier avec précision le stade de développement et de comparer différentes plantes dont les dates de semis, les vitesses de croissance et le contexte pédoclimatique diffèrent. Cet outil s'avère donc très précieux aux

expérimentations culturales, mais également pour adapter les interventions agronomiques telles que l'apport de fertilisation azotée ou des traitements phytosanitaires.

2.3.5. Cycle de développement

Le cycle de vie du blé tendre s'étale sur une dizaine de mois et peut être séparé en une phase végétative (de la germination à la transition florale) et une phase reproductive (de la montaison jusqu'à la maturation). Le rendement résulte de plusieurs composants : le nombre d'épis par plante, le nombre de grains par épis et le poids de chaque grain. Chaque étape de développement joue un rôle sur une ou plusieurs de ces composantes et est influencée par les conditions extérieures (principalement lumière, eau, nutriments et température) (Curtis, B.C. et al., 2002; G. Lobet, 2024).

La phase végétative commence avec la dormance des grains. Cette dormance, naturelle, se dissipe pendant l'entreposage (après-maturation) et permet d'éviter une germination sur pied avant la récolte (Lobet, 2024). L'étape suivante est la germination et la levée. Cette phase est initiée à une température du sol supérieur à 0°C avec un optimum à 15-20°C. La graine émet une racine embryonnaire et des racines séminales secondaires (stade 05-06). Au stade 09, le coléoptile (gaine protectrice de la jeune pousse) perce la surface et initie la levée. Durant cette phase, l'eau du sol est le facteur le plus important ainsi qu'une aération adéquate pour assurer un apport suffisant en oxygène aux jeunes tissus. Un apport suffisant en phosphore et en azote permet également un développement accéléré des racines (G. Lobet, 2024). Ensuite vient le tallage, phase durant laquelle des tiges secondaires (talles) bourgeonnent à partir de la tige principale. Ce mécanisme conditionne le nombre d'épis final par plante. Chaque talle développe des racines adventives améliorant la capacité de prélèvement du plant (G. Lobet, 2024). Enfin, la transition florale signe la fin de la phase végétative. Le blé accomplit sa vernalisation (typiquement 3-8 semaines en dessous de 5-10°C) et transitionne d'une croissance de feuillus à la formation d'une inflorescence. Cette transformation n'est pas visible immédiatement, mais est déterminante pour le rendement, car elle influence le nombre d'ébauches d'épillets (généralement entre 15 et 20) par épis (fonction de la génétique et des conditions environnementales). Après cette phase, plus aucune nouvelle talle n'est initiée, la plante consacre ces méristèmes à l'élaboration d'épis (Lobet, 2024).

La phase reproductive démarre avec la montaison (élongation de la tige). Les entrenœuds s'allongent et permettent à l'épi de s'élever, protégés à l'intérieur de la gaine foliaire. Durant cette phase, les besoins en eau et en nutriments augmentent pour pouvoir soutenir cette croissance rapide. La moitié de la biomasse générée au cours de la vie de la plante est produite durant cette phase. Les nouvelles feuilles produites contribuent énormément à la photosynthèse. C'est également durant la montaison que les talles, émises tardivement ou insuffisamment développées par manque de ressources, sont avortées (Lobet, 2024). Ensuite vient l'épiaison et la floraison. Ces phases correspondent respectivement à la sortie de l'inflorescence hors de la gaine (stade 59) de la dernière feuille et à l'ouverture des fleurs de chaque épillet permettant aux étamines de libérer leurs pollens (Lobet, 2024). La fécondation marque la fin de la floraison. Cette période est également cruciale pour le rendement, elle

détermine le nombre de graines par épis via le succès de pollinisation et la survie des ovules fécondés (Lobet, 2024). Enfin, le développement se termine par le remplissage du grain et la maturation. Le remplissage dure plusieurs semaines au cours desquelles le grain passe du stade laiteux (vert et riche en eau et en sucre) au stade pâteux (accumulation d'amidon et diminution de la teneur en eau). Cette phase détermine le poids des grains. Un apport en eau est essentiel jusqu'au stade laiteux et tout l'azote disponible (notamment dans les autres tissus de la plante par translocation) est utilisé pour synthétiser les protéines du grain. Durant cette phase, des températures modérées permettent de prolonger la durée de remplissage alors qu'un coup de chaud accélère la maturation et réduit le poids final des grains. Enfin, durant la maturation, les grains atteignent le stade final, le grain dur (stade 87-89) puis entament leur dessiccation. Les tissus végétaux entrent en sénescence et les grains sèchent (stade 91-92; Curtis, B.C. et al., 2002; G. Lobet, 2024).

2.4. La féverole

2.4.1. Valeur nutritionnelle, production et usages

Comme la plupart des protéagineux, la féverole se caractérise par une richesse protéique importante (entre 28 et 30% de la matière sèche). Elle produit également de l'amidon et un peu de fibre, ce qui lui donne une valeur nutritionnelle assez similaire à une céréale.

Ces avantages sont contrebalancés par la présence de facteurs antinutritionnels. Les tanins ainsi que la vicine et la convicine (2 composés toxiques) peuvent être responsables de favisme (forme d'anémie) s'ils sont utilisés en alimentation animale.

Pour répondre à ces problématiques, la sélection végétale a permis l'apparition d'une variété à fleurs blanche, sans tanins et à faible teneur vicine-convicine, particulièrement adaptée aux monogastriques. Un traitement mécanique de décorticage permet d'améliorer encore la valeur nutritive en éliminant les tanins présents dans l'enveloppe. A noter que les fèves d'hiver (avec besoin de vernalisation) sont toutes à fleurs colorées (Figure 3) contrairement aux fèves de printemps « zéro tanin » (Cartryse, C. et al., 2024; Fédération Wallonne de l'Agriculture, 2022).

La plante suscite un intérêt croissant dans le cadre de la recherche d'autonomie protéique dans l'alimentation animale. Elle représente une culture intéressante dans la recherche d'alternatives aux protéines de soja importées. En Belgique la production reste modeste et oscille entre 3000 et 5600 tonnes par an entre 2016 et 2022 malgré une demande nationale bien supérieure (Cartryse, C. et al., 2024). L'usage fourrager domine largement la production, mais la consommation dans l'alimentation humaine sous forme fraîche (fèves de marais) dans le contexte de l'évolution des modes de consommation (végétarisme et protéines locales) est en augmentation. Enfin, la féverole est également utilisée en culture associée ou intercalaire, valorisée dans l'alimentation ou laissée en champs pour le renouvellement de la fertilité.

2.4.2. Caractéristiques physiologiques principales

La fève (Vicia faba) est une légumineuse annuelle d'environ 1 mètre de haut à tiges creuses, elle produit des gousses de 10 cm renfermant entre 2 à 8 graines.

Elle possède un système racinaire pivotant, la racine principale est épaisse (peut dépasser 1 cm de diamètre). À partir de cet axe, des racines secondaires et tertiaires se développent. Plus rapidement que le blé, la racine peut atteindre 50 à 80 cm de profondeur, voire davantage en fonction des conditions agronomiques (I. Lartigot, 2024). Cependant, de manière générale, la fève est considérée comme une espèce à enracinement superficielle, elle explore majoritairement les 30 à 40 premiers cm de sol. Au-delà de 80 cm de profondeur, la densité en cheveux racinaires diminue fortement ; ce qui la rend plus sensible aux sécheresses en surface. Son axe pivotant à l'avantage de créer les bioturbations (fissures) qui améliore l'aération du sol et apporte des bénéfices à long terme. Un autre trait majeur des systèmes racinaires de fève, tout comme les autres légumineuses, est la présence de nodules conférant à la plante une certaine autonomie en ce qui concerne l'azote. Il est important de noter que dans les premières phases de développement, la fève consomme de l'azote sans en relâcher dans le sol. C'est seulement une fois ses nodules développés et actifs qu'elle peut commencer à capter et partager de l'azote atmosphérique. Plus les premières phases de développement sont rapides, plus vite, cet effet se mettra en place.

En ce qui concerne ses feuilles, elles sont composées, paripennées et portées sur des tiges érigées, creuses et non ramifiées à la base, avec une croissance généralement indéterminée. Les feuilles sont larges avec une orientation horizontale lui permettant une capture lumineuse efficace au-dessus du couvert (Streit, 2019 ; Figure 3).

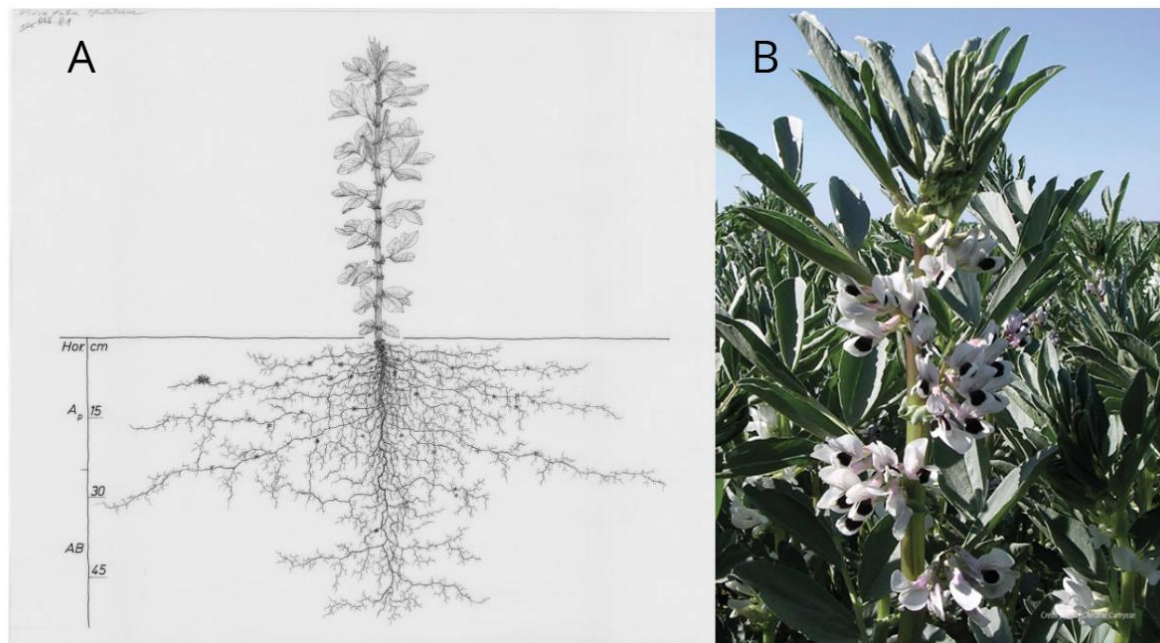


Figure 3 : Illustration à la plume Vicia faba (A ; Lichtenegger, E., 2009b) et fève en fleur (B ; CARTRYSSSE C. et al., 2024)

2.4.3. Cycle de développement

La fèverole est une espèce à jours longs ; l'induction florale est déclenchée par une photopériode supérieure à 14 heures. Avant ce seuil, la plante reste à un stade végétatif. Cette exigence entraîne, sous nos latitudes, une floraison tardive, entre mai et juin. Le cycle total de développement s'étale sur une durée de 110 à 130 jours en conditions climatiques tempérées ; ce qui en fait une culture relativement longue. On distingue 4 phases de développement, (1) la germination et la levée, (2) la phase végétative suivie de (3) la floraison et enfin (4) la phase de fructification. Chacune de ces étapes s'accompagne de dynamiques spécifiques concernant le développement racinaire et la nodulation (I. Lartigot, 2024).

La germination et la levée se déroulent en une dizaine de jours. La plantule émerge, portant encore les deux cotylédons en dessous du sol (germination hypogée) tandis que la racine pivotante se développe vers le bas. Dès les premiers jours de germination, la jeune racine rentre en contact avec des bactéries de type *Rhizobium*, entraînant le début de la formation de nodosités. Celles-ci sont minuscules, mais deviennent visibles en 2-3 semaines. Dès le stade 2-3 feuilles, la nodulation est en place et se poursuivra durant toute la phase végétative (Cartrysse, C. et al., 2024).

Dans la phase de croissance végétative active, la plante émet successivement des feuilles pennées. Les variétés d'hiver dépassent 1m de hauteur à maturité. Parallèlement, la racine pivotante s'enfonce rapidement et de nombreuses racines latérales colonisent les 60 premiers cm de sol (bien que la majorité se situe dans les 20 premiers cm). Une structure de sol meuble dans les 20 premiers cm favorise l'installation de nodosités (Cartrysse, C. et al., 2024).

Dès que la photopériode le permet, la floraison est initiée. Les fleurs se développent d'abord en grappes au niveau de l'aisselle des feuilles basales puis progressent vers le haut de la tige. La plante est généralement autogame partielle. La période de colonisation s'étale sur plusieurs semaines, tant que les conditions sont favorables. Ce caractère indéterminé de développement permet de compenser des accidents (floraison tardive supplémentaire si des fleurs précoces sont amenées à avorter). Durant cette période qui peut durer plus d'un mois, la fèverole est particulièrement sensible au stress hydrique et aux fortes températures. Au niveau racinaire il est intéressant de noter que la formation de nouveaux nodules s'arrête généralement avec la floraison. En fin de cycle, avec l'assèchement du sol, l'activité de fixation de l'azote diminue progressivement (Cartrysse, C. et al., 2024).

Le cycle se poursuit avec la fructification. Chaque fleur fécondée donne naissance à une gousse dans laquelle les grains se remplissent de juin à août. Les besoins en eau restent importants et un déficit limite le remplissage et le rendement. La maturation intervient une fois que les grains ont atteint leur taille maximale. La plante jaunit et dessèche et le taux d'humidité des grains diminue progressivement jusqu'à passer sous la barre des 15% (Cartrysse, C. et al., 2024).

Son cycle relativement long nécessite un apport soutenu en eau, mais permet une restitution d'azote importante pour la culture suivante.

La recherche agronomique variétale actuelle s'attache à sélectionner des variétés plus robustes, tolérant des étés plus secs, en vue de fiabiliser cette culture (I. Lartigot, 2024).

2.5. Effets synergiques de culture associée froment d'hiver et fèverole

Les différences marquantes dans la physiologie des deux espèces mènent à des synergies spécifiques intéressantes. Premièrement, l'exploration du sol se fait à des profondeurs et des densités différentes. Les études mixtes ont montré que les deux espèces, en présence l'une de l'autre, ont tendance à développer des racines dans des strates plus profondes, indiquant une modification de l'occupation verticale en réponse à l'association. Cette redistribution est spécifiquement marquée pour le blé dont le profilé racinaire est significativement plus profond. Cet effet permet de minimiser la concurrence, de mieux valoriser les nutriments et de tolérer le stress hydrique tant qu'il reste modéré. De plus, la différenciation physiologique limite la redondance. Le blé capte préférentiellement le nitrate minéral alors que la fèverole, moins dépendante de l'azote du sol, mobilise d'autres éléments (P, K) qui sont ensuite partagés avec le blé. Ces bénéfices sont particulièrement marqués dans les contextes de ressources limitées et de fertilisation faible.

La complémentarité dans l'acquisition de l'azote a déjà été expliquée plus haut pour la légumineuse et les mécanismes spécifiques de la fèverole sont similaires, ces mécanismes ne sont donc pas répétés ici.

De manière générale, la dominance au niveau racinaire est toujours portée par le froment, ses racines plus fines et sa capacité d'exploration plus importante lui accordent un accès privilégié. Cette compétition n'étant pas encore trop forte dans les premiers stades de développement, la fèverole a le temps de se développer suffisamment que pour former ses nodules et continuer sa croissance malgré sa place de dominée.

Au niveau aérien, les feuillages sont également complémentaires si les densités de chaque espèce restent optimales (au-delà de 30 graines de fèverole par m² l'ombrage pour le blé devient important). Le froment grâce à sa capacité d'élongation de ses entrenœuds peut ajuster sa hauteur pour ne pas se retrouver étouffé par la fèverole qui profite, quant à elle, de ses grandes feuilles horizontales pour intercepter la fraction des rayons qui passe jusqu'à ses étages. Il en résulte un indice de surface foliaire (LAI) plus important qu'en monoculture et une meilleure efficacité d'utilisation de la radiation (RUE) (Streit, 2019).

2.6. Impacts des pratiques agricoles

2.6.1. Fertilisation azotée

La question de la quantité d'azote optimale est complexe et dépendante de différentes conditions de culture telle que le contexte pédologique et climatique. Il est difficile de donner une réponse claire et définitive en kg par ha. De plus, les différentes études sur le sujet utilisent des méthodes de comparaisons différentes et les résultats divergent. Une première approche intéressante est de réfléchir en termes de LER et fertilizer N equivalent ratio (FNER). Une méta-analyse globale (Y. C. Liu et al., s. d.) reprenant 136 expériences indépendantes indique que, en moyenne, le LER et le FNER de cultures associées froment/fèverole sont respectivement de

1,23 et 1,15 ce qui signifie que la culture intercalaire permet en moyenne d'économiser 13% de fertilisants azotés et 19% de surface agricole pour un même rendement. Il est donc possible, sur base de cette diminution moyenne, de calculer la diminution d'engrais optimale pour passer la monoculture à la culture intercalaire pour le froment. En termes de kg par ha, la valeur de 45 kg par ha ressort comme une moyenne raisonnée permettant d'améliorer les rendements tout en favorisant une agriculture durable (Zhang et al., 2024).

Il est important de noter que, si par optimisation on entend uniquement le rendement de production brute sans tenir compte du FNER, des apports d'engrais azotés en plus grande quantité qu'en monoculture permettent d'avoir le LER élevé. Cependant, cette augmentation est également marquée par une diminution importante du FNER traduisant des pertes importantes d'azote dans le système avec tous les dommages environnementaux qui y sont liés.

En ce qui concerne le moment où la fertilisation azotée a lieu, il est très important que la fèverole ait accès facilement à de l'azote dans les premières phases de développement. Cet accès lui permet de se développer facilement et de pouvoir par la suite soutenir le froment en partage des nutriments. Cependant s'il y a trop d'azote, la fèverole limitera le développement de nodules et donc le captage d'azote atmosphérique. L'idéale est que la fèverole ait un accès suffisant dans ses premiers stades de développement puis que les racines du froment, plus compétitives, prennent le dessus sur l'acquisition de ressource forçant la fèverole, à développer des nodules. Elle sera capable de le faire rapidement, car sa croissance aura suffisamment avancé.

2.6.2. Semis simultanés ou décalés

Le choix d'un semis simultané ou décalé peut exercer une influence importante sur la performance du système. Un semi-décalé permet de réduire la compétition, mais peut également réduire la période de cocroissance et donc les développements de contacts entre les 2 espèces. De manière générale les semis sont simultanés, c'est une méthode plus pratique et efficace et les études expérimentales aboutissent généralement à de meilleurs rendements avec une production de 589 g/m² contre 490 et 422 g/m² en semi-décalé de 23 et 37 jours plus tard pour la fèverole (Yahuza, 2012). Semé la fèverole avant le blé pourrait sembler intéressant pour lui laisser le temps de développer ses nodules avant que le blé ne se développe et domine la compétition pour les ressources (Yu, 2016). La seule étude trouvée sur le sujet, réalisée dans le Centre-Val de Loire portant sur les taux protéiques dans le froment produit, ne détecte aucun effet remarquable. Les mécanismes de ce développement précoce sont encore mal comprises à ce jour et des études approfondies semblent nécessaires sur le sujet (Chevalier, B. & Bersonnet C., 2015). Généralement, il est conseillé de pratiquer le semi-simultané.

2.6.3. Organisation spatiale

En termes d'agencement de cultures, les trois organisations spatiales les plus communes sont (1) le semi en lignes alternées, (2) l'interculturel en bandes plus larges et (3) le mélange intégral.

Les recherches sur le semi en lignes alternées rapportent un LER de 1,1 à 1,3, ce qui représente donc un gain de productivité de 10 à 30%. Cependant, dans le cas où l'objectif principal est la culture de blé, cette organisation est peu adéquate et mène généralement à une diminution des rendements de froment, aux alentours de 10% (Agegnehu et al., 2008; Bulson et al., 1997; Yahuza, 2011). En ce qui concerne l'agencement en bandes, l'hétérogénéité est créée à plus grande échelle, seul les lignes de bordures sont en contacts inter espèces. Généralement plus les lignes sont larges, plus les bénéfices de synergies tendent à diminuer et sont toujours plus faibles qu'en lignes alternées (Salinas-Roco et al., 2024; Wang et al., 2023). En ce qui concerne le mélange intégral, la proportion spatiale est théoriquement la même, mais chaque plante de blé peut avoir comme voisine une plante de fèverole. Ce modèle apporte plus de variabilité spatiale dans la distribution des plantes. Les études comparatives montrent peu de différence entre le modèle (1) et (3) en termes de LER pour les mêmes densités de semis, ce qui tend à considérer les deux systèmes comme équivalents (Agegnehu et al., 2008). Pour éviter la diminution de 10% des rendements du froment, le paramètre important sur lequel se pencher est la densité de semi et la proportion de chaque espèce.

2.6.4. Densité de semis

L'indice de LER est intéressant pour évaluer l'augmentation de rendement du système associé, mais il ne permet pas de prendre en compte la variation de productivité spécifique de chaque culture séparée. En ce qui concerne le système blé/fèverole en particulier, une étude expérimentale à 60U d'azote par hectare, menée par la chambre des cultures d'Hautes-de-France, montre que, bien que le LER soit supérieur à 1, la productivité maximale de froment est toujours atteinte en monoculture. A noter que l'essai est réalisé à 350gr/m² de froment en monoculture et 280gr/m² de froment + 15 ou 30 gr/m² de fèverole en association. Si les choix de production sont basés uniquement sur le rendement en froment, il vaut toujours mieux produire en monoculture. Aucune étude comparative de densités de semis à des niveaux de fertilisation de 45U/ha (taux maximisant les effets synergiques) n'a été référencée. La contrepartie de cette baisse de rendement est une augmentation du taux de protéines pour le froment, passant de 10,52% pour le grain en blé seul 60U d'automne à 11,425% pour le système blé/fèverole 30gr/m². Mais ces gains s'accompagnent par une diminution de rendement qui passe de 80,242 à 64,813 q/ha. Le choix de la densité de semi est donc dépendant des besoins en rendements, en taux de protéines, des quantités de fertilisants utilisés et des possibilités de valorisation de la fèverole (P. Durand, 2023).

2.6.5. Choix variétal

Le choix variétal a une incidence majeure sur de nombreux facteurs agronomiques tels que le niveau de rendement, la tolérance aux facteurs abiotiques et la résistance aux bioagresseurs. Le sujet est vaste et largement documenté, mais sort du cadre de ce travail de recherche et n'est donc pas développé ici, mais il est tout de même important de reconnaître son influence importante dans les performances globales du système (Vestergaard & Jørgensen, 2024).

2.7. Les systèmes racinaires

2.7.1. Etat de la recherche scientifique

Malgré l'impact significatif des organes racinaires sur les services écosystémiques et la productivité des systèmes de culture ; les recherches agronomiques sont beaucoup plus nombreuses sur les parties aériennes. L'influence combinée de différents facteurs de culture sur les interactions sol-plantes reste à ce jour relativement méconnue. Par exemple les réponses des racines aux stress présentent une forte variabilité et restent peu prédictibles en champs (Lopez et al., 2023).

Notamment en génétique, la sélection de variétés performantes a longtemps privilégié l'optimisation des parties aériennes. Ce focus sur les organes aériens a entraîné des changements indirects dans la structure racinaire, notamment chez le blé, le maïs et le riz. Leurs systèmes racinaires ont évolué pour devenir moins ramifiés, plus petits et plus superficiels. Cette modification démontre un compromis entre les organes aériens et souterrains encore mal compris. Ces changements ont mené à une résistance limitée face aux perturbations environnementales comme des sécheresses et à une utilisation efficace des ressources. Une meilleure compréhension des mécanismes pourra améliorer la stabilité des rendements face à la variabilité environnementale et rendre le système de production plus résilient (Cope et al., 2024).

Bien que ce domaine accuse un certain retard, la recherche s'est accélérée ces 40 dernières années et les études sur le sujet sont de plus en plus nombreuses (Ogilvie et al., 2021). Cependant, au sein de ces études, une disparité est encore marquée entre les études en environnement contrôlé majoritaires et les études en plein champ minoritaires. Les dispositifs simplifiés ne reproduisent qu'imparfaitement la complexité du milieu naturel. Les développements racinaires en pots et en champs présentent des différences notables et de nombreux résultats obtenus en conditions contrôlées ne se traduisent pas nécessairement de la même manière en champs où les racines explorent un environnement physique, chimique et biologique beaucoup plus hétérogène. Les études en champs restent essentielles pour une compréhension réaliste de la réalité. Elles représentent cependant un défi considérable du fait de la variabilité expérimentale et les difficultés d'observations (Fang et al., 2022).

3. Objectifs et démarche

3.1. Objectif général

Dans un contexte de transition agroécologique développé dans la section 2.1, l'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer l'impact de l'association intercalaire blé/féverole sur les caractéristiques architecturales du système racinaire du blé en comparaison aux monocultures. Les différentes pratiques agricoles, le choix des variétés de cultures et la diversité pédoclimatique sont également prises en compte dans l'objectif de créer un lien entre le contexte de culture globale et la variabilité des structures racinaires. En développant la compréhension des mécanismes influençant le développement racinaire, l'objectif est d'améliorer le système de culture par une utilisation plus efficace des ressources et par une réduction des intrants chimiques, spécifiquement les engrais azotés.

Les recherches sur les impacts de diverses pratiques agricoles sur les rendements pour le blé sont nombreuses et le sujet largement documenté. Cependant, comme expliqué dans la section 2.5, des progrès peuvent encore être faits concernant les connaissances des systèmes racinaires. Le manque à gagner n'est pas négligeable, certains chercheurs tels que soutiennent qu'un focus sur l'amélioration des architectures racinaires pourrait mener à une nouvelle révolution verte (Lynch Jonathan P., 2007).

Ce projet de recherche se base sur des prélèvements effectués en condition de plein champ. La décision de lancer ces recherches hors conditions contrôlées a été privilégiée dans le but de capturer la complexité et la diversité des environnements de développement. Les études en champs restent largement minoritaires, et une comparaison avec les études en serres pourrait permettre de confronter les résultats publiés jusqu'ici avec la réalité du terrain. Les leçons tirées de cette étude permettront également d'apporter des pistes d'améliorations aux autres études futures réalisées en champ.

3.2. Sous-objectifs spécifiques

3.2.1. Association blé/féverole

Le premier objectif développé ci-dessus est donc d'étudier l'effet de l'association blé/féverole sur le développement du système racinaire du blé en comparaison avec la monoculture. L'objectif est de caractériser les paramètres racinaires tels que la biomasse, la densité de racines latérales, le diamètre racinaire, le nombre de racines séminales et adventives et leur lien avec les performances agronomiques (biomasse aérienne, structure du sol, etc.). Ces analyses permettront d'identifier les mécanismes de complémentarité et de compétition racinaire dans un système cultural mixte.

3.2.2. Données réutilisables

Le deuxième objectif est de fournir au laboratoire PEPA (Plant Ecology, ecoPhysiology and sustainable Agriculture) un ensemble de données fiables, standardisées et réutilisables sur la structure des systèmes racinaires du blé dans différents contextes agronomiques. Ces données pourront être réutilisées pour des travaux de recherche futurs sur la plasticité phénotypique, la modélisation fonctionnelle des racines et l'optimisation des pratiques agricoles durables.

3.2.3. Farm For Good et Open Compass

Un dernier objectif de ce projet de recherche est lié au réseau FFG. FFG est une double structure, ASBL pour le conseil aux agriculteurs et coopérative pour la vente de produits regroupant plus de 95 fermes certifiées en agriculture biologique. Cet organisme contribue à développer une structure de commercialisation locale, durable, de bonne qualité et à un prix juste. Elle a pour objectif de collecter les matières premières de ses membres et de les représenter face aux filières de transformations agroalimentaires et de distribution. À l'heure actuelle, la surface agricole liée à cet organisme représente plus de 8 200 hectares.

Dans le but de développer la transition vers l'agriculture bio et régénérative, FFG a développé un outil : open compas (OC) visant à évaluer les pratiques agricoles de ses membres pour guider leurs choix futurs. L'outil se développe autour de 4 axes :

- Les sols vivants,
- La biodiversité et l'eau,
- L'autonomie et la résilience
- La rentabilité et l'efficacité

Le projet est encore en développement et se base sur des modèles mathématiques complexes. Dans le cadre du développement de l'outil et dans l'optique de le rendre le plus robuste possible, FFG souhaite valider les modèles par des mesures de terrains pour les comparer à la réalité. Les mesures prises dans ce mémoire de recherches permettent de comparer deux de ces indicateurs. Le premier est l'indicateur STIR de la section « sols vivants ». Il a été développé par USDA (2012) et se base sur la vitesse, la profondeur et le type de travail du sol pour calculer une valeur de perturbation du sol. Le deuxième indicateur est le bilan humique basé sur un bilan entre les entrées (résidus de cultures aériens et racinaires, les apports en fertilisants, etc.) et les sorties (production). Le calcul de bilan humique se fait par le modèle Henin-Dupuis sur une année. Les résultats de ces modèles permettent de classer les différentes fermes à travers OC. Dans le cadre de ce mémoire, les concentrations en carbone et en azote dans les sols des différentes parcelles étudiées et la structure dynamique du sol font partie des données expérimentales produites et permettront de comparer ces 2 indicateurs avec la réalité et tester la fiabilité d'OC.

4. Matériels et méthodes

4.1. Sites d'études

4.1.1. Contexte climatique

Les sites sur lesquels les prélèvements de données ont été effectués se situent tous en Wallonie, en Belgique. Le climat y est de type tempéré océanique (classification Köppen : Cbf). Il est caractérisé par une distribution relativement homogène des précipitations tout au long de l'année avec des hivers modérément froids et des étés tempérés. L'amplitude thermique annuelle y est relativement modérée et des variations interannuelles sont principalement explicables par la circulation atmosphérique ouest-européenne. L'Atlantique Nord influence également les fluctuations.

La superficie de la Wallonie est de 16 844 km² soit un peu plus de la moitié du pays. Elle présente une hétérogénéité importante climatique et topographique avec plusieurs zones climatiques : le nord du sillon Sambre-et-Meuse, la zone de transition, l'Ardenne chaude, les vallées ardennaises et l'Ardenne froide. Ces zones sont elles-mêmes séparées en 10 sous-régions bioclimatiques ; elles diffèrent par leurs altitudes, leurs précipitations et leurs répartitions thermiques, ce qui influence grandement les dynamiques de croissances végétales.

4.1.2. Saison agricole 2024-2025 : un climat atypique

Les bilans bioclimatiques du CRA-W de 2024 et 2025 (mois de janvier à avril) montrent des saisons marquées par des anomalies thermiques et pluviométriques (V. Michaud et al., 2024).

- Automne 2024 : Dans son ensemble, l'automne 2024 a été plus chaud et humide que la normale ce qui a réduit l'accumulation efficace d'unités de vernalisation entraînant un retard de l'induction à la dormance et un maintien de l'activité biologique prolongé dans le sol et les cultures.
- Hiver 2025 : Les mois de janvier à mars ont été marqués par une accumulation précoce et excessive de degrés-jour liés à une faible occurrence de températures basses hivernales compromettant partiellement les processus de vernalisation nécessaires pour le blé d'hiver. Le sol est resté longtemps gorgé d'eau avec des conséquences sur sa structure (compaction et asphyxie) et le développement racinaire.
- Début du printemps 2025 : Malgré une normalisation apparente des températures, les anomalies climatiques continuent de s'accumuler. Le cumul total de réchauffement a atteint 394,4°C en avril soit plus du double en comparaison avec la médiane historique. Les précipitations sont quant à elles proches de la médiane supérieure et les zones agricoles restent arrosées. Paradoxalement, la sécheresse de l'air en mars, avril est préoccupante (2,27 et 3,04 kPa) et anormalement élevée confirmant des potentielles

conditions de stress atmosphérique avec des conséquences pour le développement des cultures.

4.1.3. Localisation des sites d'étude et contexte pédologique

L'étude a été réalisée sur un total de 17 parcelles dans 7 exploitations agricoles distinctes (figure 4) toutes membres du réseau FFG et donc, forcément, en agriculture biologique. Parmi les 17 parcelles de prélèvement, 6 étaient cultivées en culture intercalaire de type blé-fèverole. Leurs caractéristiques principales sont reprises ci-dessous (tableau 2). Ces informations proviennent directement de FFG ou de rencontres avec les agriculteurs responsables des parcelles étudiées. En plus de ces informations générales, des données sur les précédents de culture, l'intensité du travail du sol et la densité de semis ont également été reprises (tableau 3).

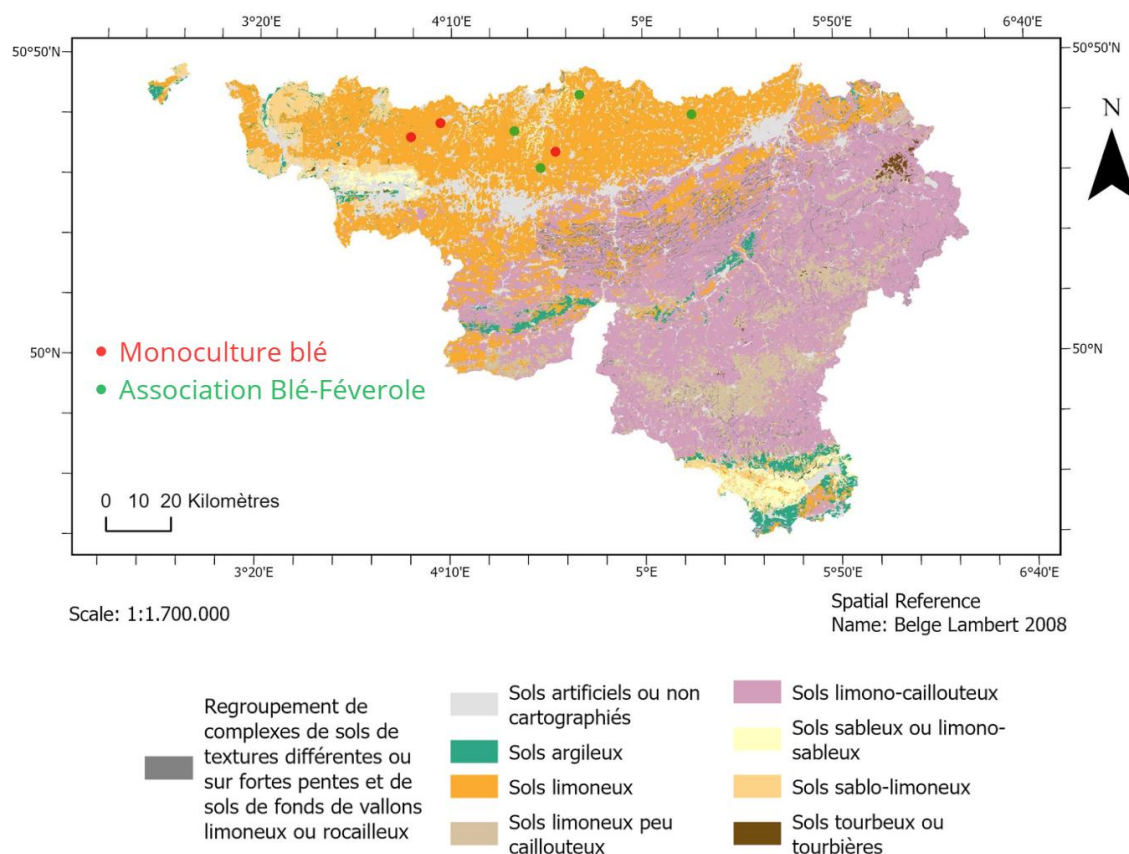


Figure 4 : Répartition spatiale des fermes ayant fait l'objet de prélèvements et contexte pédologique

Tableau 2 : Description des caractéristiques générales des exploitations agricoles étudiées

REFERENCE	TYPE DE CULTURE	VARIETE GENETIQUE	NOM DE L'EXPLOITATION
F1P1 (1)	Blé pur	Wital	Ferme bio du Petit Sart
F1P2 (2)	Blé pur	Wital	
F1P3 (3)	Blé pur	Wital	
F2P1 (4)	Blé pur	Wital	Ferme du Plein Air
F2P2 (5)	Blé pur	Wital	
F2P3 (6)	Blé pur	Wital	
F4P1 (7)	Blé + Féverole	Christoph	Ferme de l'Escole
F4P2 (8)	Blé + Féverole	Christoph	
F5P1 (9)	Blé + Féverole	Mélange de 5 variétés	Ferme du Champ des Noces
F6P1 (10)	Blé pur	Alessio	
F6P2 (11)	Blé pur	Wital	Ferme du Brye
F6P3 (12)	Blé pur	Alessio	
F7P1 (13)	Blé + Féverole	Tillexus	Ferme du Tambourin
F7P2 (14)	Blé + Féverole	Tillexus	
F8P1 (15)	Blé pur	Mélange Arameus, Alessio, Christoph (1/3-1/3-1/3)	Ferme du Gala
F8P2 (16)	Blé pur		
F8P3 (17)	Blé pur		

Tableau 3 : Caractéristiques techniques des exploitations agricoles (semis, précédents et travail du sol)

REFERENCE	DENSITE (KG/HA)	PRECEDENT DE CULTURE	LABOUR (20 CM)
F1P1 (1)	185	Petits pois de conserverie	Oui
F1P2 (2)	185	Petits pois de conserverie	Oui
F1P3 (3)	185	Moutarde puis trèfle nain	Oui
F2P1 (4)	180	Oignons puis épinards	Oui
F2P2 (5)	180	Pommes de terre	Oui
F2P3 (6)	180	Oignons puis moutarde	Oui
F4P1 (7)	180	Pommes de terre	Oui
F4P2 (8)	180	Pommes de terre	Oui
F5P1 (9)	180	Moutarde	Non
F6P1 (10)	180	Quinoa maccara	Oui
F6P2 (11)	180	Haricots	Oui
F6P3 (12)	180	Pommes de terre	Oui
F7P1 (13)	192	Prairie	Oui
F7P2 (14)	192	Prairie	Oui
F8P1 (15)	180	Tournesol	Oui
F8P2 (16)	180	Tournesol	Oui
F8P3 (17)	180	Tournesol	Oui

4.2. Echantillonnage

4.2.1. Echantillons de sols

Au total, 10 échantillons de sol structurés ont été prélevés par parcelle à l'aide de kopecky de 100 cm³, 5 à la surface et 5 à 20 cm de profondeur. Les prélèvements ont été effectués avec une goupille. Chaque kopecky a été lissé aux extrémités du cylindre, bouché par des capuchons en plastiques et référencés avant d'être stockés en attente d'analyses.

En plus de ces échantillons structurés, un échantillon composite de sol en surface a également été réalisé dans les 17 parcelles. Cet échantillon déstructuré a été composé à partir de 5 points de prélèvement, distants d'au moins 5 mètres chacun, pour obtenir une moyenne représentative de la zone de prélèvement. Ils ont ensuite été homogénéisés dans un sac en plastique et forment un prélèvement d'une masse minimum de 500 grammes.

4.2.2. Echantillons végétaux

En termes d'échantillons végétaux, deux types de prélèvement ont été réalisés. La biomasse aérienne, exclusivement, a été prélevée sur une superficie de 1 m². Dans le but de minimiser les perturbations dans les cultures et à la demande de certains agriculteurs, ces prélèvements se sont faits sur une ligne de semi sur deux. De cette manière, les bandes voisines non prélevées ont pu combler l'espace, limiter la perte de rendement, mais surtout le développement d'adventices. Il a donc fallu compter le nombre de lignes de semi sur un m² et, en laissant de côté une ligne sur deux, prélever le nombre de bandes équivalentes. Ces échantillons ont ensuite été préservés à 4°C dans l'attente d'analyses.

Le deuxième type de prélèvement consiste à récupérer 20 plantes entières, parties aériennes et racinaires. La méthode utilisée est le shovelomics, une méthode de phénotypage racinaire *in situ* à haut débit permettant une évaluation visuelle rapide et standardisée de l'architecture racinaire. La méthode se base sur le prélèvement manuel des couronnes racinaires à l'aide d'une bêche suivie d'un nettoyage et d'une évaluation des traits morphologiques. -63-64- Concernant le nettoyage, les plants préservés dans leurs blocs de sols sont laissés à reposer environ 12 heures dans de l'eau savonneuse ; le savon a pour rôle de déstructurer le sol en détruisant les liens de cohésion. Après 12 heures, les particules de terre encore attachées au système racinaire sont nettoyées doucement à l'eau. Une fois le nettoyage effectué, les caractéristiques de base des parties aériennes sont référencées afin de préciser le stade de développement des différentes plantes. Ces caractéristiques pourront par la suite être corrélées à d'autres variables lors de l'interprétation des résultats. Ces caractéristiques sont : le nombre de talles, le nombre de feuilles et la longueur de la partie aérienne de la plante. Une fois ces informations recueillies, les organes racinaires sont séparés des parties aériennes et préservés dans des tubes Eppendorf (50 ml) avec de l'éthanol à 50% dans l'attente d'analyses.

La méthode de shovelomics comporte plusieurs avantages, elle est rapide, simple et à coût réduit. Elle est applicable en plein champ et facilement reproductible. Elle permet de détecter les différences génétiques significatives, identifier facilement les profils racinaires et étudier la variabilité architecturale sous différentes contraintes environnementales. Il est cependant important de noter que cette méthode de prélèvement comporte plusieurs limites. Elle ne permet pas l'analyse de racines profondes et les données qui y sont liées comme la profondeur d'enracinement, et peut être affectée par le biais subjectif du notateur ainsi que par des limites de résolution visuelles (Arifuzzaman et al., 2019; Trachsel et al., 2011).

L'étude des caractéristiques racinaires dans la méthode shovelomics se base sur une analyse visuelle des caractéristiques racinaires, dans le point 4.3.1, une méthode d'analyse différente est proposée pour palier à certaines limites de cette méthode.

4.3. Gestion des échantillons

4.3.1. Scanners racinaires

Comme présenté dans le point 4.2.2, la méthode shovelomics possède plusieurs limitations importantes. Plusieurs de ces limitations proviennent du fait que l'analyse repose sur un scoring visuel des différents traits morphologiques. Dans cette étude, une méthode alternative, le root scanning (Bouma et al., 2000; Lobet & Draye, 2013). Il sera utilisé pour les raisons suivantes :

- Elle fournit une description précise et l'estimation de la longueur, du volume et du diamètre de chaque segment se fait par méthode numérique limitant la subjectivité liée à l'observateur.
- Elle est plus adaptée aux espèces à talles multiples, les échantillons racinaires sont séparés en fonction de leurs position (racines séminales et nodales).
- Cette méthode rend les données plus utilisables pour des études ultérieures au besoin.

Le principe de fonctionnement est assez simple, les racines sont étalées dans une fine couche d'eau sur une plaque transparente pour être scanner à plat puis analysées via le logiciel « VueScan64 ». Les paramètres spécifiques utilisés dans VueScan64 sont disponibles en annexe 5. Cette méthode permet d'obtenir une estimation fiable des diamètres racinaires ainsi que la densité de racines latérales le long de l'axe principale. En résumé, cette méthode permet de récupérer des données morphologiques avec une précision plus importante. Cependant, cette méthode possède toujours quelques limites liées principalement au fait que les racines soient scannées à plat. La perte d'information est à prendre en compte et l'analyse est sensible aux chevauchements racinaires ce qui entraîne souvent des erreurs dans l'analyse d'image automatique effectuée par la suite. Pour essayer de palier à ce problème, l'analyse automatique des racines est suivie d'une vérification par un observateur qui corrige au besoin les analyses automatiques quand celles-ci comportent des erreurs. Dans la figure ci-dessous une image traitée illustre le résultat final de l'analyse racinaire. (Figure 5) Par la suite, les valeurs de diamètres racinaires utilisés dans l'analyse des échantillons représente la valeur moyenne de diamètre sur les 5 premiers centimètres de racines. Ce choix a été fait afin d'avoir une valeur plus homogène et fiable entre les différentes racinaires et découle du fait que la méthode shovelomix ne permet pas de prélever les racines dans leurs totalités.



Figure 5 : Exemple de traitement des scans racinaires montrant la distinction entre racines principales (jaune) et secondaires (vert)

4.3.2. QuantiSlake Test

Le QuantiSlake Test (QST) est une méthode d'analyse visant à quantifier la stabilité structurelle du sol. Elle s'inspire du Slake Test classique pour lequel l'analyse est visuelle, mais ajoute une dimension dynamique à l'analyse. Le protocole consiste à mesurer la variation de poids d'un échantillon de sol structuré sec (échantillon de 100 cm³ décrit au point 4.2.1) plongé dans de l'eau déminéralisée au cours du temps. Le montage expérimental est rudimentaire et peu coûteux. L'échantillon de terre est placé dans un panier en maille métallique relié par un câble à une balance placée au-dessus du bassin d'eau. La balance est connectée à un Raspberry Pi qui enregistre la variation de la masse relative du sol dans l'eau en fonction du temps. La mesure se fait pour un temps minimum de 1000 secondes (environ 17 minutes) et peut aller jusqu'à 3600 secondes. L'expérience s'arrête une fois que la masse se stabilise pendant plus d'une minute (Vanwindekens & Hardy, 2023). -65-

Les dynamiques de variations de la masse peuvent être séparées en 3 parties distinctes :

- Immersion : La masse augmente brièvement. Ce phénomène peut être expliqué par le remplacement des poches d'air dans les porosités du sol par de l'eau.

- Stade maximal : La masse relative de l'échantillon de sol atteint un pic, sa valeur maximale.
- Désagrégation : La perte de masse devient prédominante à cause de la fragmentation et de la dispersion du sol dans le bassin d'eau.

A partir de la courbe produite (figure 6), plusieurs indicateurs peuvent être produits (Annexe 2) :

- t_{max} , t_{25} , t_{50} , t_{75} , t_{90} , t_{95} , t_{99} : temps pour atteindre la masse maximale, une diminution de 25 % par rapport à la masse maximale, de 50 %, de 75 %, de 90 %, de 95 % et de 99 %
- W_{t0} , W_{max} , W_{end} : masse relative à t_0 (moment de l'immersion), masse relative à t_{max} et masse relative à la fin de l'expérience
- $Slope_{0-max}$, $Slope_{max-60}$, $Slope_{max-300}$, $Slope_{max-600}$, $Slope_{60-300}$, $Slope_{300-600}$: pente entre différents temps, soit par rapport à t_{max} soit entre 2 temps en secondes
- AUC (area under curve) : air de la surface sous la courbe de mesure
- dt_{50-75} , dt_{75-90} : durée pour passer de 50 à 75 % de la masse relative et de 75 à 90 %

Parmi ces indicateurs, $W_{max} - W_{t0}$ et t_{95} peuvent être associés à la concentration en carbone organique dans le sol ($r = 0,56$ et $0,55$ respectivement) et $W_{max} - W_{t0}$, t_{max} et $slop_{max-30}$ peuvent être associés à la concentration en argile ($r = -0,83$, $-0,64$ et $-0,58$ respectivement).

Le choix du QuantiSlake Test a été fait pour plusieurs raisons, il est simple et rapide à effectuer, sa reproductibilité est élevée et il est affecté par les pratiques agricoles comme le travail du sol ou le type de restitution de matière organique. Comme toute méthode, le QuantiSlake Test comprend des limites qu'il convient de rappeler. Tout d'abord, il ne donne pas d'informations sur la taille des agrégats résiduels, il ne donne pas non plus d'informations sur la résistance mécanique ; il est peu adapté aux sites riches en cailloux (ce n'est normalement pas un problème dans les parcelles agricoles) et peut être sensible à la variabilité intrasite.

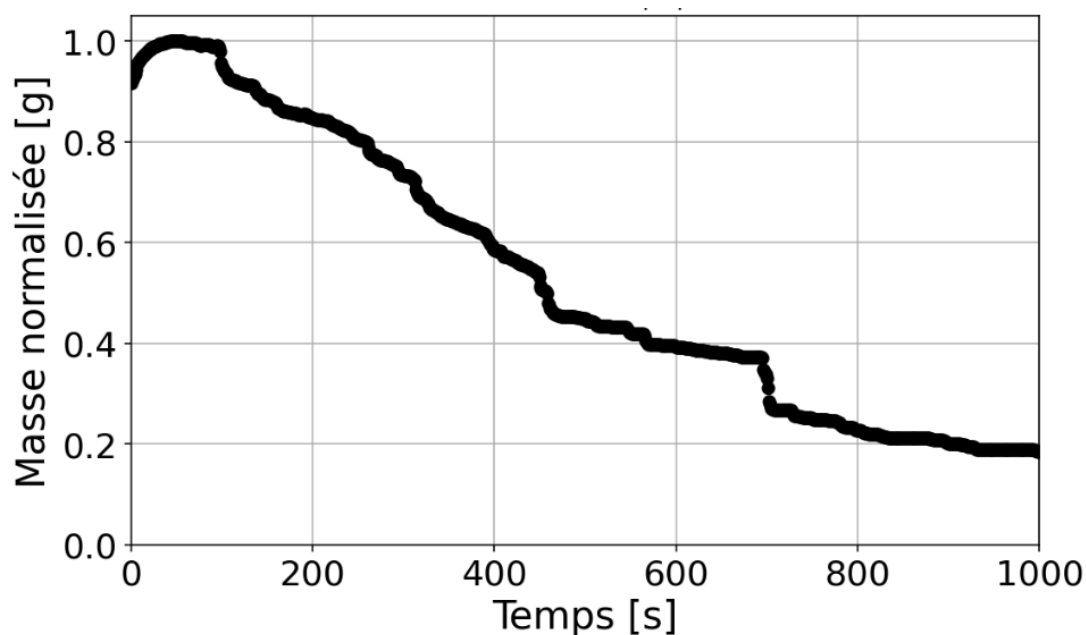


Figure 6 : exemple de résultat standard d'un test QuantiSlake

4.3.3. Biomasse

La biomasse aérienne prélevée sur une surface de 1 m² a ensuite été pesée fraîche puis séchée à 40°C et re pesé. Dans le cas de culture intercalaire, le blé d'hiver et la fèverole ont été pesés séparément. Ces mesures donnent une indication des différences de rendements et sont par la suite remises en perspective par rapport au stade de développement référencé pour les 10 plantes prélevées entières.

4.3.4. Analyses chimiques de sol

Prétraitement

Les échantillons de sol non structurés bruts ont été prétraités selon le protocole standard du laboratoire MOCA (Mineral & Organic Chemical Analysis). Toutes les analyses sur les échantillons déstructurés ont été faites dans ce laboratoire. Les sols ont premièrement été séchés en étuve à 40°C jusqu'à un assèchement complet. Une fois secs, les agrégats ont été broyés au mortier puis tamisés à 2mm (tamis en nylon ISO 565). Les particules grossières telles que les résidus végétaux et la fraction caillouteuse ont été éliminés lors de cette étape. Une sous-section des sols tamisés a ensuite été broyée pour les analyses exigeant une granulométrie plus fine. Cette étape a été réalisée à l'aide d'un broyeur à disque RS 200 Retsch permettant d'atteindre une taille de particule inférieure à 200 µm. Les échantillons ont ensuite été stockés à température ambiante, à l'abri de la lumière dans l'attente des analyses ultérieures.

Détermination de la matière sèche à 105°C

L'humidité résiduelle représente la différence entre le poids de la terre après le séchage à 105°C par rapport au poids de la terre après le séchage à 40°C. Généralement cette valeur comprise entre 4 et 8% est directement proportionnelle à la fraction d'argile de l'échantillon. Cette étape a pour but de travailler par la suite avec une base sèche et de produire des résultats analytiques comparables à d'autres études.

Mesure du pH

Le pH du sol a été mesuré en suspension aqueuse pour les échantillons tamisés à 2mm. La mesure du pH dans l'eau permet de mesurer l'acidité active (à distinguer de l'acidité échangeable et résiduelle), c'est-à-dire liée aux ions H^+ dissouts. Elle est considérée comme celle que les organismes du sol et les racines subissent. Concrètement, 5 grammes de sols sont placés en solution aqueuse pendant une durée d'une heure (avec 4 agitations, une au début puis une toutes les 15 minutes). La mesure de pH est ensuite réalisée à l'aide d'un pH-mètre.

Analyse du carbone et de l'azote

La teneur en carbone et en azote des sols a été déterminée par la méthode de Dumas (combustion sèche). L'appareil utilisé est un analyseur Elementar Vario EL Cube permettant la combustion simultanée du C et du N. Une petite quantité d'échantillons, préalablement séchés à 105°C, broyés et enfermés dans une capsule d'étain, est introduite dans le four à combustion de l'analyseur. La combustion est réalisée à une température de 900 à 1 150°C sous flux d'oxygène pur. L'ensemble du carbone est converti en CO_2 tandis que l'azote est converti en oxydes d'azote (NO_x). Les fumées sont ensuite envoyées dans un système de colonnes chromatographiques permettant la séparation des composants gazeux. Ceux-ci sont ensuite analysés par des détecteurs sélectifs. -82- Plus spécifiquement, le Vario EL Cube permet de mesurer simultanément le C et le N sur une large gamme de concentration. -81- Cette méthode permet d'obtenir le rapport C/N ainsi que les quantités de carbone et d'azote totales.

Granulométrie

L'analyse granulométrique vise à déterminer l'importance pondérale relative des différentes classes de particules dans les échantillons. Cinq classes différentes sont distinguées : les argiles (0 à 2 μm), les limons fins (2 à 20 μm), les limons grossiers (20 à 50 μm), les sables fins (50 à 200 μm) et enfin les sables grossiers (200 à 2000 μm). Plusieurs traitements successifs sont nécessaires afin de placer les particules de l'échantillon en suspension.

- Destruction de la matière organique en présence de H_2O_2
- Décarbonation par traitement au HCl pour les sols au pH > 7.8
- Dispersion des agrégats par traitement aux ultrasons
- Mise en suspension des argiles grâce à un agent dispersant, l'hexamétaphosphate de Na

Une fois les particules en suspension, la détermination des différentes classes granulométriques s'effectue par sédimentation et prélèvement à la pipette pour les classes inférieures à 50 µm et par tamisage pour les classes supérieures à 50 µm.

Des versions complètes et détaillées de ces protocoles de laboratoires peuvent être retrouvées sur le site web du laboratoire MOCA.

4.4. Résumé des données collectées

Tableau 4 : Résumé des données collectées

TYPE DE DONNÉES	INFORMATIONS COLLECTÉES	FORME DES DONNÉES
SCANS RACINAIRES (QUANTITATIF)	• Diamètre des racines principales et secondaires • Densité de racines latérales • Nombre de racines latérales	10 scans par parcelles (170 scans) avec une moyenne de 10 racines par images donc 1700 racines (17 x 10 x 10)
QUANTISLAKETES TS (QUANTITATIF)	• T_{max} • W_{final} • Slope 30-60 • Slope 600 • Air sous la courbe • Slope 60	Chaque indicateur basé sur 5 prélèvements en surface et 5 en profondeur par parcelles (5 x 2 x 17)
ANALYSES CHIMIQUES DE SOLS (QUANTITATIF)	• pH • Carbone/Azote • Matière sèche • Granulométrie	Une valeur par variable par parcelle (17 x 1)

VARIÉTÉ GÉNÉTIQUE (QUALITATIF)	• Groupes génétiques différents basés sur les variétés de cultures	5 groupes hétérogènes : 1 : Wital 7 parcelles 2 : Christoph 2 parcelles 3 : Alessio 2 parcelles 4 : Tillexus 2 parcelles 5 : Mélange 4 parcelles
STADE ZADOK STADE DE DÉVELOPPEMENT (QUALITATIF)	• Valeur Zadok précise • Regroupement en catégories plus larges	Répartition en stades Zadok de 14 à 28 (170) avec une moyenne par parcelles de 19 à 25 (17) Répartition en groupes précoces (7 parcelles) / intermédiaires (7 parcelles) / tardifs (3 parcelles)
TYPE DE SYSTÈME (QUALITATIF)	• Valeur binaire, monoculture ou culture associée	5 parcelles en culture associées et 12 en monoculture

4.5. Analyse des données et traitement statistique

Les différentes données ont d'abord été organisées en encodées dans des fichiers Excel puis importées et traitées dans des dataframes à l'aide des logiciels RStudio et Python en fonction des besoins analytiques. Les différentes données ont premièrement été analysés séparément à l'aide de graphiques descriptifs et d'informations statistiques de base afin d'identifier les tendances générales et les éventuelles valeurs aberrantes. La normalité des résidus a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk et l'homogénéité des variances a été démontrée par un test de Levene. Suite à ces analyses préalables, si les données présentaient un intérêt explicatif des paramètres racinaires, des modèles linéaires mixtes et des analyses ANOVA ont été effectués pour intégrer les effets fixes (facteurs explicatifs) et les effets aléatoires (variabilité intra-parcelles et intra-images). En cas de différences significatives, des comparaisons multiples (Test Tukey) ont été réalisées afin d'identifier les groupes significativement différents et regrouper les données.

Dans le cas où les hypothèses de l'ANOVA n'étaient pas respectées, des transformations de données ou des tests non paramétriques adaptés ont été envisagés.

Enfin, des analyses multivariées telles que l'analyse en composantes principales (ACP) (package FactoMineR, fonction PCA) ont été utilisées pour synthétiser l'information contenue dans un grand nombre de variables (indicateurs racinaires et chimiques du sol par exemple) et visualiser les relations entre celles-ci. Cette méthode permet de réduire la dimensionnalité des données tout en préservant la majorité de la variabilité. Dans certains cas, un clustering hiérarchique (méthode de Ward) a été réalisé sur les axes principaux de l'ACP afin d'identifier des groupes homogènes d'échantillons.

4.6. Outil de rédaction

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

5. Résultats et discussion

5.1. Environnement pédologique

Une première analyse des données pédologiques a été réalisée afin d'évaluer l'hétérogénéité entre parcelles. Les indicateurs issus des QuantiSlake Tests proviennent des courbes de perte de masse enregistrées au cours des 1000 premières secondes. La Figure 7 illustre la diversité des courbes obtenues. Dès cette première étape, une variabilité importante entre les mesures est observée, ce qui justifie un examen plus détaillé dans les sections suivantes.

L'analyse des paramètres chimiques des sols (tableau 5) montre :

- Une variabilité moyenne à forte pour le carbone et l'azote,
- Une variabilité quasi nulle pour le pH et la matière sèche.

Concernant la granulométrie, tous les sols appartiennent à la catégorie "argile légère" selon le triangle des textures du SPW. Ces données n'ont pas été intégrées dans les modèles ultérieurs car elles n'apportent pas de différenciation entre parcelles. Les proportions granulométriques sont disponibles en annexe 4.

Une analyse GGPair a été menée pour visualiser les corrélations entre les paramètres pédologiques. Les variables "pH" et "matière sèche" ont été exclues en raison de leur faible variabilité et afin de ne pas surcharger le graphique (Annexe 3). Cette première exploration confirme que le contexte pédologique varie sensiblement d'une parcelle à l'autre. Les sections suivantes visent à déterminer si ces variations influencent les variables racinaires et si certains paramètres peuvent être regroupés ou écartés.

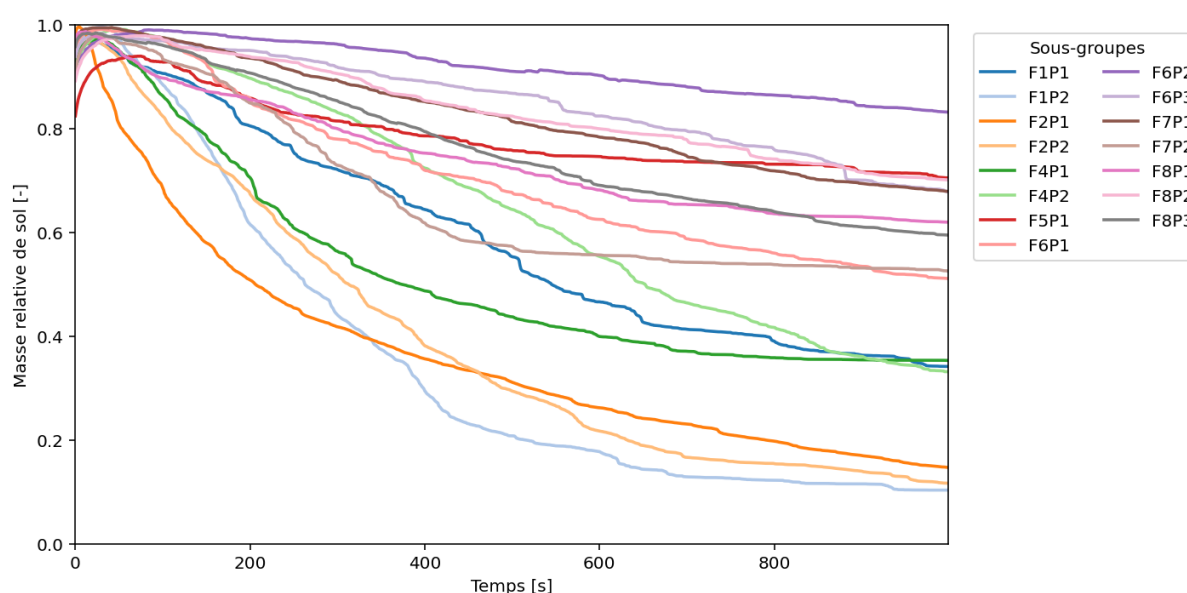


Figure 7 : Évolution normalisée de la perte de masse du sol par parcelle

Tableau 5 : Résumé des statistiques descriptives des paramètres chimiques du sol : moyenne, déviation standard (Std), variance (Var) et coefficient de variation (CV)

	MOYENNE	STD	VAR	CV [%]
MS [%] SUR POIDS TOTAL	0,98	0,00	0,00	0,44 (quasi-constante)
N [%] SUR POIDS SEC	0,13	0,02	0,00	19,17 (variabilité modérée)
C [%] SUR POIDS SEC	1,34	0,38	0,15	28,73 (variabilité forte)
C/N	10,48	1,07	1,14	10,17 (faible variabilité)
PH	6,92	0,48	0,23	6,96 (faible variabilité)

5.2. Analyse des variables séparément

5.2.1. QuantiSlake Tests

Un modèle mixte de type ANOVA a d'abord été appliqué afin d'évaluer si les indicateurs dérivés des courbes des Slake Tests ($t_{\max}$, slope_30_60, slope_60, area, Wfinal) permettaient de discriminer les systèmes monoculture vs association. Aucune p-valeur inférieure à 0,05 n'a été obtenue (les meilleures p-valeurs atteignent 0,25).

Pour réduire le nombre de variables, une analyse en composantes principales (ACP) a ensuite été réalisée. Les deux premières composantes principales expliquent plus de 90 % de la variance (PC1 et PC2). Le cercle de corrélation associé est présenté en Figure 8.

Sur base de ces deux composantes, un clustering hiérarchique (méthode de Ward) a été mené (Figure 9). Le nombre optimal de groupes a été déterminé à l'aide du coefficient silhouette ; il s'élève à 4 ($k = 4$, silhouette moyenne = 0,530). L'examen des groupes ne met en évidence aucun lien clair avec les variables de l'étude (système, stade, etc.).

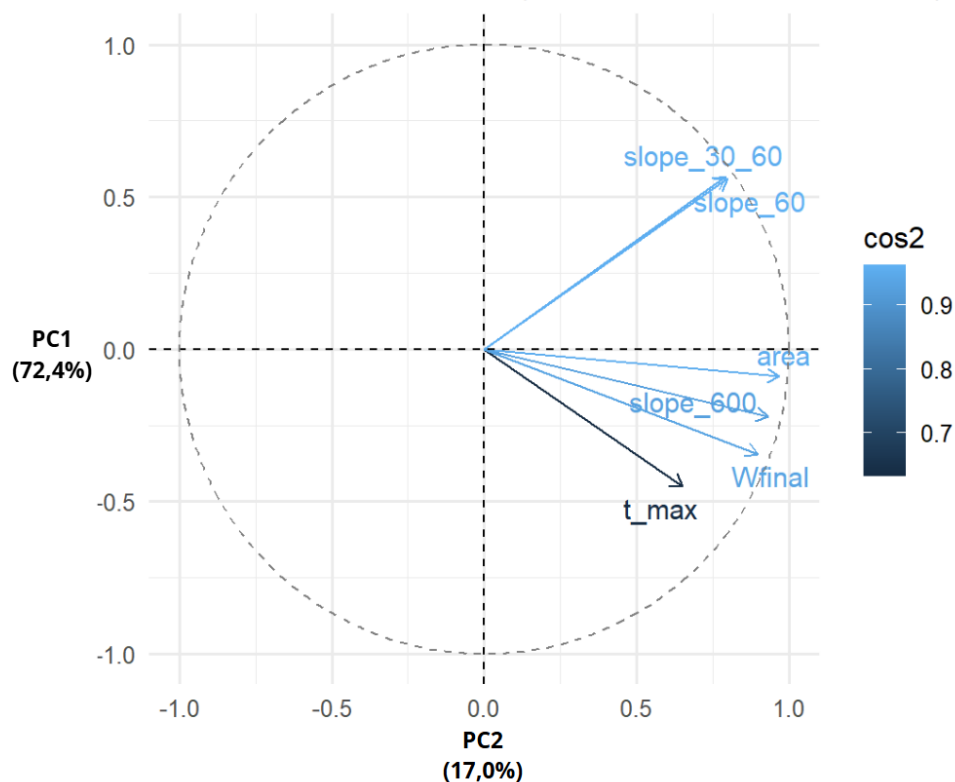


Figure 8 : Représentation des corrélations entre indicateurs du QuantiSlake Test selon les deux premières composantes principales (CP1 ; CP2 ; détail précis des indicateurs Annexe 2 ; $\cos^2$ est le carré du cosinus de l'angle entre la variable et l'axe considéré, plus il est proche de 1 plus la variable est bien représentée sur le plan choisi)

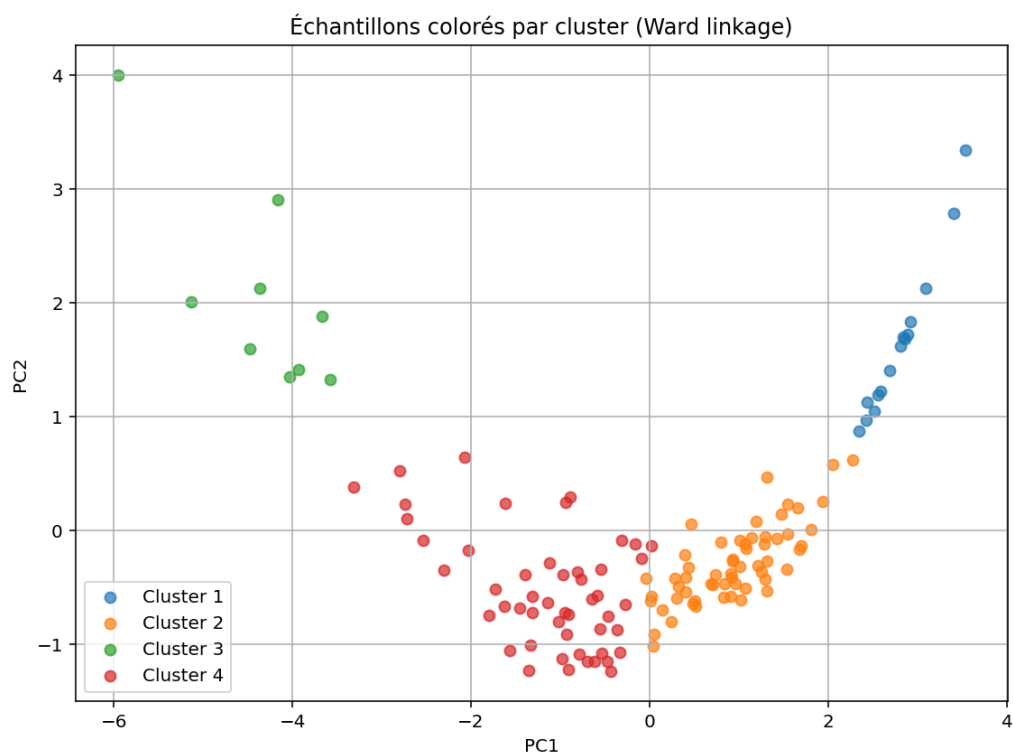


Figure 9 : Projection ACP des indicateurs du QuantiSlake Test — Clustering Ward, 4 groupes

5.2.2. Combinaison des QuantiSlake Tests avec les autres paramètres pédologiques

Afin de simplifier le modèle global, une deuxième analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à partir de l'ensemble des paramètres pédologiques. Les premières composantes concentrent l'essentiel de la variabilité des données (Tableau 6). La projection des variables sur le cercle de corrélation (Figure 10) met en évidence une forte redondance parmi les paramètres chimiques, principalement expliqués par CP2. À l'opposé, les indicateurs issus des QuantiSlake Tests s'alignent davantage sur CP1 mais présentent eux aussi une forte redondance. Deux variables se démarquent toutefois : la matière sèche (MS) et le pH, cependant, leurs variabilités entre parcelles reste très faible comme montré dans le tableau 5.

La projection des échantillons selon CP1 et CP2 (Figure 11) a permis d'examiner la distribution des parcelles en fonction des paramètres pédologiques. Par souci de clarté, seules les références numériques des parcelles ont été indiquées ; leur correspondance détaillée avec les échantillons est disponible dans les Tableaux 2 et 3. À ce stade, aucun regroupement net n'apparaît, ce qui suggère, comme attendu, que les paramètres pédologiques seuls ne suffisent pas à structurer distinctement les parcelles. Compte tenu de la forte corrélation des indicateurs des QuantiSlake Tests avec la composante principale 1 (CP1) et de celle des indicateurs chimiques avec la composante principale 2 (CP2), seules ces deux dimensions ont été retenues pour la suite des analyses. Ce choix méthodologique permet de simplifier le modèle explicatif tout en renforçant sa robustesse statistique.

Tableau 6 : Résumé des composantes principales (ACP) pour les indicateurs du QuantiSlake Test

COMPOSANTE	PROPORTION [%]	PROPORTION CUMULATIVE [%]
CP1	48,76	48,76
CP2	27,01	75,77
CP3	10,81	86,58

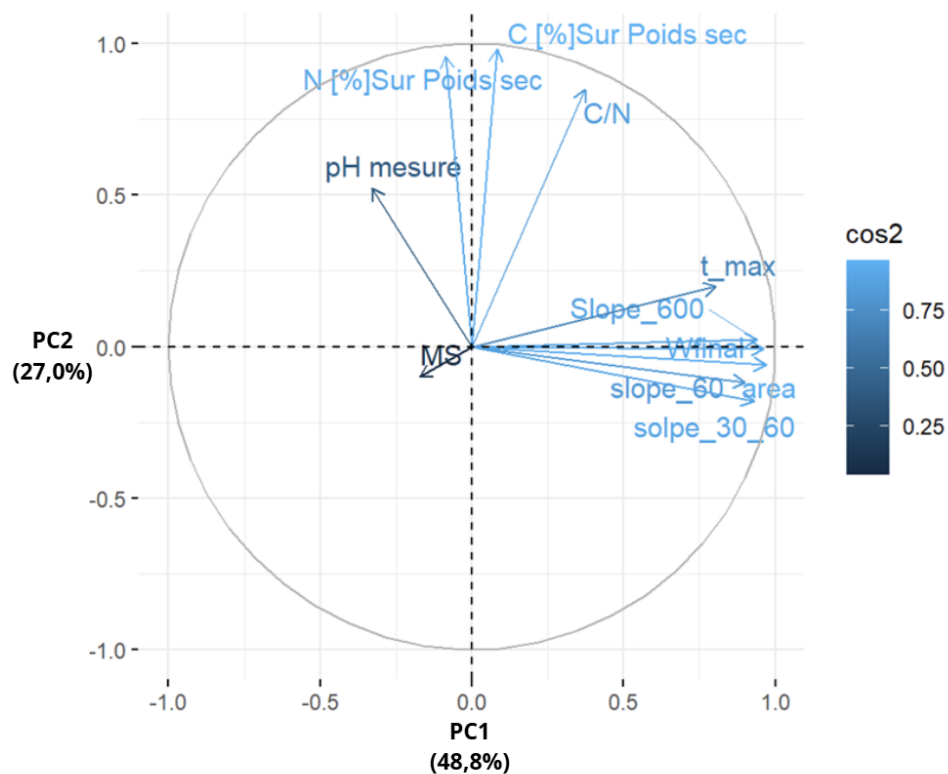


Figure 10 : Représentation des corrélations entre les paramètres pédologiques selon les deux premières composantes principales (CP1 ; CP2 ; $\cos^2$ est le carré du cosinus de l'angle entre la variable et l'axe considéré, plus il est proche de 1 plus la variable est bien représentée sur le plan choisi)

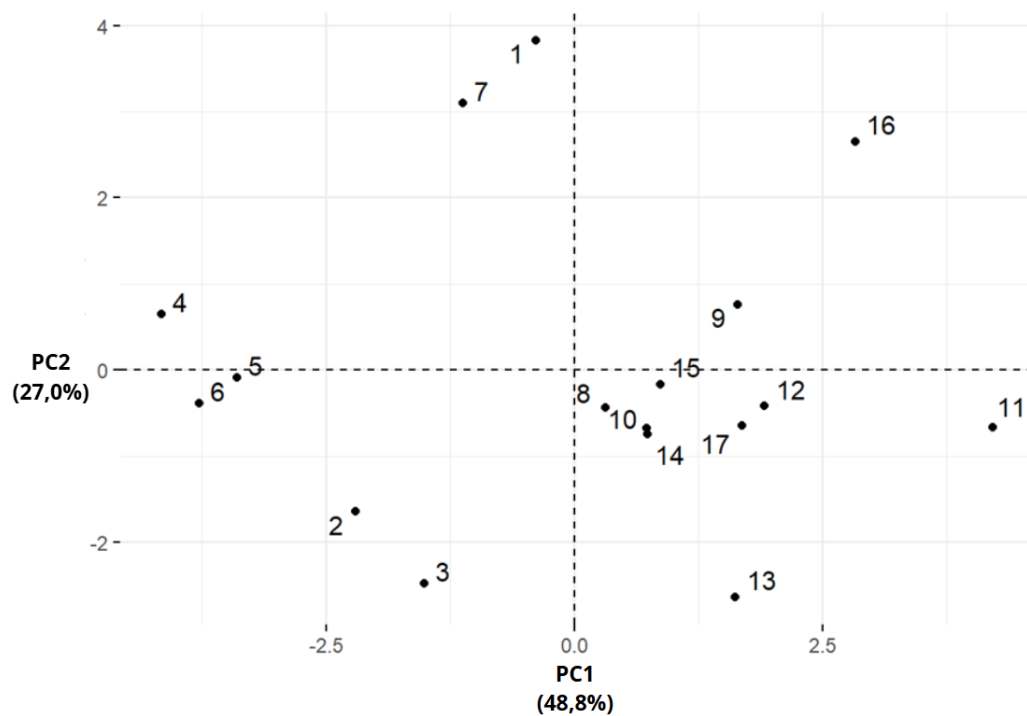


Figure 11 : Projection des échantillons selon CP1 et CP2 de la figure 9 (référence détaillée Tableau 2 ; Tableau 3)

5.2.3. Analyse préliminaire des paramètres racinaires

Un test du χ^2 a été utilisé pour analyser les variables racinaires, ce test étant particulièrement adapté à l'évaluation des liens entre variables qualitatives (système expérimental) et variables regroupées en classes. Seul le diamètre moyen des racines principales (ordre 1) ressort comme significativement discriminant entre systèmes ($p < 0,05$; Tableau 7). Cette variable a donc été retenue pour la construction du modèle global. La figure 12 illustre l'hétérogénéité observée pour le diamètre moyen normalisé. À noter que ce diamètre correspond à la moyenne mesurée sur les cinq premiers centimètres des racines principales, conformément au choix méthodologique détaillé en section 4.3.1.

Tableau 7 : Tests du χ^2 appliqués aux paramètres racinaires : p-valeurs obtenues

VARIABLE	P-VALUE
DENSITE DE LATERALES	0,953
NOMBRE DE LATERALES	0,656
DIAMETRE MOYEN	0,0138

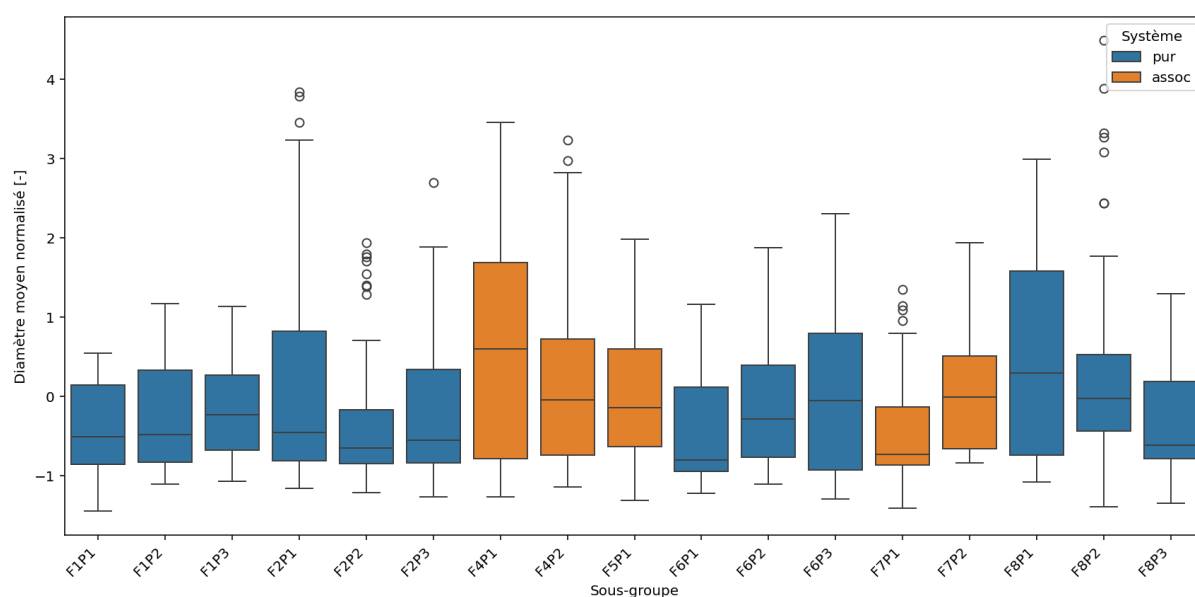


Figure 12 : Distribution du diamètre racinaire moyen normalisé selon les parcelles

Comme pour les données des Slake Tests, un clustering non hiérarchique a été réalisé sur les diamètres racinaires (3 clusters formés). Aucun lien n'a pu être établi entre les groupes ainsi formés et le système expérimental. Un test du χ^2 confirme qu'aucune différence significative n'existe entre monoculture et association sur cette base ($\chi^2 = 0,62$; p-valeur = 0.73), ce qui indique une variabilité intra-groupe importante et que le diamètre seul ne structure pas les groupes.

5.2.4. Analyse des paramètres catégoriels

Trois variables catégorielles ont été considérées :

- Le type de système (monoculture ou association),
- Le stade de développement (précoce, intermédiaire, tardif),
- La variété génétique (groupes 1 à 5).

Les inclure simultanément dans un modèle global aboutirait à 30 sous-groupes ($2 \times 3 \times 5$), ce qui réduirait fortement la puissance statistique. Une simplification a donc dû être envisagée.

Une ANOVA réalisée sur le diamètre racinaire en fonction de la variété génétique, suivie d'un test de Tukey, suggère que les cinq variétés peuvent être regroupées en trois catégories (A, B, C ; Tableau 6). Toutefois, la visualisation des diamètres racinaires par variété, mise en parallèle avec le stade de développement Zadok, indique que ce dernier a probablement joué un rôle majeur dans le regroupement observé (Figure 13 ; Figure 14). Un test du χ^2 confirme que ce regroupement est principalement dû aux différences de stade de développement ($p < 0,0001$). De plus, une comparaison de modèles (stade seul vs. stade + variété) montre que l'ajout de la variable « variété » n'améliore pas significativement l'ajustement du modèle ($p = 0,83$). La variable « variété » a donc été écartée et les catégories ont été simplifiées en conséquence.

Tableau 8 : Regroupement des différentes variétés génétiques de froment en fonction du diamètre racinaire moyen

GROUPE VARIETAL (1,2,3,4,5)	DIAMETRE MOYEN (MM)	REGROUPEMENT (A, B, C)
WITAL (1)	1,17	A
CHRISTOPH (2)	1,56	B
MELANGE (3)	1,38	C
ALESSIO (4)	1,19	A
TILLEXUS (5)	1,16	A

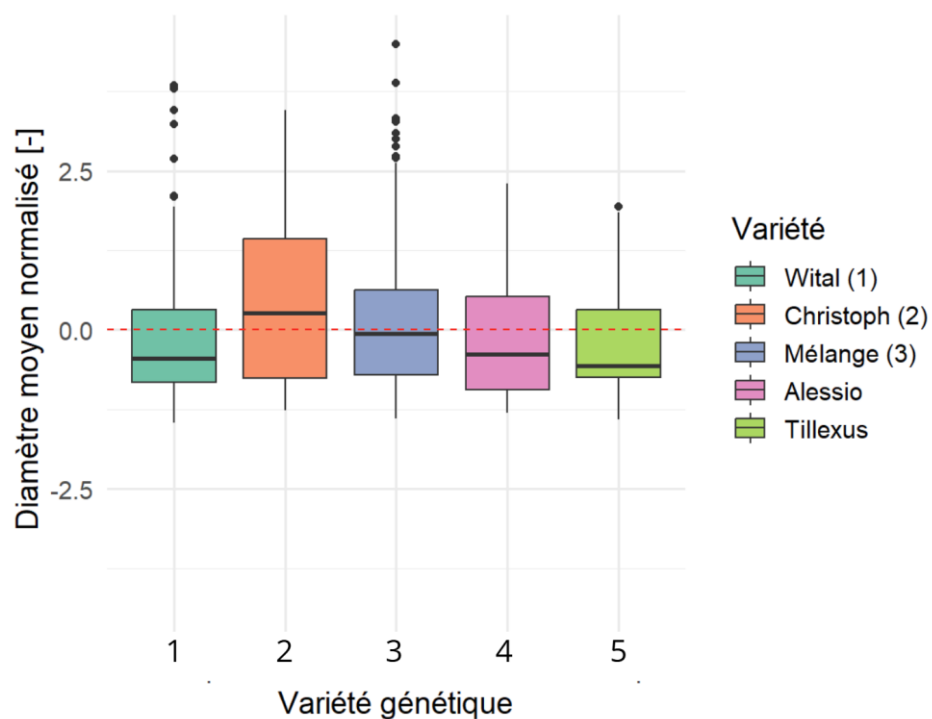


Figure 13 : Diamètre racinaire normalisé en fonction de la variété génétique

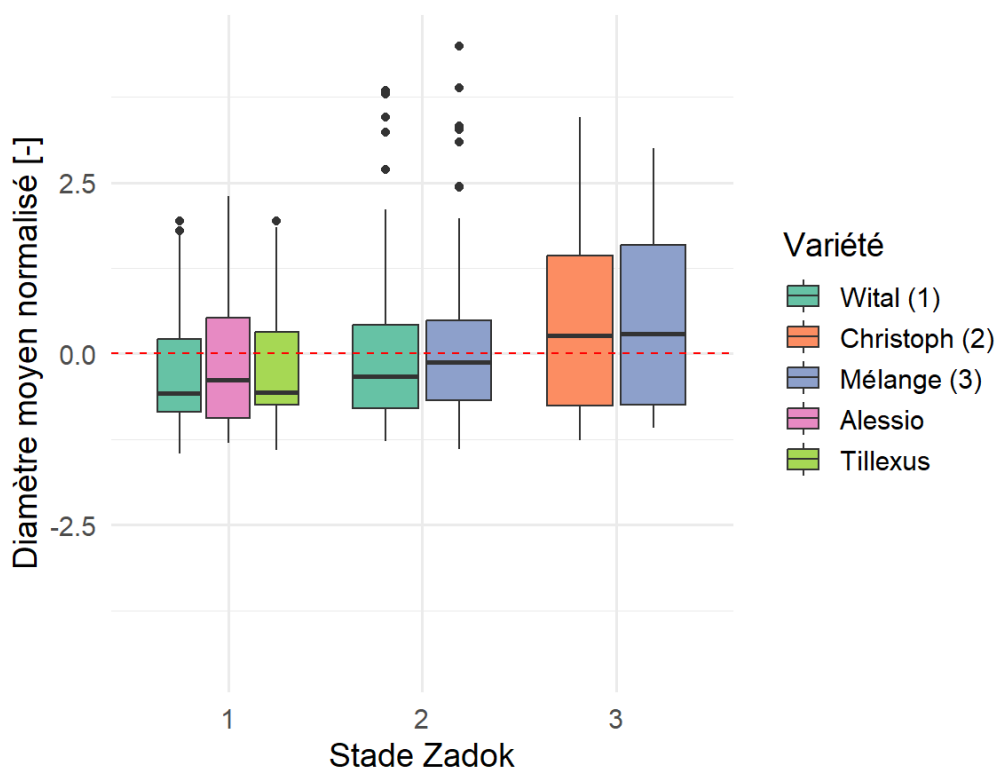


Figure 14 : Diamètre racinaire en fonction de la variété génétique et du stade de développement Zadok: précoc (1), intermédiaire (2), Tardif (3)

5.3. Modèle mixte global

L'objectif du modèle global est de relier le diamètre racinaire aux variables explicatives sélectionnées : CP1, CP2 issus des paramètres pédologiques, le système (monoculture ou association) et le stade de développement (1, 2 ou 3).

Le premier modèle reprenant toutes les variables ne ressort aucune variable comme significative. Cependant, un modèle simplifié ne prenant pas en compte la variable système montre que les variables liées au stade de développement (1,2 et 3) sont significatives, CP1 et CP2 restent non significatifs.

Ces résultats indiquent donc que le facteur principal influençant le diamètre moyen des racines principal est le stade de développement et que les autres facteurs n'influencent pas significativement les paramètres de développement racinaire mesurés. D'autres modèles testés incluant la variable CP3 ou s'intéressant aux rapports du diamètre des racines principale sur le diamètre moyen des racines latérales arrivent à la même conclusion. Ci-dessous se trouvent les résultats du modèle prenant en compte CP1, CP2 et le stade de développement (données normalisées).

Tableau 9 : Résultats du modèle linéaire reliant le diamètre racinaire moyen aux composantes principales (CP1, CP2) et au stade de développement Zadoks (données normalisées).

	ESTIMATE	STD. ERROR	T VALUE	PR(> T)
INTERCEPT	0,0402	0,00171	23,5	8,14e-12
CP1	-0,000119	0,000460	-0,261	0,799
CP2	0,000225	0,000639	0,352	0,731
ZADOK 2	0,00551	0,00238	2,31	0,0392
ZADOK 3	0,0139	0,00307	4,53	0,000877

5.4. Modèle précis pour le stade de développement

Suite à l'analyse du modèle global, seul le stade de développement ressort comme variable significative, une analyse plus poussée de celui-ci a donc été réalisée ci-dessous. Au lieu de simplifier le stade de développement en 3 catégories, celui-ci a été cette fois-ci séparé de manière plus fine selon l'échelle précise de Zadoks. Comme illustré dans la figure 15, l'ensemble des prélèvements ont été réalisés entre le stade 14 et 28. L'objectif est d'analyser la relation précise entre stade de développement et diamètre racinaire. Pour ce faire deux modèles ont été envisagés, un premier linéaire et un deuxième quadratique.

La comparaison des modèles a été réalisée à l'aide des critères d'information d'Akaike et bayésien (AIC et BIC) ainsi que des valeurs de significativité des coefficients associés (Tableau 10). Le modèle linéaire présente des valeurs d'AIC (3270) et de BIC (3290) plus faibles que celles du modèle quadratique (AIC = 3280 ; BIC = 3300), ce qui indique un meilleur compromis entre qualité d'ajustement et parcimonie. De plus, dans le modèle quadratique, le terme linéaire n'est pas significatif ($p = 0,116$), tandis que le terme quadratique seul atteint la significativité ($p = 0,027$). Cette configuration suggère une complexité supplémentaire sans réel gain explicatif par rapport au modèle linéaire. À l'inverse, le modèle linéaire montre une pente significative et positive ($0,097$; $p < 0,0001$), confirmant que l'augmentation du stade Zadoks est associée à une augmentation régulière et continue du diamètre. Ainsi, le modèle linéaire a été retenu car il offre à la fois une interprétation simple et robuste, et le meilleur équilibre entre ajustement statistique et simplicité structurelle.

Tableau 10 : Comparaison des modèles linéaire et quadratique de la relation entre le stade Zadoks et le diamètre

MODÈLE	AIC	BIC	P-VALEUR ZADOKS	P-VALEUR ZADOKS ²
LINÉAIRE	3270	3290	5,30e-10	/
QUADRATIQUE	3280	3300	0,116	0,027

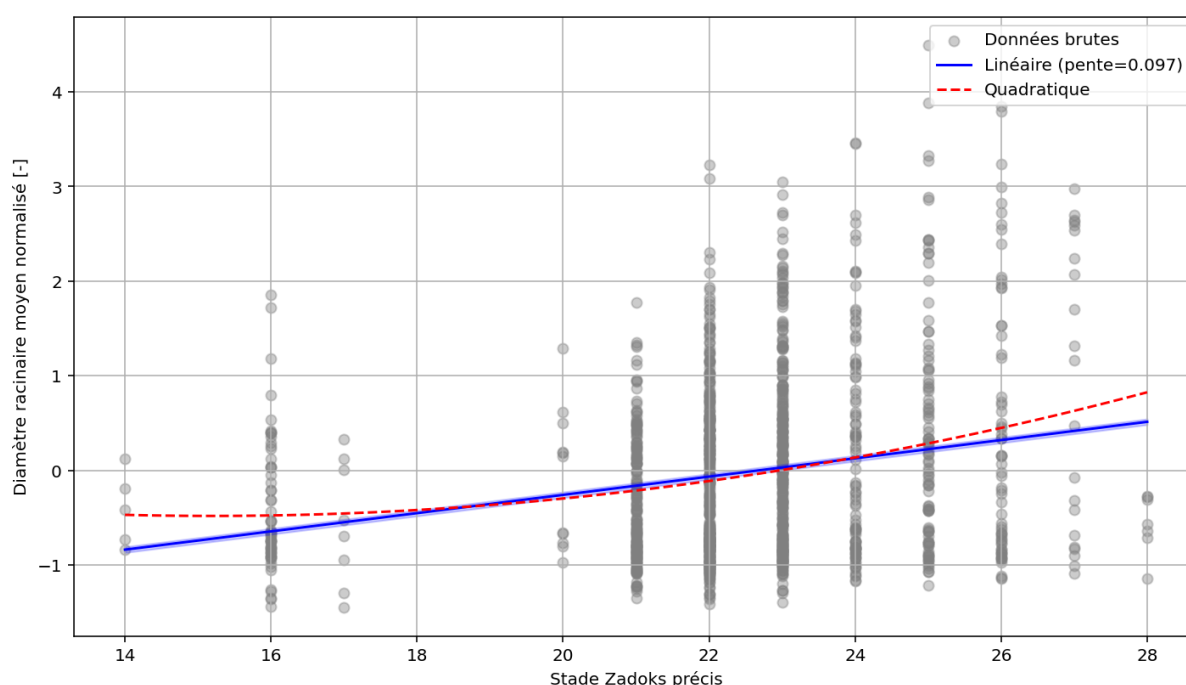


Figure 15 : : Évolution du diamètre racinaire selon le stade Zadoks (ajustements linéaire et quadratique)

5.5. Liens entre le stade de développement et diamètre racinaire

5.5.1. Nature de la relation

Les résultats statistiques montrent donc une relation forte entre le stade de développement et le diamètre racinaire chez le blé. Il convient cependant de s'interroger sur la nature de cette relation. Elle peut être liée à l'augmentation du diamètre des racines existantes au fur et à mesure que la plante se développe. À l'inverse, il est possible que le diamètre des racines matures n'évolue plus, mais que les nouvelles racines formées présentent un diamètre plus important. Enfin, cette relation pourrait également être liée au développement de talles, qui produisent des racines plus autonomes et possiblement plus larges.

Des études menées sur le maïs ont mis en évidence que, bien que le diamètre des racines matures (séminales, formées tôt) reste stable au cours du temps, les nouvelles racines nodales sont significativement plus épaisses ; ce qui entraîne une augmentation progressive du diamètre moyen mesuré sur l'ensemble du système racinaire (Heymans et al., 2021). Une autre étude réalisée sur l'orge en conditions de culture hydroponiques montre des résultats similaires avec des racines nodales 20% plus épaisses que les racines séminales. Pour l'orge ces différences sont expliquées par des différences majeures dans le développement des vaisseaux de xylème. Les racines nodales contiennent jusqu'à 3 vaisseaux centraux et 10 périphériques pour les racines nodales contre 1 central et 8 périphériques pour les séminales. Ces caractéristiques sont associées à une meilleure efficacité d'absorption et de translocation des nitrates en conditions de concentrations élevées (Z. Liu et al., 2020).

Malheureusement, à ce jour, aucune étude scientifique similaire n'est disponible pour le blé. Mais en transposant ce mécanisme, on peut postuler que le diamètre moyen plus élevé observé à des stades avancés est lié à l'apparition de plus en plus de racines nodales et non à l'augmentation de diamètre des racines séminales. Un autre mémoire réalisé cette année dans la faculté des bioingénieur de l'UCLouvain a démontré que le diamètre des racines nodales semblait effectivement être plus important que celui des racines séminales, confortant l'hypothèse avancée (Dercq C., 2025).

L'analyse des données correspondant à un stade de développement Zadoks antérieur au tallage n'a pas pu être envisagée avec le jeu de données actuel en raison d'une répartition très hétérogène des plantes entre les différents stades. En effet, sur les 84 plantes ne présentant pas de talles visibles, 60 sont classées au stade Zadoks 16. Un test basé sur un modèle linéaire a néanmoins été effectué et n'a révélé aucune p-valeur significative pour le facteur pente. Ce résultat, bien que statistiquement très faible est en adéquation avec l'hypothèse explicative proposée.

5.5.2. Différences entre racines nodales et séminales

Contrairement aux racines séminales, qui apparaissent dès la germination et dont le diamètre reste stable, les racines nodales se forment à partir des entre-nœuds basaux lors du tallage et

présentent un diamètre plus important. Cette différence anatomique est liée à leur origine biologique et à leurs fonctions :

- Racines séminales : Elles se développent lors de la germination et dépendent entièrement des réserves énergétiques contenues dans le germe. Elles doivent optimiser l'exploration du sol avec un investissement énergétique limité. Un compromis subtil est mis en place entre l'investissement dans les parties aériennes et souterraines mais également entre longueur et diamètre racinaire. Leur diamètre réduit permet un rapport longueur/biomasse (Specific Root Length, SRL) élevé et une exploration rapide du sol (Eissenstat, 1992). Les flux nécessaires à l'alimentation des parties aériennes restant relativement limités lors des premières phases végétatives, la plante peut réduire au maximum le diamètre.
- Racines nodales : Elle se développent à un stade plus avancé, la plante dispose déjà d'une biomasse aérienne importante et un accès direct aux assimilats photosynthétiques. L'équilibre d'investissement dans les nouvelles racines est donc différent. Les tissus conducteurs sont plus développés et permettent une quantité de vaisseaux de xylèmes et de phloèmes plus importants entraînant donc naturellement une augmentation du diamètre.

Ce compromis entre exploration (SRL élevé des racines fines) et transport (diamètre élevé des racines nodales) a été largement documenté en physiologie végétale (Eissenstat, 1992). Les racines nodales, en devenant dominantes à des stades avancés, assurent une meilleure connectivité hydraulique et structurent durablement le système racinaire (Jonathan P. Lynch, 2013) jusqu'à devenir responsables de la majorité de la capacité d'absorption de la plante.

Enfin, il est probable que les racines latérales, issues des racines nodales, formées plus tardivement, présentent, elles aussi, un diamètre supérieur à celui des latérales séminales, renforçant ainsi le constat que l'augmentation du diamètre moyen reflète avant tout un remplacement progressif des racines fines par des racines plus larges et plus conductrices.

5.6. Influence des paramètres extérieurs

5.6.1. Influence du système culturale sur les paramètres racinaires

L'absence de différences significatives dans les caractéristiques racinaires mesurées entre les systèmes en association blé-féverole et les monocultures suggère qu'il n'y a pas eu de compétition notable pour les ressources souterraines entre les deux espèces au moment de l'échantillonnage. Les variables racinaires étudiées (diamètre moyen, densité et organisation du système racinaire) n'ont montré aucune modification qui indiquerait un ajustement du blé face à la présence de la féverole. Ce constat est cohérent avec les observations de plusieurs travaux qui soulignent que la compétition racinaire devient visible uniquement lorsque la ressource limitante (azote, eau) est fortement sollicitée (P. Hinsinger et al., 2011).

Un élément important à considérer est la période d'échantillonnage. Les prélèvements ont eu lieu entre mars et mai, période correspondant au début du développement végétatif de la féverole. À ce stade, les nodules fixateurs d'azote de la légumineuse étaient encore peu actifs et n'avaient probablement pas significativement relargué d'azote dans le sol. En conséquence, l'association n'a pas encore pu influencer de manière notable la disponibilité en azote pour le blé, ce qui explique l'absence de différences significatives entre systèmes. Cette dynamique est conforme à celle rapportée par (Jensen, E. S. et al., 2010), qui soulignent que la contribution azotée des légumineuses aux cultures associées est généralement observée après le pic de nodulation et de fixation biologique, soit à un stade plus avancé du cycle (post-floraison).

5.6.2. Influence de la variété génétique

Dans notre expérience, aucune variation significative des traits racinaires (diamètre, densité, structure du système racinaire) n'a été détectée entre les différentes variétés de blé. Cela suggère que, dans le cadre de cette étude de terrain et malgré une diversité génétique, il n'y a pas eu d'influence de la variété sur les caractéristiques racinaires mesurées.

Ce constat est cohérent avec le fait que la sélection génétique du blé s'est, jusqu'à récemment, majoritairement concentrée sur les organes aériens (rendement, hauteur de plante, index de récolte), tandis que les traits racinaires ont été largement négligés (Fradgley et al., 2020; Ren et al., 2017)

Une grande partie des programmes d'amélioration génétique ont exclu la sélection directe des caractéristiques du système racinaire, principalement en raison de la difficulté à mesurer des racines in situ et de leur forte plasticité environnementale (Fradgley et al., 2020).

Des études récentes ont montré que la plupart des efforts de phénotypage se concentrent sur des jeunes plantules en conditions contrôlées, ce qui ne reflète pas les conditions réelles du champ (Ober et al., 2021). Des études menées sur un grand panel de génotypes (297 génotypes de blé de printemps) ont identifié une variabilité génétique significative pour des traits racinaires tels que la longueur totale des racines, le poids racinaire ou la surface racinaire (Narayanan et al., 2014). De même, des analyses GWAS sur des landraces méditerranéens ont démontré l'existence de QTLs associés à des traits racinaires (incluant notamment les racines séminales) expliquant jusqu'à 15 % de la variance phénotypique (Rufo et al., 2020). Cependant, dans notre contexte expérimental — étude en champ, variabilité pédologique importante, échantillonnage relativement limité — ces différences génétiques apparaissent non détectables. Les effets environnementaux et la plasticité des racines masquent très probablement les variations de fond entre variétés.

Sur la base de nos données, il est possible de considérer la population de blé dans son ensemble, sans différencier les variétés sur les traits racinaires pour cette étude. Cela signifie que les différences génétiques, bien qu'existantes, n'ont pas d'impact significatif dans notre jeu de données, et ne justifient pas une stratification expérimentale par variété dans de futures expérimentations de ce type. Toutefois, il convient de souligner que, dans des études mieux contrôlées (contrôle de l'environnement, méthodes de phénotypage haut débit, panels plus larges), des différences racinaires inter-variété peuvent être mises en évidence (Colombo et al.,

2022; Narayanan et al., 2014; Rufo et al., 2020). Dans le contexte de cette étude, conditions de champ variables et échantillonnage limité, les différences génétiques entre variétés ont donc été négligeables sur les traits racinaires mesurés.

5.6.3. Influence des antécédents culturels

L'hétérogénéité des parcelles étudiées doit également être prise en compte. Chaque site présentait des précédents de culture différents, influençant potentiellement les caractéristiques pédologiques (teneur en azote résiduel, structure du sol, densité apparente, biodiversité microbienne). Ces paramètres, bien qu'ils n'aient pas pu être quantifiés statistiquement dans cette étude, sont susceptibles d'avoir fortement contribué à la variabilité observée entre parcelles. Des travaux antérieurs ont, en effet, montré que l'historique cultural modifie durablement l'architecture racinaire et la colonisation mycorhizienne des céréales (Peigné et al., 2018).

5.7. Les modèles d'Open Compas

Le STIR

Il a été possible d'obtenir les valeurs de l'indicateur STIR (Soil Tillage Intensity Rating) pour la saison culturale 2023–2024 pour une partie des parcelles incluses dans cette étude. Toutefois, ces données n'étaient malheureusement pas disponibles pour l'ensemble des sites : les fermes du Tambourin et de l'Escole n'ont pas pu fournir les STIR correspondants. Par ailleurs, l'indicateur STIR pour la saison en cours (2024–2025) n'avait pas encore été calculé au moment de l'analyse.

Malgré ces limitations, une analyse exploratoire de corrélation a été effectuée entre les résultats du QuantiSlake Test et les valeurs STIR disponibles pour la saison 2023–2024. Cette analyse n'a mis en évidence aucune corrélation significative entre les deux indicateurs. Ce résultat peut s'expliquer par la décorrélation temporelle entre les deux ensembles de données. En effet, le STIR de la saison 2023–2024 reflète principalement les pratiques culturales antérieures (rotation, type de culture, niveau de travail du sol), sans tenir compte des interventions spécifiques réalisées après la récolte et avant l'implantation de la culture étudiée. Or, ces interventions post-récolte (faux semis, travail superficiel, reprise mécanique, etc.) ont été significativement différentes entre les parcelles étudiées et ont probablement exercé une influence majeure sur la stabilité structurale du sol mesurée par le QuantiSlake Test.

En conséquence, l'absence de corrélation entre les deux indicateurs semble cohérente d'un point de vue méthodologique. Il sera plus pertinent de réaliser une nouvelle analyse de corrélation une fois que les valeurs du STIR pour la saison 2024–2025 auront été calculées par FFG. Cette mise à jour permettra de comparer les deux indicateurs sur une même période de référence et d'évaluer plus précisément leur convergence ou divergence dans la caractérisation de la qualité structurale des sols.

Bilan humique

Concernant l'analyse des corrélations entre les concentrations en azote et en carbone dans le sol et le bilan humique calculé par l'outil OC (Organique et Carbone), les données n'ont malheureusement pas pu être mises à disposition dans les délais requis pour leur intégration dans le présent travail.

Néanmoins, même si ces données avaient été disponibles, leur exploitation aurait été limitée par la même contrainte temporelle que celle observée pour le STIR : il s'agit en effet des valeurs correspondant à la saison culturale 2023–2024, donc antérieures à la campagne actuelle sur laquelle porte cette étude. Ces bilans humiques ne tiennent pas compte des pratiques culturales récentes, postérieures à la dernière récolte, lesquelles peuvent avoir un effet important sur la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol.

Ainsi, une corrélation avec les mesures actuelles de teneurs en éléments minéraux, issues d'analyses physico-chimiques de sol réalisées en début de culture, aurait été méthodologiquement fragile. Il est donc préférable d'attendre la mise à jour du bilan humique pour la saison 2024–2025, afin de comparer les résultats de manière cohérente sur le plan temporel. Cette approche permettra une meilleure interprétation des relations potentielles entre la gestion des matières organiques, les stocks de carbone et les concentrations réelles mesurées dans le sol au cours de cette étude.

6. Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif d'étudier les facteurs influençant la morphologie racinaire du froment d'hiver. Une attention particulière a été portée sur les conditions pédologiques, la génétique et les associations de cultures. Il s'agissait notamment de mieux comprendre l'impact du développement simultané de la féverole et du froment dans un même espace-temps par rapport à la monoculture. Il s'inscrit dans la continuité des recherches sur les grandes cultures céréalières en agriculture biologique.

Cette étude répond à un manque de connaissance concernant les systèmes racinaires et spécialement leurs développements dans des conditions réelles, en champ, directement chez les agriculteurs. Le développement de cette connaissance vise particulièrement à estimer si les conditions environnementales, hors d'un cadre expérimental contrôlé, influencent les caractéristiques morphologiques des systèmes racinaires. Si on peut démontrer que les paramètres racinaires restent stables malgré certaines variations des conditions environnementales, alors les résultats obtenus dans un contexte expérimental unique pourront être extrapolés à un éventail plus large de situations.

À travers une méthodologie combinant mesures morphométriques, analyses statistiques multivariées, et approches exploratoires sur les données environnementales, cette étude a permis de mettre en lumière plusieurs constats intéressants.

Absence d'effet détectable du système cultural sur les traits racinaires

L'analyse comparative entre le système en association blé-féverole et la monoculture pure n'a révélé aucunes différences significatives au niveau des traits racinaires mesurés. Cette absence de différenciation semble indiquer qu'à l'échelle de la parcelle, au moment de l'échantillonnage (mars-mai), aucune interaction souterraine significative n'est détectable entre les deux espèces. Ces résultats sont en accord avec les connaissances actuelles sur la dynamique temporelle de nodulation et de libération d'azote par les légumineuses ; la fixation symbiotique de l'azote n'atteignant son plein potentiel qu'à partir des stades de développement avancés (post floraison).

Effet du stade de développement

L'un des résultats majeurs de cette étude est la mise en évidence d'une corrélation positive entre stade de développement et diamètres moyen des racines principales et secondaires. Cette observation est cohérente avec le développement progressif de racines nodales, remplaçant progressivement les racines séminales. Celles-ci sont plus larges et ont donc une capacité de transport plus importante. Des études réalisées sur le maïs et l'orge quantifie ces différences de diamètre racinaire et de capacité de transport.

Bien que les données spécifiques au blé restent rares, des études récentes en hydroponie corroborent l'existence de mécanismes similaires chez le froment. Le renforcement de l'architecture racinaire au fur et à mesure du cycle végétatif répond aux besoins croissants de la plante en eau et en nutriments et implique un investissement métabolique plus important

dans des racines à fort diamètre, capables de soutenir la translocation nécessaire à la croissance des parties aériennes.

Variabilité pédologique et hétérogénéité expérimentale

Un autre point intéressant mis en évidence concerne la forte variabilité pédologique entre les parcelles étudiées, notamment concernant le carbone, l'azote et les mesures de stabilité structurale (QuantiSlake Test). Cette hétérogénéité est en partie attribuable aux différences de précédents culturels non-standardisés entre sites et aux différentes intensités de travail du sol. Une parcelle avec un précédent culturel de pomme de terre aura subi un travail du sol beaucoup plus intense qu'un précédent "prairie" par exemple. Les précédents influencent durablement les caractéristiques structurales et biologiques du sol en modifiant notamment la teneur en matières organiques, la densité de racines résiduelles, la porosité ou encore les populations microbiennes.

D'une part, cette hétérogénéité limite la possibilité de tirer des conclusions généralisables entre systèmes et nécessite de considérer une stratification expérimentale par type de précédent culturel comme une possible amélioration méthodologique. D'autre part, le fait que les caractéristiques racinaires ne varient pas significativement malgré l'hétérogénéité du contexte suggère que le système racinaire du froment est relativement stable vis-à-vis des paramètres mesurés dans la gamme de variation observée. Ce constat est encourageant car il permet à de futures études, centrées sur d'autres variables, de sélectionner des parcelles présentant une certaine hétérogénéité pédologique sans compromettre la fiabilité des mesures racinaires. En clarifiant ainsi les facteurs non déterminants, cette étude contribue à élargir le spectre de conditions expérimentales compatibles avec l'analyse des traits racinaires du blé.

Négligence historique des caractères racinaires dans la sélection variétale

Une autre dimension analysée dans ce travail est l'impact potentiel de la variété génétique sur la morphologie racinaire. L'analyse statistique n'a révélé aucune différence significative entre les variétés en termes de diamètre et de densité racinaire. Ce résultat est à mettre en perspective avec l'historique des programmes de sélection qui ont, jusqu'à récemment, privilégié des critères liés aux parties aériennes au détriment des traits racinaires longtemps considérés comme secondaires (Waines & Ehdaie, 2007). -89-

Plusieurs études ont néanmoins démontré l'existence d'une variabilité génétique exploitable pour des traits comme la longueur racinaire, la densité ou la profondeur d'ancrage (Maccaferri et al., 2016; Slack et al., 2018). Toutefois, ces différences ne se manifestent souvent que dans des conditions environnementales très contrôlées ou en situation de stress marqué, ce qui n'était pas le cas dans notre étude. Ainsi, pour des expérimentations de terrain à grande variabilité, il semble acceptable de considérer la population de blé comme globalement homogène pour les traits racinaires, à moins de disposer de données génétiques précises ou d'un contexte très différencié. Il faut aussi garder en mémoire que la méthode de prélèvement shovelomix limite les données exploitables, la longueur racinaire par exemple n'a pas pu être mesurée par cette méthode.

Farm for good et Open Compass

Un des objectifs sous-jacents de ce travail était de comparer les données collectées sur le terrain avec les modèles de l'outil OC, basé sur les pratiques agricoles (intensité du travail du sol, type et quantité de fertilisant, etc). Malheureusement, les deux indicateurs d'intérêt, le STIR et le bilan humique, sont calculés par OC à la fin de la saison de culture, ils ne seront donc pas disponibles avant la clôture de cette étude. Néanmoins, si l'intérêt de FFG pour ces données de terrain persiste, la comparaison reste tout à fait possible une fois leurs indicateurs calculés. Les données sont disponibles auprès du professeur Guillaume Lobet, de la faculté des bioingénieur de l'UCLouvain,

7. Limites et perspectives

7.1. Limites et données non exploitées

Une partie des informations collectées lors de ce mémoire n'ont pas été reprises dans le traitement de données notamment, la biomasse aérienne et les précédents de culture. Cette décision découle du manque de répétition pour ces variables conduisant obligatoirement à une pertinence statistique insuffisante. Cependant, ces variables ont probablement un impact assez significatif, les études ultérieures devront faire ce qui est possible pour en tenir compte.

Une autre partie des données analysées au cours du traitement statistique n'a pas révélé d'effets significatifs, malgré une variabilité notable entre les échantillons. Il est toutefois essentiel de préciser qu'une absence de différence statistiquement significative ne doit pas être interprétée comme une preuve de l'absence totale de différence biologique. Il s'agit en réalité d'un résultat à part entière, qui mérite d'être interprété avec nuance, en tenant compte de plusieurs limites inhérentes à la présente étude.

Premièrement, les observations ont été réalisées à des stades précoces de développement des plantes : durant les phases végétatives avant l'apparition des organes reproducteurs. Or, les dynamiques racinaires évoluent considérablement au cours du cycle de croissance. Des changements majeurs se produisent aux stades phénologiques critiques, notamment en période de tallage avancé, de montaison ou de floraison, où les besoins en eau et en nutriments augmentent significativement. Il est donc probable que des différences structurales ou fonctionnelles au sein des systèmes racinaires, non détectées ici, apparaissent ou se renforcent à des stades ultérieurs.

Deuxièmement, bien que des paramètres pédologiques aient été rigoureusement intégrés dans l'analyse (via le QuantiSlake Test, des mesures physico-chimiques et l'évaluation indirecte des antécédents culturels), le sol reste un système extrêmement complexe, dynamique et hétérogène. Il constitue un environnement biophysique riche en interactions multiples entre racines, microbiote, matière organique, minéraux, humidité et résidus de cultures. De nombreux facteurs potentiellement influents — tels que l'activité microbienne, la composition des exsudats racinaires, la dynamique des mycorhizes ou la structuration des micropores — n'ont pas pu être mesurés dans cette étude, soit par manque de données, soit pour des raisons logistiques. Il est donc plausible que des effets existent mais qu'ils soient dilués, masqués ou non détectables avec les outils utilisés.

Troisièmement, et de manière plus méthodologique, le fait de ne pas détecter de différence sur un paramètre donné ne signifie pas que la différence n'existe pas. Cela indique simplement que, dans les conditions expérimentales de cette étude, avec les instruments et la résolution choisis, aucun signal clair n'a émergé. Cette constatation ne remet pas en cause la rigueur des analyses mais souligne l'importance de concevoir des protocoles plus sensibles ou adaptés à la variabilité naturelle du système.

En somme, l'absence de résultats significatifs sur certains paramètres ne constitue pas une impasse, mais plutôt un point de départ vers une amélioration des dispositifs expérimentaux. Elle met en lumière les défis liés à l'étude de systèmes racinaires en conditions de terrain et propose une réflexion sur la manière de mieux capter, dans de futures recherches, la complexité de ces structures souterraines. Ces éléments, loin d'être anecdotiques, contribuent à enrichir les perspectives méthodologiques décrites dans la section suivante, et ouvrent la voie à des expérimentations plus intégratives et plus robustes.

7.2. Perspectives de recherche

Les résultats de ce travail ouvrent plusieurs pistes d'amélioration méthodologique pour de futures recherches sur les systèmes racinaires du blé d'hiver en conditions réelles de culture. L'analyse critique des limites de l'étude actuelle permet en effet de dégager des recommandations concrètes quant aux modalités expérimentales optimales à privilégier.

Tout d'abord, pour améliorer la comparabilité des données racinaires, il serait pertinent de réaliser tous les prélèvements au même stade de développement phénologique, idéalement basé sur l'échelle de Zadoks. L'une des limites majeures de l'étude actuelle réside en effet dans l'hétérogénéité des stades au moment de l'échantillonnage ; ce qui a compliqué l'interprétation des résultats et a pu masquer des effets spécifiques à certains moments clés du cycle de développement, notamment lors du tallage ou de la floraison.

Par ailleurs, l'harmonisation des précédents de culture représente un autre axe d'amélioration essentiel. Comme démontré par plusieurs études (Al-Kaisi & Tenesaca, 2021; Chen et al., 2014), les cultures précédentes influencent durablement les propriétés physiques, biologiques et chimiques des sols. Sélectionner des parcelles ayant des antécédents similaires permettrait de réduire l'hétérogénéité pédologique et de mieux isoler les effets des facteurs expérimentaux étudiés.

Cependant, ces ajustements méthodologiques se heurtent à des contraintes pratiques notables. Ce mémoire a été réalisé dans le cadre du réseau FFG, constitué uniquement de fermes en agriculture biologique, ce qui a déjà restreint de manière significative le choix de parcelles. De plus, la synchronisation des prélèvements sur l'ensemble des sites représente un défi logistique majeur, exigeant une mobilisation importante de main-d'œuvre en un laps de temps restreint.

D'autres variables pourraient également être standardisées dans les expérimentations futures afin de réduire les sources de variabilité non contrôlées. C'est notamment le cas de la variété génétique, qui n'a montré aucune influence significative sur les traits racinaires dans le cadre de cette étude. Sa fixation permettrait de concentrer l'analyse sur les effets environnementaux ou culturels, tout en réduisant la complexité du modèle statistique.

Une autre limite importante de cette étude tient à la fenêtre temporelle sur laquelle se sont déroulées les observations, de mars à mai. Cette période ne permet pas de lier les traits racinaires précoces à des indicateurs de performance agronomique tels que le rendement

grainier, la biomasse finale ou la teneur en protéines. Or, cette mise en relation est cruciale, notamment dans une perspective d'évaluer l'effet des associations culturales sur la productivité ou la robustesse des systèmes.

Enfin, l'enrichissement du modèle par l'intégration de paramètres complémentaires offrirait des perspectives particulièrement intéressantes. Des données sur la couverture foliaire, le taux de levée, l'activité biologique du sol ou la colonisation mycorhizienne permettraient de mieux comprendre les interactions plante-sol-environnement et d'accroître la précision des analyses. Ces variables constitueraient des axes privilégiés pour des modèles multivariés plus complexes, capables de capter la multi dimensionnalité des réponses biologiques.

Références

- Agegnehu, G., Ghizaw, A., & Sinebo, W. (2008). Yield potential and land-use efficiency of wheat and faba bean mixed intercropping. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(2), 257-263. <https://doi.org/10.1051/agro:2008012>
- Al-Kaisi, M. M., & Tenesaca, C. (2021). In-Field Corn Residue Management for Bioenergy Use : Potential Effects on Selected Soil Health Parameters. *Open Journal of Soil Science*, 11(4), 241-255. <https://doi.org/10.4236/ojss.2021.114013>
- Arifuzzaman, M., Oladzadabbasabadi, A., McClean, P., & Rahman, M. (2019). Shovelomics for phenotyping root architectural traits of rapeseed/canola (*Brassica napus* L.) and genome-wide association mapping. *Molecular Genetics and Genomics*, 294(4), 985-1000. <https://doi.org/10.1007/s00438-019-01563-x>
- Audsley, E., Stacey, K., & Williams, A. (2009). *Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use*. Cranfield University. 10.13140/RG.2.1.5095.3122
- Bouma, T. J., Nielsen, K. L., & Koutstaal, B. (2000). Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter. *Plant and Soil*, 218(1), 185-196. <https://doi.org/10.1023/A:1014905104017>
- Bulson, H. A. J., Snaydon, R. W., & Stopes, C. E. (1997). Effects of plant density on intercropped wheat and field beans in an organic farming system. *The Journal of Agricultural Science*, 128(1), 59-71. <https://doi.org/10.1017/S0021859696003759>
- CARTRYSSÉ C., CAMPION M., VAN DER VERREN B, VANNOPPEN N., WAVREILLE J., & SILVESTRE P. (2024). *La féverole Une légumineuse à graines riches en protéines et en énergie*. CePiCOP asbl ; CRA-W ; Biowallonie asbl.
- Cartrysse, C., Campion, M., Van Der Verren, V.B., Vannoppen N., WAVREILLE J., & Silvestre P. (2024). *LA FÉVEROLE : Une légumineuse à graines riches en protéines et en énergie*. CePiCOP asbl.
- Chen, B., Liu, E., Tian, Q., Yan, C., & Zhang, Y. (2014). Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 429-442. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0207-8>

- Chevalier, B. & Bersonnet C. (2015). *Cultiver du blé associé à une plante compagne*. CAP Filière Grandes cultures Région Centre-Val de Loire.
- Chu, G. X., Shen, Q. R., & Cao, J. L. (2004). Nitrogen fixation and N transfer from peanut to rice cultivated in aerobic soil in an intercropping system and its effect on soil N fertility. *Plant and Soil*, 263(1), 17-27. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047722.49160.9e>
- Colombo, M., Roumet, P., Salon, C., Jeudy, C., Lamboeuf, M., Lafarge, S., Dumas, A.-V., Dubreuil, P., Ngo, W., Derepas, B., Beauchêne, K., Allard, V., Le Gouis, J., & Rincet, R. (2022). Genetic Analysis of Platform-Phenotyped Root System Architecture of Bread and Durum Wheat in Relation to Agronomic Traits. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.853601>
- Cope, J. E., Berckx, F., Lundmark, J., Henriksson, T., Karlsson, I., & Weih, M. (2024). Clear effects on root system architecture of winter wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) from cultivation environment and practices. *Scientific Reports*, 14(1), 11099. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61765-1>
- Curtis, B.C., Rajaram S., & Gómez Macpherson H. (2002). *BREAD WHEAT Improvement and Production*. <https://www.fao.org/4/y4011e/y4011e00.htm#Contents>
- Dercq C. (2025). *Étude de l'effet de la densité de féverole (Vicia faba) sur le développement racinaire du froment (Triticum aestivum) en culture associée*. UCLouvain.
- Eissenstat, D. M. (1992). Costs and benefits of constructing roots of small diameter. *Journal of Plant Nutrition*, 15(6-7), 763-782. <https://doi.org/10.1080/01904169209364361>
- European Commission. Directorate General for Research and Innovation. (2023). *Food 2030 : Pathways for action 2.0 : R&I policy as a driver for sustainable, healthy, climate resilient and inclusive food systems*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/365011>
- Fang, H., Zi-wen, X., Hai-gang, L., Yan, G., Bao-guo, L., Yun-ling, L., & Yun-tao, M. (2022). Image-based root phenotyping for field-grown crops : An example under maize/soybean intercropping. *Journal of Integrative Agriculture*, 21(6), 1606-1619. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63571-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63571-7)
- Fédération Wallonne de l'Agriculture. (2022). *Protéines végétales en Wallonie état des lieux et perspectives*.
- Fradgley, N., Evans, G., Biernaskie, J. M., Cockram, J., Marr, E. C., Oliver, A. G., Ober, E., & Jones, H. (2020). Effects of breeding history and crop management on the root architecture of

wheat. *Plant and Soil*, 452(1-2), 587-600. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04585-2>

G. Lobet. (2024). *Cours de productions végétales (LBIRA2108)*.

Godin B. (2023, décembre 20). Qualité technologique des céréales alimentaires au regard du choix variétal, de la fumure azotée et des produits de protection des plantes en agriculture biologique. *CRA-W*. <https://www.cra.wallonie.be/fr/technocerbio>

Guignard, M. S., Leitch, A. R., Acquisti, C., Eizaguirre, C., Elser, J. J., Hessen, D. O., Jeyasingh, P. D., Neiman, M., Richardson, A. E., Soltis, P. S., Soltis, D. E., Stevens, C. J., Trimmer, M., Weider, L. J., Woodward, G., & Leitch, I. J. (2017). Impacts of Nitrogen and Phosphorus : From Genomes to Natural Ecosystems and Agriculture. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 70. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00070>

Hailu Gebru. (2015). A Review on the Comparative Advantages of Intercropping to Monocropping System. *Journal of Biology*.

Hannah Ritchie. (2024). How will climate change affect crop yields in the future? *OurWorldinData.org*.

Harrison, P. (2002). *Agriculture mondiale : Horizon 2015/2030*. FAO. <https://www.fao.org/4/y3557f/y3557f00.htm#TopOfPage>

Heymans, A., Couvreur, V., & Lobet, G. (2021). Combining cross-section images and modeling tools to create high-resolution root system hydraulic atlases in *ZEA MAYS*. *Plant Direct*, 5(7), e00290. <https://doi.org/10.1002/pld3.334>

Hupe, A., Naether, F., Haase, T., Bruns, C., Heß, J., Dyckmans, J., Joergensen, R. G., & Wichern, F. (2021). Evidence of considerable C and N transfer from peas to cereals via direct root contact but not via mycorrhiza. *Scientific Reports*, 11(1), 11424. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90436-8>

I. Lartigot. (2024). *Guide de culture féverole 2024*. Terres Inovia.

Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A. C., Elliott, J., Balkovic, J., Castillo, O., Faye, B., Foster, I., Folberth, C., Franke, J. A., Fuchs, K., Guarin, J. R., Heinke, J., Hoogenboom, G., Iizumi, T., Jain, A. K., Kelly, D., Khabarov, N., Lange, S., ... Rosenzweig, C. (2021). Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food*, 2(11), 873-885. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>

Jensen, E. S., Peoples, M. B., & Hauggaard-Nielsen, H. (2010). Faba bean in cropping systems. *Field Crops Res.*, 115 (3): 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.008>

- Johansen, A., & Jensen, E. S. (1996). Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley interconnected by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(1), 73-81. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00117-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00117-4)
- Jonathan P. Lynch. (2013, janvier 17). *Steep, cheap and deep : An ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems*. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs293>
- Levy, A. A., & Feldman, M. (2022). Evolution and origin of bread wheat. *The Plant Cell*, 34(7), 2549-2567. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac130>
- Lichtenegger, E. (2009a). *Triticum aestivum* [Image]. Kutschera, L.; Lichtenegger, E.; Sobotik, M., Würzelatlas der Kulturpflanzen gemässiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. - Frankfurt am Main : DLG-Verlag, 2009 (2. Aufl. 2018). - 527 p. <https://images.wur.nl/digital/collection/coll13/id/1002/rec/2>
- Lichtenegger, E. (2009b). *Vicia faba* [Image]. Kutschera, L.; Lichtenegger, E.; Sobotik, M., Würzelatlas der Kulturpflanzen gemässiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. - Frankfurt am Main : DLG-Verlag, 2009 (2. Aufl. 2018). - 527 p. <https://images.wur.nl/digital/collection/coll13/id/1037/rec/1>
- Liu, Y. C., Qin, X. M., Xiao, J. X., Tang, L., Wei, C. Z., Wei, J. J., & Zheng, Y. (s. d.). *Intercropping influences component and content change of flavonoids in root exudates and nodulation*.
- Liu, Z., Giehl, R. F. H., Hartmann, A., Hajirezaei, M. R., Carpentier, S., & Von Wirén, N. (2020). Seminal and Nodal Roots of Barley Differ in Anatomy, Proteome and Nitrate Uptake Capacity. *Plant and Cell Physiology*, 61(7), 1297-1308. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcaa059>
- Lobet, G., & Draye, X. (2013). Novel scanning procedure enabling the vectorization of entire rhizotron-grown root systems. *Plant Methods*, 9(1), 1. <https://doi.org/10.1186/1746-4811-9-1>
- Lopez, G., Ahmadi, S. H., Amelung, W., Athmann, M., Ewert, F., Gaiser, T., Gocke, M. I., Kautz, T., Postma, J., Rachmilevitch, S., Schaaf, G., Schnepf, A., Stoschus, A., Watt, M., Yu, P., & Seidel, S. J. (2023). Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1067498. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1067498>
- Lynch Jonathan P. (2007). Roots of the Second Green Revolution. *Australian Journal of Botany* 55, 493-512. <https://doi.org/10.1071/BT06118>

- Maccaferri, M., El-Feki, W., Nazemi, G., Salvi, S., Canè, M. A., Colalongo, M. C., Stefanelli, S., & Tuberosa, R. (2016). Prioritizing quantitative trait loci for root system architecture in tetraploid wheat. *Journal of Experimental Botany*, 67(4), 1161-1178. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw039>
- Morris, R. A., & Garrity, D. P. (1993). Resource capture and utilization in intercropping : Water. *Field Crops Research*, 34(3-4), 303-317. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90119-8](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90119-8)
- Narayanan, S., Mohan, A., Gill, K. S., & Prasad, P. V. V. (2014). Variability of Root Traits in Spring Wheat Germplasm. *PLOS ONE*, 9(6), e100317. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100317>
- Nowak B. (2024). *Mémo visuel d'agronomie Enjeux et défis de l'agriculture expliqués en 100 infographies* (Dunod). <https://www.dunod.com/sciences-techniques/memo-visuel-d-agronomie-enjeux-et-defis-agriculture-expliques-en-100>
- Ober, E. S., Alahmad, S., Cockram, J., Forestan, C., Hickey, L. T., Kant, J., Maccaferri, M., Marr, E., Milner, M., Pinto, F., Rambla, C., Reynolds, M., Salvi, S., Sciara, G., Snowdon, R. J., Thomelin, P., Tuberosa, R., Uauy, C., Voss-Fels, K. P., ... Watt, M. (2021). Wheat root systems as a breeding target for climate resilience. *TAG. Theoretical and Applied Genetics. Theoretische Und Angewandte Genetik*, 134(6), 1645-1662. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03819-w>
- Ogilvie, C. M., Ashiq, W., Vasava, H. B., & Biswas, A. (2021). Quantifying Root-Soil Interactions in Cover Crop Systems : A Review. *Agriculture*, 11(3), 218. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030218>
- P. Durand. (2023). *Blé tendre d'hiver, Association féverole*. Chambre d'agriculture Hauts-De-France.
- P. Hinsinger, E. Betencourt, L. Bernard, A. Brauman, F. Zhang, C. Plassard, X. Tang, & J. Shen. (2011, avril 20). P for Two, Sharing a Scarce Resource : Soil Phosphorus Acquisition in the Rhizosphere of Intercropped Species. *Plant Physiology, Volume 156, Issue 3, July 2011, Pages 1078–1086*,. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175331>
- Peigné, J., Vian, J.-F., Payet, V., & Saby, N. P. A. (2018). Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 175, 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.008>

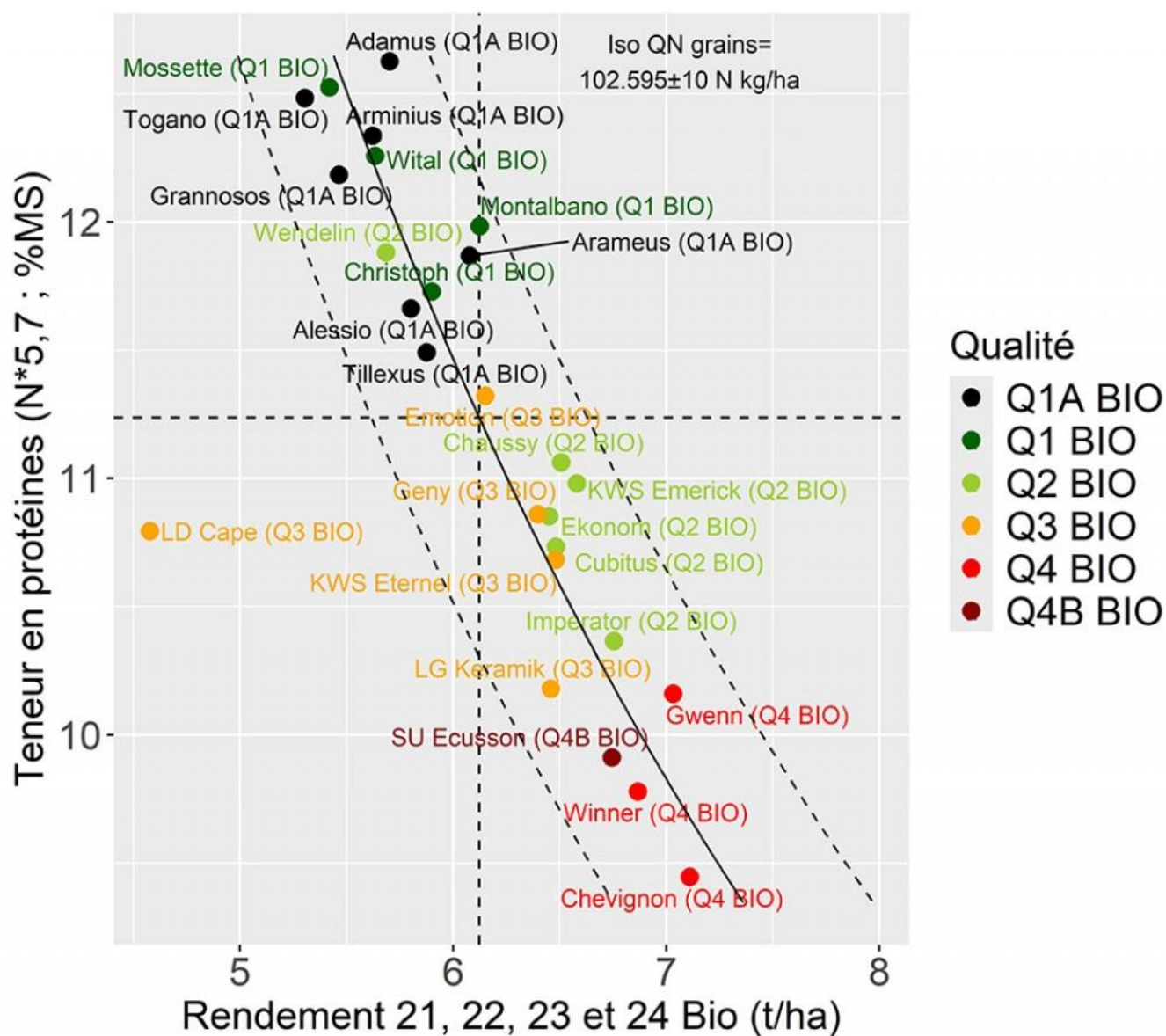
- Ren, Y., Qian, Y., Xu, Y., Zou, C., Liu, D., Zhao, X., Zhang, A., & Tong, Y. (2017). -87- Characterization of QTLs for Root Traits of Wheat Grown under Different Nitrogen and Phosphorus Supply Levels. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2096. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02096>
- Robert Costanza & Karin Limburg. (s. d.). *The value of the world's ecosystem services and natural capital*.
- Rufo, R., Salvi, S., Royo, C., & Soriano, J. M. (2020). Exploring the Genetic Architecture of Root-Related Traits in Mediterranean Bread Wheat Landraces by Genome-Wide Association Analysis. *Agronomy*, 10(5), 613. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050613>
- Salinas-Roco, S., Morales-González, A., Espinoza, S., Pérez-Díaz, R., Carrasco, B., Del Pozo, A., & Cabeza, R. A. (2024). N₂ Fixation, N Transfer, and Land Equivalent Ratio (LER) in Grain Legume–Wheat Intercropping : Impact of N Supply and Plant Density. *Plants*, 13(7), 991. <https://doi.org/10.3390/plants13070991>
- Schneider, K., Barreiro-Hurle, J., & Rodriguez-Cerezo, E. (2023). Pesticide reduction amidst food and feed security concerns in Europe. *Nature Food*, 4(9), 746-750. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00834-6>
- Shao, Z., Wang, X., Gao, Q., Zhang, H., Yu, H., Wang, Y., Zhang, J., Nasar, J., & Gao, Y. (2020). Root Contact between Maize and Alfalfa Facilitates Nitrogen Transfer and Uptake Using Techniques of Foliar ¹⁵N-Labeling. *Agronomy*, 10(3), 360. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030360>
- Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178-202. <https://doi.org/10.1002/fes3.64>
- Skea J., Calvo Buendia, & Shukla P.R. (2019). *IPCC, 2019 : Summary for Policymakers. In : Climate Change and Land : An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (p. 1-36). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>
- Slack, S., York, L. M., Roghazai, Y., Lynch, J., Bennett, M., & Foulkes, J. (2018). *Wheat shovelomics II : Revealing relationships between root crown traits and crop growth*. Plant Biology. <https://doi.org/10.1101/280917>
- SPW ARNE. (2024). *Productions végétales*. <http://etat.agriculture.wallonie.be>

- Streit, J. (2019). -51-Biomass, root distribution and overyielding potential of faba bean/wheat and white clover/ryegrass mixtures [Doctoral Thesis, Georg-August-University Göttingen]. <https://doi.org/10.53846/goediss-7276>
- Sytra. (2021). *Filière wallonne des céréales*.
- Trachsel, S., Kaeppler, S. M., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2011). -63-Shovelomics : High throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. *Plant and Soil*, 341(1-2), 75-87. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0623-8>
- V. Michaud, D. Rosillon, Y. Curnel, & V. Planchon. (2024, 2025). *Bilan Bioclimatique en Wallonie*. CRA-W Département Productions agricoles / Unité Agriculture, territoire et intégration technologique.
- Vanwindekens, F. M., & Hardy, B. F. (2023). -65-The QuantiSlakeTest, measuring soil structural stability by dynamic weighing of undisturbed samples immersed in water. *SOIL*, 9(2), 573-591. <https://doi.org/10.5194/soil-9-573-2023>
- Vestergaard, N. F., & Jørgensen, L. N. (2024). -54-Variety mixtures of winter wheat : A general status and national case study. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 131(4), 1127-1136. <https://doi.org/10.1007/s41348-023-00856-z>
- Waines, J. G., & Ehdaie, B. (2007). -89-Domestication and Crop Physiology : Roots of Green-Revolution Wheat. *Annals of Botany*, 100(5), 991-998. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm180>
- Walter V Reid, Harold Alfred Mooney, Kartik Chopra, & Stephen R. Carpenter. (2005). *Ecosystems and human well-being : Synthesis*. Island Press.
- Wang, Z., Dong, B., Stomph, T. J., Evers, J. B., L. Van Der Putten, P. E., Ma, H., Missale, R., & Van Der Werf, W. (2023). Temporal complementarity drives species combinability in strip intercropping in the Netherlands. *Field Crops Research*, 291, 108757. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108757>
- Wuletaw Tadesse. (2019). Genetic Gains in Wheat Breeding and Its Role in Feeding the World. *Crop Breeding, Genetics and Genomics*. <https://doi.org/10.20900/cbagg20190005>
- Xiao, Y., Li, L., & Zhang, F. (2004). Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect¹⁵ N techniques. *Plant and Soil*, 262(1/2), 45-54. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000037019.34719.0d>
- Yahuza, I. (2011). *Wheat /faba bean intercropping system in perspective*.

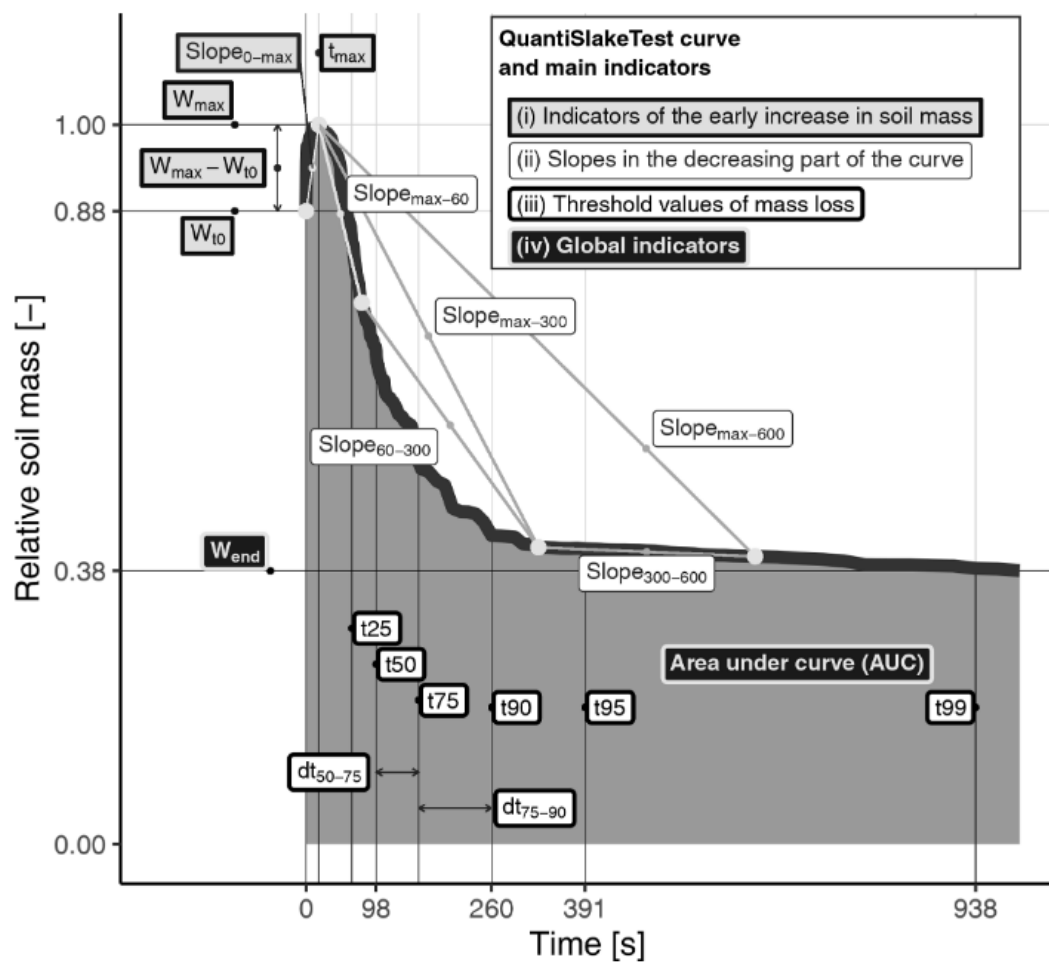
- Yahuza, I. (2012). *Effect of seed rate on the seed yields in wheat/faba bean intercropping system : A competition approach*.
- Yildiz, D. (2024, mars 11). Global Wheat Supply and Demand & 2024 Expectations. *Feed Additive INTERNATIONAL MAGAZINE FOR ANIMAL FEED & ADDITIVES INDUSTRY*.
<https://www.feedandadditive.com/global-wheat-supply-and-demand-2024-expectations/>
- Yu, Y. (2016). *Crop yields in intercropping : Meta-analysis and virtual plant modelling* [Wageningen University]. <https://doi.org/10.18174/378297>
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415-421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zhang, J., Zheng, Y., Ma, G., Guo, Z., & Dong, Y. (2024). Optimal N Application Improves Interspecific Relationship, Productivity and N Utilization in Wheat/Faba Bean Intercropping. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 2838-2850. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01708-x>
- Zhou, W., Li, M., & Achal, V. (2025). -19-A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100410. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410>

8. Annexe

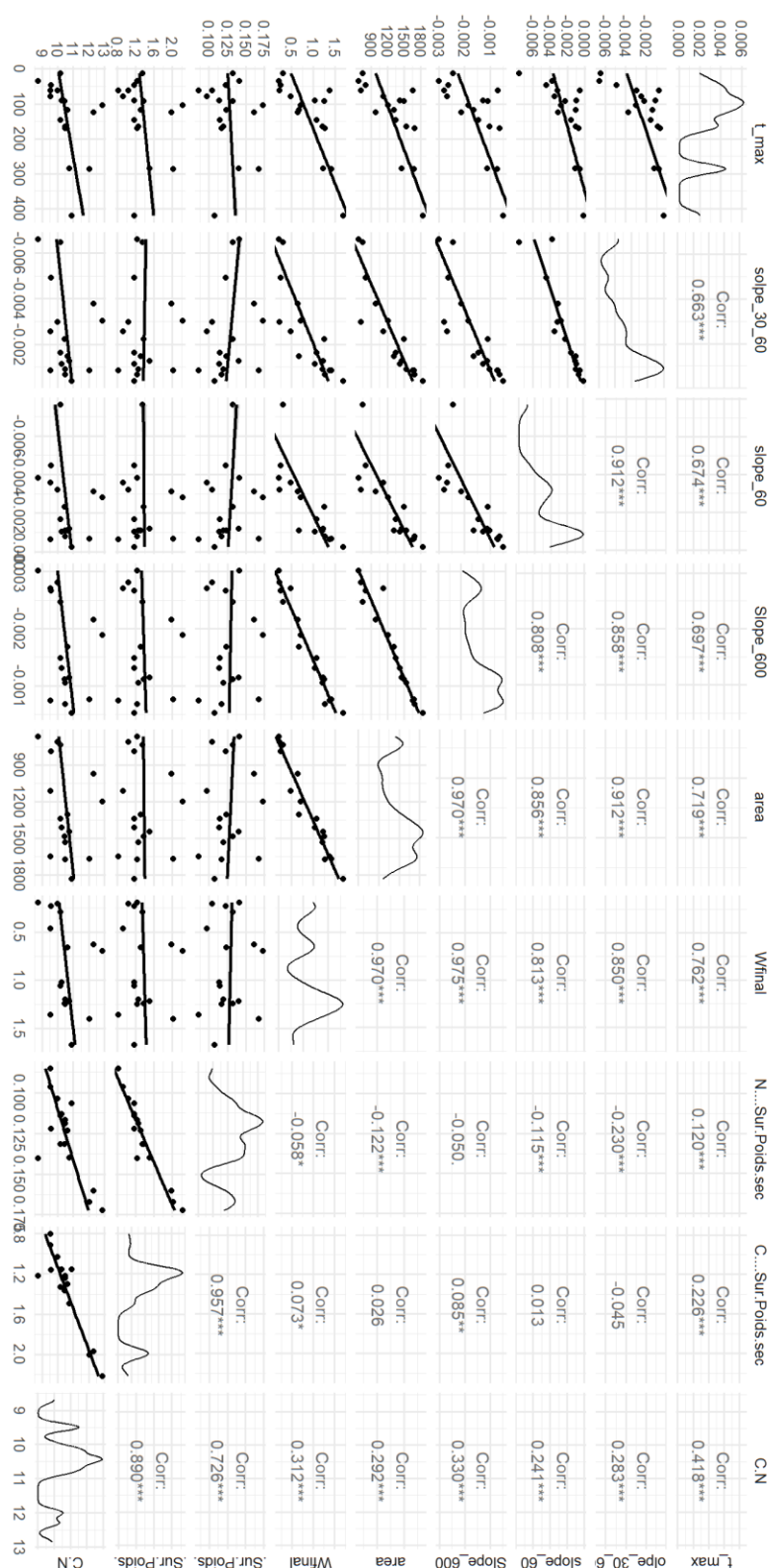
Annexe 1 : Catégories de qualité technologique des froments spécifiques à l'AV en Wallonie – 2025 (Godin B. 2025)



Annexe 2 : Principaux paramètres obtenus à partir d'une courbe QuantiSlake Test
(Vanwindekens & Hardy, 2023)



Annexe 3 : GGPairé reprenant la corrélation entre les différents paramètres pédologiques



Annexe 4 : Analyse granulométrique (réalisée par le laboratoire MOCA le 22/07/2025)

	% sables	% LG	% LF	% A	% somme
JGE-1 1	50,01	6,66	16,15	27,19	100,00
JGE-1 2	48,44	15,29	13,26	23,01	100,00
JGE-1 3	44,80	16,58	15,46	23,16	100,00
JGE-1 4	29,91	21,11	20,40	28,58	100,00
JGE-1 5	35,45	19,75	19,54	25,26	100,00
JGE-1 6	27,44	24,09	20,20	28,26	100,00
JGE-1 7	34,32	21,57	17,71	26,40	100,00
JGE-1 8	36,84	21,08	17,76	24,31	100,00
JGE-1 9	36,74	20,40	18,23	24,64	100,00
JGE-1 10	23,93	27,05	19,21	29,82	100,00
JGE-1 11	40,23	17,62	17,13	25,02	100,00
JGE-1 12	41,94	14,41	16,12	27,53	100,00
JGE-1 13	34,51	23,93	17,48	24,09	100,00
JGE-1 14	37,21	20,99	17,87	23,93	100,00
JGE-1 15	12,49	34,08	22,80	30,64	100,00
JGE-1 16	13,04	21,85	29,18	35,93	100,00
JGE-1 17	31,50	24,36	15,03	29,11	100,00

Annexe 5 : Paramètres spécifiques utilisés dans VueScan64 pour les scans racinaires du froment d'hiver

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

Étude en champ de l'architecture racinaire du froment d'hiver (*Triticum aestivum*) : effets du contexte pédologique, des pratiques culturales et de l'association froment-féverole (*Vicia faba*)

Jeremiah Georges

L'agriculture moderne est confrontée à un double défi : maintenir des rendements acceptables et réduire l'impact environnemental de ses activités. Le froment (*Triticum aestivum*), illustre ces défis, notamment à travers ses besoins en intrants et son importance dans la sécurité alimentaire. Pourtant, les systèmes racinaires, éléments clés de la résilience des plantes et de l'efficacité dans l'usage des ressources, restent relativement peu étudiés, spécialement en conditions non contrôlées. Une compréhension plus fine de leur développement et de leurs interactions avec les pratiques culturales pourrait ouvrir la voie à des améliorations significatives de nos systèmes agricoles. Dans ce contexte, ce mémoire évalue l'impact des pratiques agricoles, du système de culture (monoculture versus association avec la féverole *Vicia faba*) et des propriétés pédologiques sur l'architecture racinaire du froment en conditions de champ. L'approche combine des observations morphologiques des racines, des mesures de stabilité structurale du sol via le QuantiSlake Test, ainsi que des analyses pédologiques détaillées.

Les résultats mettent en évidence une forte hétérogénéité des environnements étudiés, tant au niveau de la structure du sol que des paramètres chimiques. Cependant, ces différences n'ont pas conduit à des effets statistiquement détectables sur les traits racinaires mesurés. Le stade de développement apparaît en revanche comme le facteur déterminant du diamètre racinaire. Les variations observées s'expliquent très probablement par l'apparition de nouvelles racines plus larges au fur et à mesure de la croissance, plutôt que par une augmentation du diamètre des racines déjà formées. Ni le système de culture ni la variété génétique testée n'ont montré d'effet significatif.

Ces résultats soulignent l'importance de maîtriser l'effet du stade phénologique dans les études sur les systèmes racinaires, en privilégiant des prélèvements à stades comparables pour limiter cette influence. Ils suggèrent également que, dans le cadre d'analyses centrées sur le diamètre racinaire, le choix de la variété génétique n'est pas nécessairement critique. Enfin, cette recherche ouvre des perspectives pour des approches plus ciblées et intégratives, capables de mieux caractériser les interactions entre sol, pratiques culturales et développement racinaire, afin d'identifier des leviers agronomiques pertinents pour améliorer la résilience et la durabilité des cultures de froment.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs

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

