

Influence d'une source azotée sur le développement de deux adventices et l'avantage compétitif que pourrait en retirer le froment d'hiver

Auteur : Hermans, Camille

Promoteur(s) : Vanderschuren, Hervé; Thonar, Cécile

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13856>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**INFLUENCE D'UNE SOURCE AZOTEE SUR LE
DEVELOPPEMENT DE DEUX ADVENTICES
ET L'AVANTAGE COMPETITIF QUE
POURRAIT EN RETIRER LE FROMENT
D'HIVER**

CAMILLE HERMANS

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

ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022

CO-PROMOTEURS : HERVE VANDERSCHUREN ET CECILE THONAR

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

Le présent document n'engage que son auteur.

**INFLUENCE D'UNE SOURCE AZOTEE SUR LE
DEVELOPPEMENT DE DEUX ADVENTICES
ET L'AVANTAGE COMPETITIF QUE
POURRAIT EN RETIRER LE FROMENT
D'HIVER**

CAMILLE HERMANS

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

ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022

CO-PROMOTEURS : HERVE VANDERSCHUREN ET CECILE THONAR

Remerciements

Ce travail de fin d'études n'aurait pas pu être mené à bien sans l'aide de plusieurs personnes.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon co-promoteur Hervé Vanderschuren pour son encadrement et ses conseils apportés aux moments opportuns. J'aimerais également remercier chaleureusement Cécile Thonar pour son soutien sans faille, son aide précieuse et sa disponibilité qui m'ont été indispensables pour la réalisation de ce travail. Merci de m'avoir transmis votre intérêt pour cette thématique stimulante et de m'avoir donné confiance en moi pour réaliser ma propre expérience de A à Z. Je suis heureuse d'avoir pu apprendre à vos côtés et j'espère que notre collaboration ne s'arrêtera pas au terme de ce TFE.

Je souhaiterais ensuite remercier toutes les personnes qui m'ont aidée de loin ou de près pour ce travail. Tout d'abord Lucas, Maxime, Sok Lay, Ivan Jauregui et Pierre Delaplace, Benoît Mercatoris, Yves Brostaux mais également toutes les personnes du laboratoire ayant pris le temps de répondre à mes questions.

Je remercie aussi le CRA-W et plus particulièrement François Henriet et Eléonore Malice pour leurs conseils pratiques ainsi que la Région Wallonne qui a subventionné le projet GAIN dans lequel s'inscrit ce travail de fin d'études (phase 2 de la convention).

Je ne peux évidemment pas écrire ces remerciements sans penser aux premières personnes que j'ai rencontrées en entrant dans ces murs de Gembloux et qui sont devenus durant toutes mes études mes amis de guindaille, de confiance, d'étude, d'excursion, de rigolade, ... et pour je l'espère encore un long moment. J'ai nommé Justine et son légendaire manque de tact, Pauline la plus discrète mais la plus attentionnée, Méla la plus gundailleuse (sorry), Marie toujours au courant des derniers ragots, Thomas le mâle alpha parmi ses femmes, Marie et son horrible cri (RIP la semaine office) et enfin le meilleur pour la fin, Chloé la présidente de la cinsi et une amie formidable.

Bien sûr j'aimerais aussi dédicacer un petit mot pour mes chers cokoteurs du Mijolles avec qui j'ai passé deux années explosives et riches en souvenirs. Merci Flo, Cailloux, Spi, Tinmar, Hibou et Cam's pour m'avoir attribué la Fred attitude et les plus belles rouflaquettes du kot.

PS : merci aussi pour les arrosages !

Merci à ma marraine Zahra pour m'avoir fait découvrir les voluptés de Gembloux et d'être toujours présente en cas de besoin. Mes lapines et petites lapines je compte sur vous pour faire perdurer la famille !

J'ai également une grosse pensée pour mes parents qui m'ont offert la possibilité de réaliser ces études. Merci de m'avoir épaulée pendant ce TFE mais aussi durant mes 5 autres années d'études. Je n'aurais pas pu espérer meilleur soutien de leur part. Merci d'avoir éloigné mes peurs et mes désillusions et de m'avoir donné confiance en moi.

Et enfin, je remercie Tom pour son soutien sans faille durant les 5 dernières années et surtout pour ces 6 derniers mois qui n'ont pas toujours été faciles. Merci d'être mon partenaire dans toutes nos aventures qu'elles soient studieuses ou festives. Merci d'avoir toujours une oreille à mon écoute.

Résumé

La gestion des adventices et l'utilisation inefficace des engrais azotés par les cultures sont deux problématiques actuelles de l'agriculture wallonne. L'utilisation abusive et répétée d'herbicides pour lutter contre les adventices a mené au développement de résistances contre ces produits chimiques chez ces dernières. L'objectif de ce travail est de tester le potentiel d'une fertilisation azotée composée exclusivement d'ammonium « stabilisé » pour lutter contre les adventices nitrophiles en culture de froment d'hiver. Cette stratégie vise à offrir un avantage compétitif aux variétés de froment capables de mieux prélever et utiliser l'ammonium par rapport aux adventices préférant les nitrates comme source d'azote.

Une expérience en serre a été réalisée en mettant en compétition deux variétés de froment (Cellule et KWS_Smart) choisies pour leurs prédispositions à valoriser respectivement l'ammonium ou les nitrates et deux adventices, le mouron des oiseaux et le vulpin des champs, couramment retrouvées en culture de froment en Wallonie. Deux traitements azotés ont été utilisés, l'un à base de sulfate d'ammonium et d'inhibiteurs de la nitrification et l'autre à base de nitrate de potassium. Les adventices ont également été cultivées seules afin de déterminer leur source azotée préférentielle entre l'ammonium, les nitrates ou l'ammonium-nitrate. La croissance des plantes a duré six semaines. Durant toute l'expérience et chaque semaine, le nombre de feuilles, la hauteur et le stade de développement des plantes ont été enregistrés. Au terme de celle-ci, plusieurs paramètres ont été mesurés tels que la masse sèche de la biomasse aérienne et la surface foliaire.

La source azotée augmentant significativement la croissance du mouron en monoculture est l'ammonium-nitrate et, le vulpin semble préférer quant à lui les fertilisations à base de nitrate et d'ammonium-nitrate.

La fertilisation ammonium et la compétition avec le froment de la variété Cellule ont affecté la croissance du mouron. A l'inverse, en fertilisation à base de nitrate, la dynamique de croissance des adventices a été ralentie lorsque celles-ci ont été mises en compétition avec la variété KWS_Smart. Ces derniers résultats concordent avec les aptitudes prédites du froment Cellule à valoriser l'ammonium et du froment KWS_Smart à mieux utiliser les nitrates. De plus, une forte interaction entre les facteurs fertilisation et compétition a été mise en évidence pour le mouron. Dans une fertilisation donnée, le choix de la variété de froment semble donc exercer une influence sur la gestion des adventices. L'impact d'une telle interaction n'a pas été détecté pour le vulpin.

Les recherches doivent être étendues à d'autres espèces d'adventices et être testées au champ, en conditions réelles. Cette stratégie de lutte contre les adventices basée sur l'utilisation de l'azote sous forme d'ammonium permettrait par la même occasion de diminuer les pertes d'azote par lixiviation et dénitrification dans les systèmes agricoles.

Mots-clés

Froment – Adventice – *Alopecurus myosuroides* – *Stellaria Media* – Ammonium – Nitrate – Milieu contrôlé

Abstract

Weed management and inefficient use of nitrogen fertilizers by crops are two current issues in Wallonia. The abusive and repeated use of herbicides to control weeds has led to the development of resistance against these chemicals. The objective of this work is to test the potential of a nitrogen fertilization composed exclusively of "stabilized" ammonium to control nitrophilic weeds in winter wheat crops. This strategy aims to provide a competitive advantage to wheat varieties that are better to take up and use ammonium than weeds that prefer nitrate as nitrogen source.

A greenhouse experiment was carried out in which two wheat varieties (Cellule and KWS_Smart) chosen for their capacities to use either ammonium or nitrates respectively, were placed in competition with two weeds, chickweed and blackgrass, commonly found in wheat crops in Wallonia. Two nitrogen treatments were used, one based on ammonium sulfate with nitrification inhibitors and the other based on potassium nitrate. Weeds were also grown alone to determine their preferred nitrogen source between ammonium, nitrate or ammonium-nitrate. The plants were grown for six weeks. During the whole experiment and every week, the number of leaves, the height and the development stage of the plants were recorded. At the end of the experiment, several parameters were measured such as shoot dry weight and leaf area.

The nitrogen source that significantly increased chickweed growth in monoculture was ammonium-nitrate and, for blackgrass, it was nitrate and ammonium-nitrate fertilizers.

Ammonium fertilization and competition with the wheat variety Cellule affected chickweed growth. In the opposite, under nitrate fertilization, weed growth dynamics were slowed when weeds were in competition with the variety KWS_Smart. These results are consistent with the predicted ammonium-use abilities of Cellule wheat and KWS_Smart wheat. In addition, a strong interaction between fertilization and competition factors was found for chickweed. For a given fertilization, the choice of wheat variety seems to influence weed management. The impact of this interaction was not detected for blackgrass.

The research should be extended to other weed species and tested in the field under real conditions. This weeds control strategy based on the use of ammonium would at the same time reduce nitrogen losses by leaching and denitrification in agricultural systems.

Keywords

Wheat – Weed - *Alopecurus myosuroides* – *Stellaria Media* – Ammonium – Nitrate – Controlled environment

Avant-propos

Projet GAIN

Ce travail de fin d'étude s'inscrit dans le projet de recherche GAIN (Gestion des Adventices par Innovations de la Nutrition azotée) mené par le service de « Plant Genetics and Rhizosphere Processes » de la faculté des sciences agronomiques Gembloux Agro-Bio Tech, en collaboration avec le Centre de Recherche Agronomique Wallon (CRA-W) et financé par la Région Wallonne.

La gestion des adventices et l'utilisation inefficace des engrais azotés par les cultures sont deux problématiques actuelles de l'agriculture wallonne (Collègue des Producteurs, 2018; Malice, 2019). En effet, la fertilisation et la gestion des sols est le troisième domaine prioritaire devant faire l'objet de financement public pour la recherche et la formation selon les agriculteurs wallons (Collègue des Producteurs, 2018).

Le projet GAIN a pour objectif de proposer des solutions permettant la gestion des adventices et une réduction de la pollution due à une utilisation trop importante des engrais azotés. Durant le 20ème siècle, à la suite d'une intensification des systèmes agricoles et d'un recours trop important aux engrais azotés minéraux riches en nitrate, les génotypes de froment préférant l'azote sous forme de nitrate plutôt que sous forme d'ammonium ont probablement été sélectionnés (Malice, 2019; Cantarel et al., 2021). Cependant, bon nombre de mauvaises herbes sont supposées nitrophiles et profiteraient donc des engrais azotés riches en nitrate pour se développer et nuire à la culture. Le projet GAIN tente donc au travers de plusieurs stratégies d'identifier des variétés de froment d'hiver capables de prélever et d'utiliser préférentiellement l'azote sous forme d'ammonium. Cette valorisation de l'ammonium par le froment lui offrirait un avantage compétitif face aux adventices consommatrices de nitrate. Pour offrir cet avantage au froment, il faut éviter la transformation de l'ammonium en nitrate dans le sol. Cette problématique est également à l'étude du projet de recherche GAIN. Effectivement, des recherches sont actuellement menées par ce projet pour bloquer l'azote sous forme d'ammonium dans le sol et ceci au moyen d'inhibiteurs synthétiques et biologiques de la nitrification. Grâce à ces différentes stratégies, les adventices pourraient être carencées en azote et se faire dominer par la culture de froment. Cette domination de la culture sur les adventices pourrait donc mener à une meilleure gestion et par conséquent une réduction de l'utilisation d'herbicides et de moyens mécaniques de désherbage (Unpublished, 2021).

Liste des abréviations

AOB :	Bactérie oxidant l'ammonium
DCD :	Dicyandimide
Df :	Degrees of freedom (degré de liberté)
DMPP :	3,4-dimethylpyrazole phosphate
GAIN :	Gestion des adventices par innovations de la nutrition azotée
GLM :	Modèle linéaire généralisé
HRAC :	Herbicide resistance action committee
MS :	Masse sèche
PAR :	Rayonnement photosynthétiquement actif
SF :	Surface foliaire
WFPS :	Water-filled pore space
WHC :	Water Holding Capacity

Table des matières

Mise en contexte.....	1
1 Introduction	3
1.1 Cycle de l'azote.....	3
1.2 Utilisation de l'azote par les plantes	4
1.3 Gestion des adventices.....	6
1.3.1 L'adventice Vulpin des champs.....	7
1.3.2 L'adventice Mouron des oiseaux	8
1.3.3 Résistance des adventices aux herbicides	9
1.4 Utilisation de la fertilisation azotée pour influencer la compétition entre le froment et les adventices 10	
2 Objectifs et hypothèses	13
3 Matériel et méthodes	14
3.1 Choix du substrat : prétest	14
3.1.1 Design expérimental du prétest.....	14
3.1.2 Extraction KCl.....	15
3.1.3 Dosage de l'azote minéral.....	16
3.2 Dispositif expérimental.....	17
3.2.1 Matériel végétal et germination	18
3.2.2 Choix du substrat et sa capacité de rétention d'eau	19
3.2.3 Solution nutritive	19
3.2.4 Conditions de la serre	21
3.2.5 Contrôle du contenu en azote pour chaque modalité.....	21
3.2.5.1 Prélèvement vermiculite	21
3.2.5.2 Dose de l'azote minéral	22
3.2.6 Observations et variables mesurées	22
3.2.6.1 Stade de développement des plants	22
3.2.6.2 Hauteur et nombre de feuilles des plants	22
3.2.6.3 Biomasse sèche aérienne	23
3.2.6.4 Surface foliaire	23
3.3 Analyses statistiques	24
4 Résultats.....	26
4.1 Prétest substrat	26
4.2 Suivi du contenu en azote des pots témoins de l'expérience principale.....	28
4.2.1 Fertilisation nitrate de potassium	28
4.2.2 Fertilisation sulfate d'ammonium + DMPP	29
4.2.3 Fertilisation ammonium nitrate	30
4.2.4 Témoins sans fertilisant	31

4.3	Analyse de la biomasse aérienne	32
4.3.1	Mouron en monoculture	34
4.3.1.1	Nombre de feuilles par plante	34
4.3.1.2	Masse sèche de la biomasse aérienne.....	35
4.3.1.3	Surface foliaire	35
4.3.2	Mouron en compétition avec le froment	36
4.3.2.1	Nombre de feuilles	36
4.3.2.2	Masse sèche de la biomasse aérienne.....	39
4.3.2.3	Surface foliaire	39
4.3.2.4	Stades de développement (échelle BBCH)	40
4.3.3	Vulpin en monoculture	41
4.3.3.1	Hauteur	41
4.3.3.2	Masse sèche de la biomasse aérienne.....	42
4.3.3.3	Surface foliaire	42
4.3.4	Vulpin en compétition avec du froment	42
4.3.4.1	Hauteur	42
4.3.4.2	Matière sèche de la biomasse aérienne	44
4.3.4.3	Surface foliaire	44
4.3.4.4	Stade de développement (échelle BBCH)	45
4.3.5	Froment Cellule.....	45
4.3.5.1	Hauteur	46
4.3.5.1.1	Interaction : Compétition * Fertilisation.....	46
4.3.5.1.2	Facteur fertilisation.....	47
4.3.5.1.3	Facteur compétition.....	48
4.3.5.2	Masse sèche de la biomasse aérienne.....	48
4.3.5.3	Surface foliaire	49
4.3.5.4	Stade de développement (échelle BBCH)	49
4.3.6	Froment KWS_Smart.....	50
4.3.6.1	Hauteur	50
4.3.6.1.1	Interaction : Compétition * Fertilisation.....	50
4.3.6.1.2	Facteur fertilisation.....	51
4.3.6.1.3	Facteur compétition.....	52
4.3.6.2	Masse sèche de la biomasse aérienne.....	52
4.3.6.3	Surface foliaire	53
4.3.6.4	Stade de développement (échelle BBCH)	54
4.3.7	Ratio d'utilisation de l'ammonium.....	54
5	Discussion	56
5.1	Les concentrations en azote minéral dans le substrat vermiculite	56
5.2	Discussion de l'analyse de la biomasse aérienne des plantes cultivées	57
6	Conclusion et perspectives	60
	Références bibliographiques.....	61
	Annexes	66

Tables des figures

Figure 1. Cycle de l'azote (Havlin J. L. et al., 2014).	3
Figure 2. Equation de la volatilisation de l'ammoniac (Cameron et al., 2013)	4
Figure 3. Schéma des différents types de nuisibilité des adventices (Chauvel et al., 2018)	7
Figure 4. Dessin de Alopecurus myosuroides avec son système racinaire (Wageningen University & Research).....	8
Figure 5. Infestation d'une culture de froment par du vulpin des champs (Moss et al., 2013).	8
Figure 6. Plant de mouron des oiseaux ("Station Rhône-Alpes Légumes," n.d.).	9
Figure 7. Dessin du système racinaire de Stellaria media (Wageningen University & Research).	9
Figure 8. Photographie du dispositif expérimental du prétest	15
Figure 9. Falcons fixés à l'horizontale sur le mélangeur orbital	15
Figure 10. Filtration des échantillons après l'extraction au KCl	16
Figure 11. Dosage de l'azote. Microplaques de détermination de concentration de nitrate, ammonium et nitrite.	16
Figure 12. Photo du design expérimental. Répartition aléatoire des 96 pots en 4 lignes de 24 colonnes.	18
Figure 13. Prélèvement de la vermiculite pour le dosage d'azote. Utilisation d'une cuillère et d'un tube métallique.	22
Figure 14. Mesure de la hauteur de la plus grande feuille à l'aide d'un mètre.	23
Figure 15. Etalement et scan des feuilles.	24
Figure 16. Graphique de l'évolution au cours du temps (T0 à T4) de la concentration en ammonium (mg N/kg substrat sec) pour les trois substrats testés (sol:sable (2:1), sol:sable (1:1), vermiculite) auxquels deux doses (12,5 ou 25 mg N-équivalent/kg substrat sec) d'ammonium sulfate ont été ajoutées chaque semaine et ceci en présence de DMPP appliqués selon deux concentrations (1 ou 3%).	26
Figure 17. Graphique de l'évolution au cours du temps (T0 à T4) de la concentration en nitrate (mg N/kg substrat sec) pour les trois substrats testés (sol:sable (2:1), sol:sable (1:1), vermiculite) auxquels deux doses (12,5 ou 25 mg N-équivalent/kg substrat sec) d'ammonium sulfate ont été ajoutées chaque semaine et ceci en présence de DMPP appliqués selon deux concentrations (1 ou 3%).	27
Figure 18. Evolution de la teneur moyenne en azote minéral (mg N/kg vermiculite sèche) en fonction du temps (T0 à T6) pour le traitement à base de nitrate de potassium.	29
Figure 19. Evolution de la teneur moyenne en azote minéral (mg N/kg vermiculite sèche) en fonction du temps (T0 à T6) pour le traitement à base d'ammonium sulfate + DMPP.	30
Figure 20. Evolution de la teneur moyenne en azote minéral (mg N/kg vermiculite sèche) en fonction du temps (T0 à T6) pour le traitement à base d'ammonium-nitrate.....	31
Figure 21. Evolution de la teneur moyenne en azote minéral (mg N/kg vermiculite sèche) en fonction du temps (T0 à T6) pour les pots sans traitement.....	32
Figure 22. Boxplot du nombre de feuilles du mouron seul en fonction de la fertilisation azotée et du temps.	35
Figure 23. Boxplot représentant le nombre de feuilles du mouron en fonction de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation au cours des 6 semaines de croissance (T1 à T6).	37
Figure 24. Boxplot du nombre de feuilles du mouron à la récolte (T6) en fonction de la fertilisation et de la compétition.	38
Figure 25. Boxplot de l'influence de la compétition sur le nombre de feuilles du mouron en fertilisation nitrate en fonction du temps.	38

Figure 26. Boxplot de la masse sèche (MS) du mouron en fonction de la fertilisation azotée et de la compétition.	39
Figure 27. Boxplot de la surface foliaire du mouron en fonction de la fertilisation azotée et de la compétition.	40
Figure 28. Boxplot de la hauteur de vulpin cultivé seul en fonction de la fertilisation azotée au cours du temps.	41
Figure 29. Boxplot de la hauteur du vulpin en fonction de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation au cours du temps.	43
Figure 30. Boxplot de la hauteur du vulpin à la cinquième semaine (T5) en fonction de la compétition et de la fertilisation.	43
Figure 31. Boxplot de la masse sèche (MS) du vulpin en fonction de la compétition et de la fertilisation.	44
Figure 32. Surface foliaire du vulpin en fonction de la fertilisation et de la compétition.	45
Figure 33. Boxplot de la hauteur du froment Cellule en fonction de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation au cours du temps.	46
Figure 34. Boxplot de la hauteur du froment Cellule au temps T6 en fonction de la fertilisation et de la compétition.	47
Figure 35. Boxplot de la hauteur du froment Cellule en fonction de la fertilisation et du temps.	47
Figure 36. Boxplot de la masse sèche du froment Cellule en fonction de la fertilisation et de la compétition.	49
Figure 37. Boxplot de la hauteur du froment KWS_Smart en fonction de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation au cours du temps.	51
Figure 38. Boxplot de la hauteur du froment KWS_Smart en fonction de la fertilisation et du temps.	51
Figure 39. Boxplot de la hauteur du froment KWS_Smart en fonction de la compétition au cours du temps.	52
Figure 40. Boxplot de la masse sèche de la biomasse aérienne du froment KWS_Smart en fonction de la fertilisation et de la compétition.	53

Table des tableaux

Tableau 1. Modalités du prétest pour le choix du substrat	14
Tableau 2. Modalités de l'expérience	17
Tableau 3. Quantités optimales de chaque élément nutritif apporté aux plantes	20
Tableau 4. Résultats des ANOVA pour le mouron et le vulpin.....	33
Tableau 5. Résultats des ANOVA pour les variétés de froment Cellule et KWS_Smart.. ..	34
Tableau 6. Masse sèche de la biomasse du mouron en culture seule en fonction des trois fertilisations azotées.	35
Tableau 7. Surface foliaire du mouron en culture seule en fonction des trois fertilisations azotées. ...	36
Tableau 8. Stade de développement du mouron en fonction de la fertilisation, de la compétition et de l'interaction de ces 2 facteurs.	40
Tableau 9. Masse sèche de la biomasse du vulpin en culture seule en fonction des trois fertilisations azotées.	42
Tableau 10. Surface foliaire du vulpin en culture seule en fonction des trois fertilisations azotées	42
Tableau 11. Stade de développement du vulpin en fonction de la fertilisation, de la compétition et de l'interaction des 2 facteurs précédents.....	45
Tableau 12. Influence de la compétition avec les adventices sur la hauteur du froment Cellule en fonction du temps.	48
Tableau 13. Surface foliaire du froment Cellule en fonction de la fertilisation ayant une très haute significativité (***)	49
Tableau 14. Stade de développement du froment Cellule en fonction de la fertilisation, de la compétition ou de l'interaction de ces 2 facteurs.	50
Tableau 15. Comparaison des hauteurs moyennes des froments Cellule et KWS_Smart en fonction de la fertilisation.....	52
Tableau 16. Comparaison des masses sèches (MS) moyennes des froments Cellule et KWS_Smart en fonction de la fertilisation.	53
Tableau 17. Surface foliaire du froment KWS_Smart en fonction de la fertilisation.	53
Tableau 18. Comparaison des surfaces foliaires moyennes des froments Cellule et KWS_Smart en fonction de la fertilisation.	54
Tableau 19. Stade de développement du froment KWS_Smart en fonction de la fertilisation, de la compétition et de l'interaction des 2 facteurs précédents.. ..	54
Tableau 20. Ratios $\text{NH}_4\text{-NO}_3$ pour chaque espèce d'adventice seule ou en compétition et pour les 2 variétés de froment.....	55

Table des annexes

Annexe 1. Composition des réactifs pour le dosage de l'azote	66
Annexe 2. Courbes d'étalonnage utilisées pour le dosage de l'azote minéral.....	66
Annexe 3. Méthode de calcul de la capacité de rétention d'eau du substrat.	67
Annexe 4. Sels utilisés pour faire la solution nutritive.....	68
Annexe 5. Concentrations des éléments nutritifs dans 25mL de solution	69
Annexe 6. Température et humidité dans la serre en fonction du temps.....	69
Annexe 7. Relations linéaires reliant la masse fraîche des feuilles à la surface foliaire pour le mouron, le vulpin, Cellule et KWS Smart.	70
Annexe 8. Tableaux de contingence pour les analyses des stades de développement du mouron.	72
Annexe 9. Tableaux de contingence pour les analyses des stades de développement du vulpin.	73
Annexe 10. Tableaux de contingence pour les analyses des stades de développement du froment Cellule.....	74
Annexe 11. Tableaux de contingence pour les analyses des stades de développement du froment KWS_Smart.....	75
Annexe 12. Dessin du développement du système racinaire du froment (Wageningen University & Research).....	76

Mise en contexte

A l'heure actuelle, les céréales sont la principale ressource alimentaire de la population mondiale. Elles sont utilisées à la fois en alimentation directe et indirecte à travers l'alimentation animale (FAO, 2021). Depuis le milieu des années 60, les agriculteurs ont réussi à accroître la production mondiale céréalière d'un milliard de tonnes pour tenter de satisfaire les besoins alimentaires d'une population mondiale croissante (FAO, 2021).

L'une des céréales les plus cultivées est le blé tendre, aussi appelé blé commun ou encore froment (*Triticum aestivum* L.) (Wieser et al., 2020). En 2019, la production mondiale de blé s'élevait à 765 millions de tonnes dont 139 millions produites par l'Union Européenne (FAOSTAT, 2021). Le blé se distingue en 2 catégories en fonction de sa période de semis. Il existe le froment d'hiver semé à la fin de l'été ou à l'automne et le froment de printemps semé au printemps (Wieser et al., 2020). En Belgique, le froment d'hiver est la céréale la plus cultivée avec 177 255 ha implantés représentant 13% de la surface agricole belge utilisée en 2020 (STATBEL, 2021).

Ces dernières décennies, l'augmentation importante de la production céréalière est principalement due à une amélioration des rendements. Entre 1961 et 1999, dans les pays en développement, le taux moyen d'accroissement des rendements céréaliers était de 2,5% par an (FAO, 2021). Cette importante augmentation des rendements peut être associée à une intensification de l'utilisation des engrais azotés (Raun et al., 1999). En effet, l'azote est un nutriment essentiel pour les plantes car il joue un rôle vital dans la structure de la chlorophylle et, de manière plus générale, dans les protéines et les nucléotides des cellules végétales (Schvartz et al., 2005; Moreau et al., 2019). L'azote, ou plus particulièrement le diazote (N_2), est l'élément le plus présent dans l'atmosphère dont il en compose 78% (Schvartz et al., 2005; Havlin J. L. et al., 2014). Malgré cette abondance de l'azote, celui-ci est un élément limitant dans les sols et donc pour les plantes, uniquement capables d'en exploiter les formes organiques et majoritairement minérales (Moreau et al., 2019). L'azote minéral est généralement retrouvé sous trois formes dans le sol : l'ion ammonium (NH_4^+), l'ion nitrite (NO_2^-) et l'ion nitrate (NO_3^-) (Cameron et al., 2013).

Pour tenter de pallier ce manque d'azote disponible dans les sols, les agriculteurs épandent des engrais azotés de nature organique ou minérale. En 1908, le procédé Haber-Bosch permettant de produire de l'ammoniac a été mis au point. Cette forme utilisable d'azote est synthétisée par la réaction de diazote atmosphérique avec de l'hydrogène et du fer dans des conditions de hautes température et pression (Erisman et al., 2008). La production d'engrais azotés par le procédé Haber-Bosch a augmenté d'un facteur 20 depuis 1950 et 80% de cet azote produit est utilisé comme engrais pour l'agriculture (Glass, 2003 cité par Moreau et al., 2019; Erisman et al., 2008). En 2019, l'utilisation mondiale d'azote à des fins agricoles s'élevait à 107 Tg ($Tg = 10^{12}g$) (FAOSTAT, 2021), dont 60% de ces engrais azotés sont utilisés pour fertiliser les trois principales cultures céréalières à savoir le riz, le maïs et le blé (Ladha et al., 2005). Dans la nature, les processus biologiques fixent chaque année environ 63Tg d'azote, les activités humaines quant à elles en délivrent aujourd'hui deux fois plus (120Tg/an) dans les écosystèmes (Coskun et al., 2017).

Cependant, à l'heure actuelle, l'efficacité d'utilisation des engrais azotés par les cultures n'est que de 30 à 50% (Ladha et al., 2005). L'azote non capté par la culture est relâché sous forme d'ammoniac (NH_3) ou d'oxyde nitreux (N_2O) dans l'atmosphère ou encore sous forme de nitrate (NO_3^-) dans les eaux de surface et souterraines (Coskun et al., 2017). Lorsqu'elles quittent les agroécosystèmes, ces formes d'azote menacent les sols, l'eau et la qualité de l'air (Coskun et al., 2017). En effet, au niveau

mondial, environ 19% de l'azote apporté aux cultures est lixivié sous forme de nitrate et cause l'eutrophisation des eaux (Coskun et al., 2017). De plus, le N₂O qui est un puissant gaz à effet de serre (300 fois plus intense que le CO₂) avec une durée de vie de 114 ans contribue à la destruction de la couche d'ozone (Izrael et al., 2007; Coskun et al., 2017; Moreau et al., 2019). Les émissions de N₂O représentent 0,03% (ou 10% en équivalent CO₂) des émissions de gaz à effet de serre dont 25% sont émis par les sols agricoles (Thomson et al., 2012).

Dès lors, il est impératif de trouver des stratégies permettant de valoriser au mieux les engrais azotés afin d'endiguer leurs conséquences néfastes sur l'environnement. Chaque année, des centaines de milliards de dollars américains sont perdus en raison d'une gestion inefficace des engrais azotés (Houlton et al., 2019). Or, rappelons-le, l'azote est un nutriment essentiel pour la plante qu'il est important d'apprendre à utiliser de façon raisonnée. En plus d'augmenter les rendements des cultures, l'azote utilisé de manière réfléchie représente un outil de gestion des adventices. C'est cette stratégie qui sera abordée dans ce travail de fin d'étude.

1 Introduction

1.1 Cycle de l'azote

L'azote présent dans les plantes, le sol et l'atmosphère est en perpétuelle transformation sous forme organique ou inorganique (Havlin J. L. et al., 2014). La Figure 1 schématise un résumé des phénomènes composant ce cycle de l'azote. Ce dernier est générateur de pertes et de gains d'azote dans le sol.

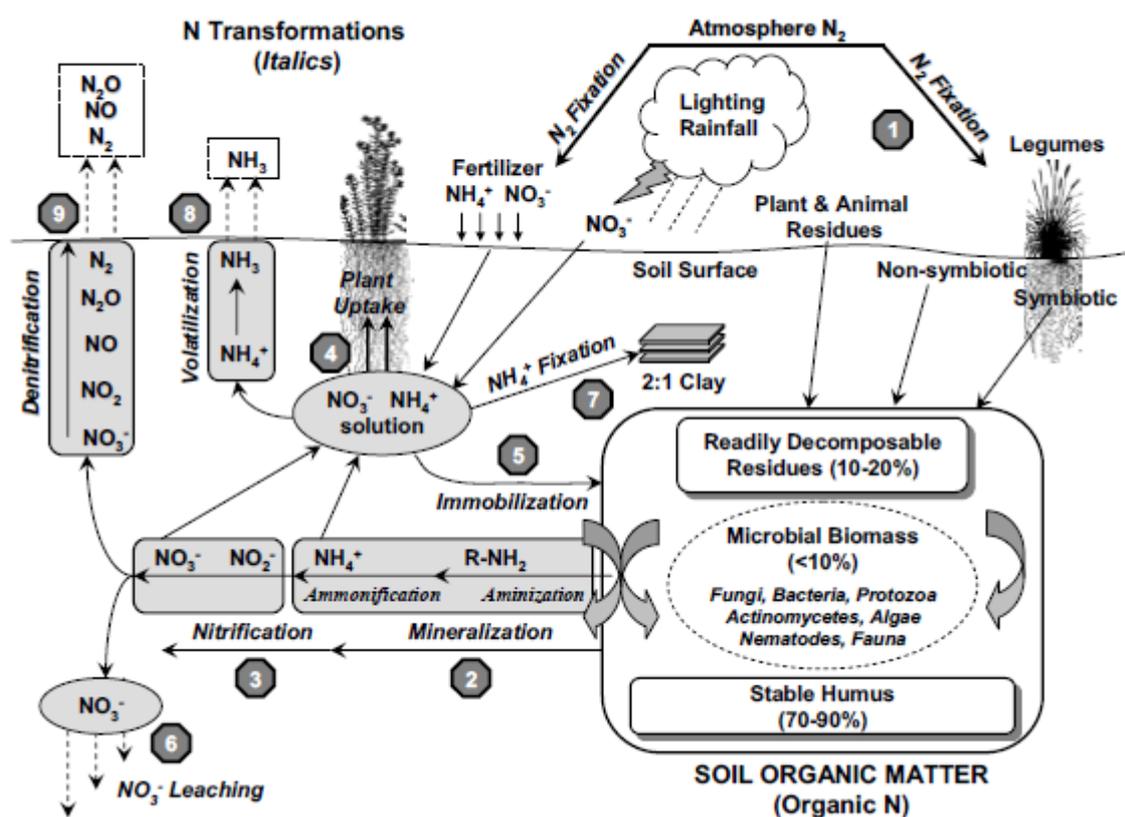


Figure 1. Cycle de l'azote (Havlin J. L. et al., 2014).

Les apports d'azote dans le sol sont issus d'une part de la fixation et du dépôt d'azote atmosphérique, d'autre part de l'apport d'engrais et enfin de la décomposition des résidus de plantes et animaux (Havlin J. L. et al., 2014). Tout d'abord, la fixation de l'azote atmosphérique est réalisée par des micro-organismes réduisant l' N_2 en NH_4^+ qui est ensuite incorporé dans le sol ou directement attribué à la plante (Schvartz et al., 2005; Havlin J. L. et al., 2014). Ces bactéries fixatrices sont aérobies ou anaérobies et peuvent être libres dans le sol ou bien en symbiose avec des légumineuses (*Rhizobium*) (Schvartz et al., 2005; Havlin J. L. et al., 2014).

L'azote atmosphérique peut également être apporté sous forme de dépôts humides ou secs. (Söderlund, 1981; Havlin J. L. et al., 2014). L'azote est déposé à la surface du sol en étant soit dissous dans les pluies et la neige, soit en étant attaché à des particules de matière (Cameron et al., 2013; Havlin J. L. et al., 2014).

Enfin, les dernières formes d'apport azoté dans le sol sont la décomposition aérobie de la matière organique et l'apport d'engrais azotés (Havlin J. L. et al., 2014). Les engrais azotés inorganiques les plus communément utilisés sont l'urée, l'ammonium nitrate, l'ammonium sulfate et l'ammoniac anhydre (Havlin J. L. et al., 2014; Coskun et al., 2017). Des engrais organiques à base de déchets végétaux ou animaux tels que le lisier, le fumier, etc. sont également largement utilisés (Havlin J. L. et al., 2014).

Plusieurs phénomènes peuvent être la cause des pertes d'azote dans le sol. En effet, l'ammoniac (NH_3) est un composé volatile pouvant être libéré dans l'atmosphère. L'équation de la Figure 2 démontre que la volatilisation est influencée par le pH du sol. Plus le pH est basique (forte présence d'ions OH^-), plus la volatilisation de l'ammonium (NH_4^+) en ammoniac est importante (Cameron et al., 2013). L'augmentation d'ammoniac peut provoquer l'acidification et l'eutrophisation des milieux naturels (Cameron et al., 2013).

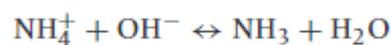


Figure 2. Equation de la volatilisation de l'ammoniac (Cameron et al., 2013)

Une seconde cause expliquant la perte d'azote dans le sol est la lixiviation des nitrates (Cameron et al., 2013). Ceux-ci étant des ions fortement mobiles et facilement entraînés par les pluies, les nitrates se retrouvent déversés dans les eaux souterraines, les lacs ou les rivières. Ce phénomène peut mener à une contamination de l'eau potable ou à une eutrophisation des eaux (Cameron et al., 2013). La perte d'azote sous forme de nitrate est accentuée par le phénomène de nitrification. En effet dans le cycle de transformation de l'azote, l'azote organique contenu dans le sol est d'abord minéralisé en ammonium (n°2 sur Figure 1). S'opère ensuite la nitrification (n°3 sur Figure 1) qui est un processus par lequel des bactéries (*Nitrosomonas* sp. et *Nitrobacter* sp.) oxydent l'ammonium en nitrite puis en nitrate (Schvartz et al., 2005).

Le troisième phénomène provoquant des pertes d'azote dans le cycle est la dénitrification ; lorsque le sol est gorgé d'eau, l' O_2 n'est plus disponible créant ainsi des conditions propices à certains organismes anaérobiques. Ces bactéries sont capables de transformer les nitrates en NO , N_2O ou N_2 pour en obtenir un accepteur final d'électrons menant ainsi à des émissions de gaz à effet de serre (Cameron et al., 2013).

1.2 Utilisation de l'azote par les plantes

Les plantes contiennent entre 1 et 6% d'azote et sont capables de l'assimiler sous sa forme nitrate ou ammonium grâce à leurs racines ou leurs symbioses avec des champignons mycorhiziens à arbuscules dont le mycélium dans le sol fonctionne comme des racines pour le prélèvement de certains éléments nutritifs (principalement phosphore, zinc et azote) (Smith et al., 2008; Britto et al., 2013; Havlin J. L. et al., 2014). Les nitrates sont la forme la plus absorbée par les plantes car ils sont présents en plus grande quantité dans le sol et sont davantage accessibles et mobiles que l'ammonium (Boudsocq et al., 2012; Havlin J. L. et al., 2014). Une fois absorbés, la plante métabolise les NO_3^- en NH_4^+ en utilisant de l'énergie et produit ensuite des acides aminés et des protéines. Il s'avère donc que pour les systèmes à base de nitrate, c'est l'énergie requise pour la réduction de NO_3^- qui est limitante alors que pour les engrais constitués d'ammonium, la croissance maximale est limitée par la toxicité de ce dernier (Cox et al., 1973). Exposée à de fortes doses d' NH_4^+ , la plante voit sa croissance diminuer tant dis que pour NO_3^- , elle se stabilise (effet plateau). L'énergie conservée, lorsque l'azote est prélevé sous forme

d'ammonium, pourrait être utilisée pour la synthèse de protéines et améliorer la croissance de la plante (Cox et al., 1973; Boudsocq et al., 2012; Havlin J. L. et al., 2014).

Certains chercheurs tentent de répertorier les espèces en fonction de leurs préférences azotées. C'est le cas d'Ellenberg qui a créé un système d'indicateurs attribuant aux espèces végétales une valeur indicatrice entre 1 et 9 en fonction de l'humidité, du régime lumineux, de la température, de la continentalité, ainsi que du pH, de la teneur en azote et de la salinité des sols dans lesquels elles croissent (Schaffers et al., 2000). Ces valeurs indicatrices basées sur le comportement écologique des espèces ont été attribuées à 2726 espèces d'Europe Centrale (Schaffers et al., 2000). La valeur du contenu en azote indique la fertilité du sol et permet donc d'estimer si une plante préfère des sols pauvres (valeur proche de 1) ou riches en azote (valeur proche de 9). Le blé possède un indice d'azote d'Ellenberg de 4,4 (Chauvel et al., 2018).

D'autres scientifiques tentent d'aller plus loin et de déterminer une préférence pour les nitrates ou l'ammonium en fonction des espèces végétales. L'étude de Gallardo et al. (2006) démontre que la répartition hétérogène de NO_3^- et NH_4^+ dans le sol influence les communautés végétales. Gallardo et al. (2006) ont testé l'effet de la taille des zones concentrées en NH_4^+ ou en NO_3^- sur le développement de six communautés de plante. Leur expérimentation a mis en évidence une population de plantes plus hétérogène lorsque celle-ci se trouvait dans un environnement contenant de larges zones d'azote. La différence de tailles des zones azotées pourrait donc influencer les performances des plantes (Gallardo et al., 2006). Néanmoins, selon Britto et al. (2013), une réponse différente des plantes face à une source azotée à base de nitrate ou d'ammonium peut exister mais il est complexe d'attribuer une source préférentielle d'azote pour une espèce de plantes. En effet, le prélèvement d'azote est influencé par de nombreux facteurs en interaction les uns avec les autres. En outre, les facteurs physiologiques caractéristiques de chaque espèce de plantes (stade de développement, utilisation des nutriments, interaction des nutriments ...) et les facteurs environnementaux (stock de nutriment, température, humidité, pH, ...). De plus, fixer une source préférentielle d'azote ne tient pas compte de l'adaptation de réponse des plantes au NO_3^- ou NH_4^+ en fonction des conditions environnementales dans lesquelles les végétaux se trouvent (Britto et al., 2013).

L'azote n'est pas uniquement un élément nutritif indispensable aux cultures mais il est également convoité par d'autres plantes pouvant être nuisibles. Depuis l'intensification de l'agriculture ces dernières décennies, les espèces de mauvaises herbes nitrophiles ont vu leur population augmenter grâce à l'utilisation des engrais azotés contrairement aux espèces oligotrophes qui ont décliné (Moreau et al., 2014). L'azote est le nutriment pour lequel la compétition entre la culture et les adventices est la plus intense, celle-ci survient lorsque l'azote disponible dans le sol est insuffisant pour couvrir les besoins des mauvaises herbes et de la plante cultivée (Chauvel et al., 2018). Au niveau du sol, les phénomènes déterminant l'intensité de cette compétition sont l'architecture racinaire des deux plantes, leur demande respective en azote dépendante de leur croissance et la forme d'azote (ammonium, nitrate ou organique) prélevée préférentiellement par celles-ci (Chauvel et al., 2018; Kaur et al., 2018). Concernant les besoins azotés des adventices, les avis divergent dans la littérature. Selon Chauvel et al. (2018), les besoins en azote des adventices ne sont pas forcément plus élevés que ceux de la culture mais ils sont souvent synchronisés. Alors que selon Kaur et al. (2018), les adventices puisent plus rapidement et de façon plus importante les nutriments notamment pendant les trois premières semaines de leur croissance durant lesquelles celles-ci sont capables de prélever jusqu'à un tiers des engrais apportés à la culture. De plus, si la levée des adventices est plus précoce que celle de la culture, cette dernière aura moins d'azote à sa disposition (Chauvel et al., 2018).

Dès lors, les adventices sont des plantes nocives pour les cultures car elles les privent d'une partie des ressources à leur disposition et, par conséquent, engendrent des baisses de rendements. En effet, les mauvaises herbes sont globalement responsables des pertes de rendements les plus importantes (34%), suivies par les animaux ravageurs (18%) et les pathogènes (16%) (Oerke, 2006). Toutefois, il faut garder un esprit critique vis-à-vis des chiffres quantifiant la nuisibilité des adventices car celle-ci est aussi influencée par de nombreux facteurs et les études la quantifiant ne sont pas toujours réalisées avec la même méthodologie. Il s'avère que la nuisibilité est souvent estimée par le coût du désherbage et que cette valeur ne définit qu'une partie de la nuisibilité réelle des adventices (Chauvel et al., 2018).

1.3 Gestion des adventices

Une adventice, synonyme de mauvaise herbe, est définie comme une plante qui nuit aux cultures et qui peut engendrer des baisses de rendements (Chauvel et al., 2018). La nuisibilité de ces plantes est classée en 3 types (Figure 3) : la nuisibilité primaire directe, la nuisibilité primaire indirecte et la nuisibilité secondaire.

La nuisibilité primaire (directe et indirecte) prend en compte les conséquences néfastes des adventices sur le rendement et la qualité de la récolte (Morison et al., 2008). La nuisibilité primaire directe correspond à une diminution quantitative de la production due à la compétition entre les adventices et la culture pour des ressources telles que l'eau, la lumière et les nutriments (Chauvel et al., 2018). Elle peut également résulter de phénomènes d'allélopathie diminuant le développement de la culture (Chauvel et al., 2018). L'allélopathie étant un phénomène par lequel une plante induit un effet direct ou indirect, positif ou négatif sur une autre plante grâce à la libération dans l'environnement de métabolites secondaires (Weston et Duke (2003) cité par Chauvel et al., 2018).

La nuisibilité primaire indirecte se traduit par une diminution de la qualité des récoltes résultant d'une affectation de l'état sanitaire de la culture par les adventices (Morison et al., 2008; Chauvel et al., 2018). En effet, les adventices peuvent servir d'hôte intermédiaire pour des virus, bactéries, champignons, nématodes, etc., responsables de maladie pouvant impacter la culture (Chauvel et al., 2018). Les plantes adventices ont également la capacité de perturber les travaux culturaux et la récolte de la culture, car des fragments d'adventices et/ou des semences, parfois toxiques, peuvent se retrouver au sein de la récolte et en diminuer sa valeur (Poortmans, 2013; Chauvel et al., 2018).

La nuisibilité secondaire quant à elle s'observe à l'échelle de la parcelle ou du territoire et correspond aux dégâts que la population d'adventices présentes ou futures peut provoquer aux cultures ultérieures (Morison et al., 2008; Chauvel et al., 2018). Elle se traduit par exemple par une augmentation du stock semencier des mauvaises herbes (Morison et al., 2008).

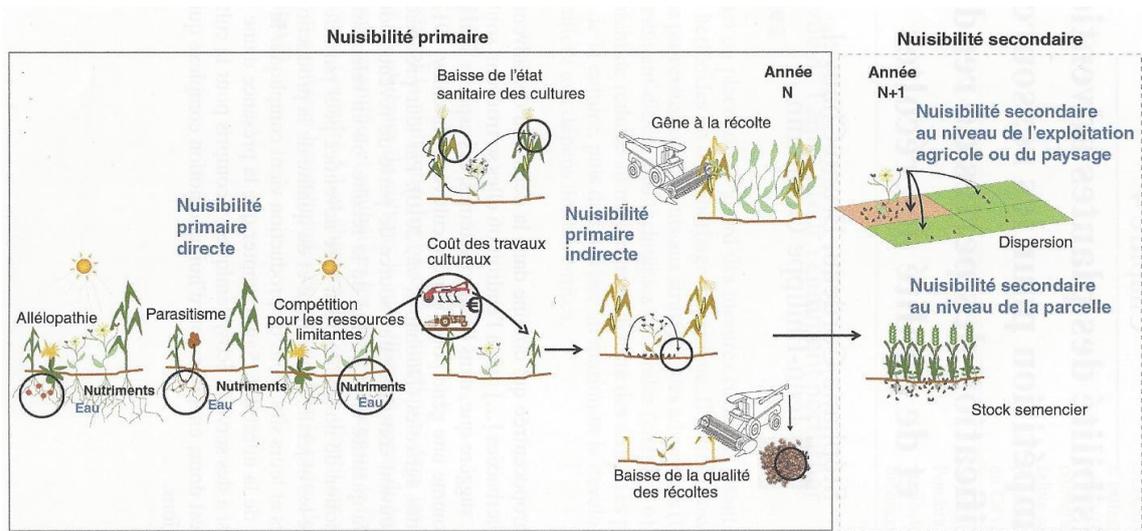


Figure 3. Schéma des différents types de nuisibilité des adventices (Chauvel et al., 2018)

Deux adventices nuisibles pour le froment d’hiver dans nos régions seront étudiées dans ce travail. Il s’agit du mouron des oiseaux (*Stellaria media* (L.) Vill.) et du vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds.).

1.3.1 L’adventice Vulpin des champs

Le vulpin des champs (Figure 5) est une mauvaise herbe annuelle appartenant à la famille des *Poaceae*. C’est une graminée germant toute l’année avec un pic à l’automne et un second au printemps. Le vulpin est une plante nitrophile aimant se développer dans les sols riches en azote. Cette plante est capable de pousser sur tous les types de sol à l’exception des sols tourbeux, sableux et acides (“Vulpin des champs,” October-22-2021). Le vulpin est l’une des adventices les plus communément retrouvée dans les cultures de céréales dans le nord-est de l’Europe (Maréchal et al., 2012). Les pays européens les plus touchés sont l’Angleterre, la France, l’Allemagne et une partie de la Belgique et des Pays-Bas (Moss, 2013). En Wallonie, entre 2018 et 2020, un recensement d’adventices en culture de froment a été réalisé par Malice E. et al. (n.d.) à la sortie de l’hiver, avant le désherbage de printemps. Cette étude de terrain a révélé que 28,3% des parcelles sondées étaient infestées par du vulpin avec une densité de 19 plants par m². Cette plante est capable de produire entre 500 et 5000 semences par plant, ce qui fait d’elle un adversaire redoutable pour les cultures (“Vulpin des champs,” October-22-2021). La survie des graines dans le sol est de 20 à 30% par an. Ce pourcentage semble faible mais, considérant l’importance du stock semencier, cela représente toujours beaucoup d’individus (Moss, 2013). Le seuil de nuisibilité directe pour le vulpin est de 26 plants par m² induisant une perte de rendement de 5% sur la culture (“Livre Blanc Céréales,” 2013). Le vulpin est une adventice d’autant plus difficile à gérer dans les cultures de froment car ces 2 plantes appartiennent à la même famille botanique (*Poaceae*) (Wieser et al., 2020). Par conséquent, étant donné leur physiologie similaire, les deux plantes vont émettre des besoins nutritionnels semblables et au même moment, intensifiant ainsi la compétition entre elles (Morison et al., 2008).

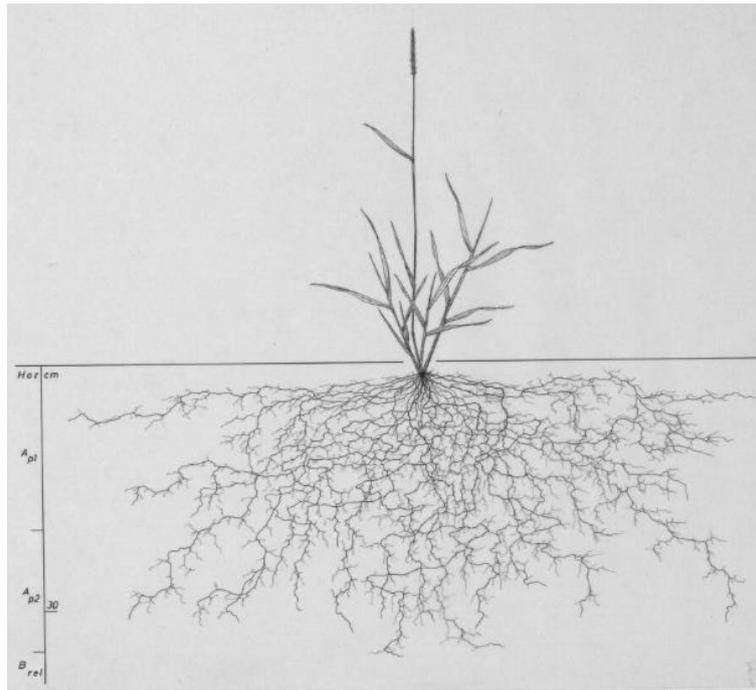


Figure 4. Dessin de *Alopecurus myosuroides* avec son système racinaire (Wageningen University & Research).



Figure 5. Infestation d'une culture de froment par du vulpin des champs (Moss et al., 2013).

1.3.2 L'adventice Mouron des oiseaux

Le mouron des oiseaux (Figure 6 et 7) est une plante dicotylédone appartenant à la famille des *Caryophyllaceae*. C'est une adventice native d'Europe mais aujourd'hui répandue sur tous les continents (Laforest et al., 2018). Le mouron est une plante annuelle poussant dans les sols riches en matières organiques et/ou en nitrates ("Station Rhône-Alpes Légumes," n.d.). Le mouron germe dès que les conditions lui sont favorables de février à septembre ("Station Rhône-Alpes Légumes," n.d.). Des plants à des stades de croissance différents peuvent se retrouver au sein d'une même culture car le mouron fleurit toute l'année (Laforest et al., 2018). Le seuil de nuisibilité direct est de 26 plants par m² provoquant une perte de rendement de 5% ("Livre Blanc Céréales," 2013). En Wallonie, entre 2018 et 2020, un recensement d'adventices en culture de froment a été réalisé par Malice E. et al. (n.d.) à la sortie de l'hiver, avant le désherbage de printemps. Cette étude de terrain a révélé que 19,6% des parcelles sondées étaient infestées par du mouron avec une densité de 5 plants par m². Notons également que selon l'étude de Inderjit et Dakshini (1998) lorsque le mouron se développe dans une culture de froment, il serait capable de libérer des composés phénoliques hydrosolubles dans sa

rhizosphère affectant la croissance du blé en réduisant le développement de ses racines, de sa partie aérienne et la quantité de matière fraîche produite. Cependant, les auteurs rappellent qu'il faut garder à l'esprit qu'en conditions réelles, une multitude de facteurs interviennent simultanément et qu'il est très complexe d'en isoler l'effet de chacun (Inderjit et al., 1998).



Figure 6. Plant de mouron des oiseaux ("Station Rhône-Alpes Légumes," n.d.).

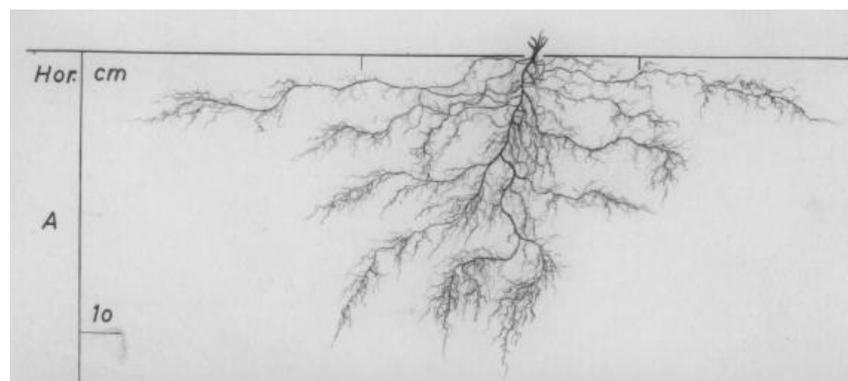


Figure 7. Dessin du système racinaire de *Stellaria media* (Wageningen University & Research).

1.3.3 Résistance des adventices aux herbicides

La gestion des adventices fait partie des préoccupations majeures des agriculteurs. En réponse aux pertes de rendement, les agriculteurs tentent d'éliminer les mauvaises herbes par des moyens chimiques ou mécaniques. Toutefois, la variabilité spatiale et temporelle des adventices, ainsi que leur adaptation rapide aux méthodes de désherbage rendent leur gestion complexe (Pätzold et al., 2020). La découverte des herbicides sélectifs dans les années 1940-1950 a augmenté la dépendance des agriculteurs à ces produits chimiques luttant contre les adventices (Lutman et al., 2013). Or, il est à noter que lorsque les herbicides sont mal utilisés ou appliqués à des trop fortes doses, ils peuvent être nocifs pour la santé et l'environnement (Palou et al., 2008). De plus, une utilisation prolongée d'herbicide reposant sur le même mode d'action peut mener à des résistances chez les adventices (Palou et al., 2008; Henriet et al., 2014). La résistance aux herbicides est une aptitude naturelle et héritable possédée par certaines plantes, elle fait référence aux biotypes capables de survivre au sein d'une population après l'application d'un herbicide qui, en temps normal, aurait éliminé toute la population d'adventice (Palou et al., 2008; Henriet et al., 2014). Dès lors, l'utilisation répétée d'un herbicide augmente la sélection des individus résistants capables de se multiplier et d'assurer la survie de leur espèce (Palou et al., 2008; Henriet et al., 2014). Malheureusement, ce phénomène n'a fait

qu'augmenter ces 30 dernières années. Aujourd'hui, 266 espèces d'adventices résistantes aux herbicides ont été recensées à travers le monde (Palou et al., 2008; International Survey of Herbicide Resistant Weeds, 2021).

Le vulpin des champs fait partie des adventices ayant démontré des cas de résistance aux herbicides dans plusieurs pays comme l'Angleterre, la France et l'Allemagne (Moss, 2013). En effet, pour tenter de se débarrasser de ce nuisible, les agriculteurs utilisent des herbicides antigraminées à large dose envers lesquels le vulpin a rapidement développé des capacités de combativité (Maréchal et al., 2012). En Belgique, le vulpin semble résistant à quatre principaux modes d'action d'herbicides. Ceux-ci sont les groupes 1, 2, 3 et 5 de la classification du « Herbicide Resistance Action Committee » (HRAC) (International Survey of Herbicide Resistant Weeds, 2021; "Herbicide Resistance Action Committee," December-28-2021).

Le mouron des oiseaux a également développé des résistances aux herbicides notamment en Belgique, en France, en Allemagne, au Canada, aux Etats-Unis,...(International Survey of Herbicide Resistant Weeds, 2021). Ces cas de résistances sont principalement rencontrés lors de l'utilisation d'herbicides inhibiteurs de l'acétolactate synthase (ALS) faisant partie du groupe 1 de la classification du HRAC (Uusitalo et al., 2013; Linn et al., 2019; International Survey of Herbicide Resistant Weeds, 2021).

Ces dernières années, une volonté de changement et de transition vers une agriculture dite « intégrée » s'est développée dans la société. L'Union européenne a elle aussi souhaité encourager la lutte intégrée contre les nuisibles en adoptant en octobre 2009 la directive 2009/128/CE, en vue de réduire les risques et les impacts sur la santé humaine et l'environnement grâce à une utilisation durable et raisonnée des pesticides (Commission européenne, 2017). En effet, un système de production intégré se veut moins dépendant des intrants et des produits phytosanitaires mais tout aussi productif pour répondre aux besoins alimentaires de la population (Schvartz et al., 2005; Henriot et al., 2014).

La gestion des adventices fait l'objet de nombreuses recherches afin de trouver des méthodes de lutte durables, efficaces et respectueuses de l'environnement. Il s'avère que le contrôle de la compétition entre la culture et les adventices est un phénomène complexe et pas encore entièrement maîtrisé mais pouvant être une piste de lutte non négligeable contre les mauvaises herbes.

1.4 Utilisation de la fertilisation azotée pour influencer la compétition entre le froment et les adventices

La compétition est un phénomène survenant lorsque deux organismes sont présents dans un même espace et que les ressources nécessaires à leur croissance sont limitées (Kaur et al., 2018). C'est une interaction négative, c'est-à-dire qu'elle est bénéfique à l'un des deux organismes et néfaste pour l'autre (Kaur et al., 2018). Lors d'une compétition entre végétaux, c'est la plante qui occupe en première l'espace qui vise à en exclure les autres (Kaur et al., 2018). Les éléments principaux pour lesquels les organismes entrent en compétition sont l'espace, le sol, la lumière, l'eau et les nutriments (Kaur et al., 2018).

Gérer la compétition entre la culture et les mauvaises herbes est un moyen de lutte contre ces dernières. Influencer les interactions biologiques est une option plus économique et durable que les herbicides (Gaba et al., 2018). Selon l'étude de Gaba et al (2018), la simple présence de la culture et à sa meilleure captation de l'azote a réduit la biomasse des adventices de 65%. Toujours d'après celle-ci, il s'est avéré que la compétition a surtout affecté les espèces dominantes mais n'a pas eu d'effet

significatif sur les espèces intermédiaires, ni sur la diversité d'adventices. Toutefois, l'auteur explique qu'influencer la compétition en conditions réelles et naturelles est un processus délicat car dépendant de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques. Par exemple, la composition de la population d'adventices dépend de l'historique de la parcelle, des pratiques agricoles, du désherbage mécanique ou chimique réalisé sur la parcelle (Malice E. et al., n.d.; Gaba et al., 2018). Un autre facteur important est aussi la spécificité de la relation culture-adventice en fonction des espèces végétales mises en compétition.

Pour influencer la compétition entre la culture et les adventices, les scientifiques tentent d'utiliser la fertilisation azotée. Un essai a été réalisé en 1997 et 1999 au Pays-Bas afin de déterminer si une augmentation de la dose de fertilisant azoté pouvait réduire la croissance des adventices tardives. Cet essai a été réalisé par Van Delden et al. (2002) sur des cultures de froment de printemps et de pommes de terre avec pour adventice le mouron des oiseaux. L'hypothèse de cette étude est que la surface foliaire du couvert végétal de la culture est amplifiée grâce aux engrais azotés et donc que la lumière arrivant au sol et pouvant être captée par les adventices est diminuée. Les conclusions de Van Delden et al. (2002) sont qu'à une forte dose d'azote, la compétition entre le froment et le mouron a été augmentée. L'étude a montré que la quantité d'azote prélevée par le mouron s'est accentuée avec l'augmentation de la dose d'azote apportée à la culture menant à un accroissement de la biomasse sèche et du nombre de graines produit par le mouron et qu'à l'inverse, la compétition entre la pomme de terre et l'adventice s'est vue réduite avec l'augmentation de la dose d'azote. La diminution de biomasse du mouron a été associée à une réduction du niveau de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) arrivant au sol en culture de pommes de terre (Van Delden et al., 2002). Rappelons que cette étude a été réalisée sur base de doses d'azote différentes et non pas sur des formes d'azote différentes.

Bien que la dose d'engrais azoté semble être une piste prometteuse pour la gestion de adventices, des questions se posent sur le type d'engrais utilisé. Effectivement, ces dernières années, l'utilisation d'engrais azotés minéraux a entraîné la sélection d'adventices nitrophiles avantagées dans des sols riches en nitrates. Il est donc pertinent de se demander si l'utilisation d'engrais à base d'ammonium pourrait donner un avantage au froment sur les adventices. Cette stratégie permettrait à la fois de valoriser au mieux les engrais azotés et de lutter en même temps contre les adventices en réduisant l'utilisation des herbicides. En effet, une fertilisation plus concentrée en ammonium est moins exposée aux pertes par lixiviation ou à la dénitrification (Raun et al., 1999).

D'autre part, pour que la plante puisse prélever l'azote majoritairement sous forme d'ammonium, celui-ci doit être idéalement appliqué sous forme « stabilisée » afin de ralentir sa nitrification en nitrate dans le sol. Pour ce faire, des inhibiteurs de la nitrification sont ajoutés aux engrais. Les 3,4-diméthylpyrazole phosphate (DMPP) sont des inhibiteurs de nitrification synthétiques réduisant l'activité de bactéries oxydant l'ammonium (AOB) (Fuertes-Mendizábal et al., 2019). Les DMPP sont de plus en plus utilisés car ils sont moins phytotoxiques et plus efficaces à de faibles doses que d'autres inhibiteurs telle que la dicyandimide (DCD) (Fuertes-Mendizábal et al., 2019). Leur efficacité d'inhibition est également de plus longue durée même sous de fortes pluies et peut atteindre 6 à 8 semaines (Benckiser et al., 2001; Havlin J. L. et al., 2014).

Avant d'utiliser l'ammonium comme unique source d'azote pour le froment, il est important de vérifier que celui-ci permet d'obtenir des rendements similaires à une fertilisation aux nitrates. En 1973, Cox et Reisenauer ont réalisé une étude basée sur la comparaison de la croissance et du prélèvement d'ions sur du blé fertilisé avec de l'azote sous forme de nitrate, d'ammonium ou les deux formes

ensemble. Les auteurs ont mis en évidence que d'une part, le taux d'azote prélevé et d'autre part, le contenu protéique des plantes étaient maximaux lors d'une fertilisation apportant à la fois des nitrates et de l'ammonium. Le type de sources d'azote s'est révélé avoir une influence sur le prélèvement des ions (Cox et al., 1973). Effectivement, lorsque la concentration en NH_4^+ est accrue dans le sol, le prélèvement d'N, P et S est augmenté et, à l'inverse, le prélèvement de Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+} diminue. Cet effet peut être expliqué par une stimulation du prélèvement d'anions due à une augmentation d'absorption de cations (NH_4^+). La diminution du prélèvement de cations peut être liée à la concurrence ionique régnant au niveau du site de prélèvement causée par les ions NH_4^+ ou bien par les ions H^+ produits à la suite de l'absorption de NH_4^+ . Finalement, les auteurs ont détecté une croissance des plantes fertilisées avec uniquement de l'ammonium égale ou légèrement supérieure à celle des plantes n'ayant reçu que des nitrates (Cox et al., 1973). Par ailleurs, selon l'étude de Teresa Fuertes-Mendizábal et al. (2013), du blé ayant reçu une fertilisation azotée à base d'ammonium produit un grain de meilleure qualité et est capable d'atteindre des rendements équivalents à ceux d'un blé fertilisé aux nitrates. En effet, le blé ayant reçu de l'ammonium a produit un nombre de talles fertiles par plant supérieur de 15% et des grains ayant un poids supérieur de 5,8%, par rapport à du blé ayant reçu une nutrition azotée composée de nitrate. Le contenu en azote des grains a augmenté de 22% et la quantité de protéines de réserve, gliadine et gluténine, a également été amplifiée par la nutrition ammonium. Toutefois, le nombre de grains par épi a diminué de 23%. Bien que les valeurs des composantes du rendement en grains (nombre de talles, nombre de grains par épi et poids du grain) soient différentes, ce dernier reste similaire entre les deux fertilisations azotées.

Depuis les cinquante dernières années, la sélection des variétés de blé n'a cessé de progresser pour augmenter les rendements de cette culture dans des systèmes à haut niveau d'intrants (Voss-Fels et al., 2019). Les variétés de froment ont principalement été sélectionnées pour leur rendement en grains, leur résistance aux maladies et leur taille de tige réduite afin de lutter contre la verse (Cantarel et al., 2021). Cantarel et al. (2021) a étudié la variabilité de traits fonctionnels entre 57 variétés de blé et a mis en évidence une forte variabilité de la capacité de prélèvements des ions NH_4^+ et NO_3^- par les racines entre les variétés de blé. Jusqu'à aujourd'hui, les différentes aptitudes de prélèvement d'ammonium ou de nitrate par le blé ont été peu étudiées. Les auteurs rapportent également que les anciennes sélections en froment ont mené au développement de variétés capables de prélever préférentiellement l'ammonium pour les froments cultivés en agriculture biologique et des variétés préférant les nitrates pour les systèmes d'agriculture conventionnels. Ce choix de sélection s'explique par la forte présence de nitrate dans les systèmes conventionnels due à la nitrification des engrais azotés minéraux ajoutés (Cantarel et al., 2021). Cette possibilité de sélection des variétés de froment capables de prélever et d'utiliser l'ammonium pourrait être un levier pour la stratégie de lutte contre les adventices exposée dans ce travail.

La fertilisation à base d'ammonium ne semble donc pas poser préjudice au froment ni à son rendement. Il faut donc maintenant déterminer s'il en est de même pour les adventices, le but étant que celles-ci ne puissent pas aussi bien valoriser l'ammonium que le froment et se retrouvent en déficit d'azote. Si cette hypothèse est confirmée, la culture pourrait en tirer un avantage compétitif et prendre le dessus sur les mauvaises herbes grâce à une croissance plus précoce et plus rapide. Cependant, très peu d'informations concernant la capacité spécifique des espèces d'adventice à prélever et utiliser différentes sources d'azote figurent dans la littérature. Or, ces données sont indispensables pour développer de nouvelles stratégies de lutte basées sur la fertilisation azotée différenciée.

2 Objectifs et hypothèses

Le but de ce mémoire est de contribuer à l'évaluation du comportement des adventices face à une fertilisation azotée à base de nitrate ou d'ammonium. Ce travail s'inscrit dans la recherche d'une méthode de lutte contre les adventices tout en augmentant l'efficacité d'utilisation des engrais azotés par le froment.

Les deux objectifs principaux de ce travail de fin d'étude sont :

- Déterminer en substrat minéral (vermiculite) et en conditions contrôlées si le vulpin et le mouron ont une préférence pour une source azotée, soit le nitrate de potassium, soit l'ammonium stabilisé ;
- Déterminer si l'adventice est pénalisée en fertilisation ammonium et si le froment peut en tirer un avantage compétitif.

Deux objectifs secondaires feront également l'objet de cette étude, à savoir :

- Outre le sulfate d'ammonium et le nitrate de potassium, analyser le comportement du vulpin et du mouron fertilisés avec de l'ammonium nitrate ;
- Déterminer si des géotypes de froment ayant des capacités contrastées à prélever et utiliser l'ammonium comme source d'azote démontrent également un pouvoir compétitif contrasté vis-à-vis du développement des adventices.

Les hypothèses de travail utilisées pour interpréter les résultats sont les suivantes :

- Le type de fertilisation azotée (ammonium stabilisé, nitrate ou ammonium-nitrate) influence la dynamique de développement de l'adventice cultivée seule ainsi que sa biomasse après 6 semaines de croissance ;
- Le choix de la fertilisation azotée et du géotype de froment influence la biomasse produite par l'adventice ;
- La variété de froment ayant des capacités à prélever et utiliser l'ammonium démontre un pouvoir compétitif plus important contre les adventices en fertilisation ammonium. Il en est de même en fertilisation nitrate avec la variété de froment ayant des capacités à prélever et utiliser les nitrates.

3 Matériel et méthodes

L'essai expérimental a été mené dans une serre sur le site de la faculté des sciences agronomiques de Gembloux Agro Bio-Tech. Deux expériences ont été conduites simultanément en vue de répondre aux objectifs de ce travail. La première consiste à exposer les adventices seules à trois traitements, l'un à base de nitrate, l'autre d'ammonium et le dernier d'ammonium-nitrate. La seconde expérience met en compétition chaque adventice avec du froment d'hiver. Les pots en compétition ont également reçu soit une fertilisation azotée contenant des nitrates ou de l'ammonium.

3.1 Choix du substrat : prétest

3.1.1 Design expérimental du prétest

Afin de choisir le substrat le plus adéquat pour cette expérience, un prétest a été réalisé. Trois substrats ont été testés, à savoir la vermiculite pure et deux mélanges sol-sable en proportion 2 :1 (w:w) et 1 :1 (w:w). Le but de ce prétest était de déterminer la capacité de chacun des substrats à garder l'azote sous forme d'ammonium en évitant la nitrification. Les différentes modalités de ce prétest sont exposées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Modalités du prétest pour le choix du substrat

Facteurs	Nombre de modalité	Modalité
Substrat	3	Vermiculite Mélange sol-sable en proportion 2 :1 Mélange sol-sable en proportion 1 :1
Dose de DMPP	2	1% de l'N 3% de l'N
Dose d'ammonium sulfate	2	50mg N/kg de sol sec 100mg N/kg de sol sec

Ce prétest a duré 4 semaines avec l'ajout d'une dose de fertilisant chaque semaine. Une moitié des individus ont donc reçu 12,5mg N/kg sol sec et l'autre moitié 25mg N/kg sol sec de façon hebdomadaire. L'expérience a été réalisée dans des tubes de type Falcon de 50mL contenant soit 5g de vermiculite ou 10g de mélange sol-sable. Une fois les Falcons remplis avec le substrat adéquat, ils ont été fermés avec du Parafilm troué afin de créer un milieu aéré (Figure 8). Les tubes ont ensuite été conservés à l'abri de la lumière en chambre d'incubation (20°C) pendant toute la durée du prétest.



Figure 8. Photographie du dispositif expérimental du prétest

Le contenu en eau des pots a été maintenu à 60% WFPS (water-filled pore space) pendant toute la durée du prétest. Ce taux d'humidité a été choisi car il semble être le meilleur compromis entre une aération du sol et son contenu en eau propice à l'activité des micro-organismes (Fuertes-Mendizábal et al., 2019). Chaque semaine, trois Falcons de chaque modalité ont été sélectionnés en vue de l'extraction et du dosage de l'azote de leur contenu. L'extraction a été réalisée avec du KCl 2M et le dosage par spectrophotométrie. Deux Falcons ont servi pour l'extraction d'N tandis que le troisième Falcon a été mis à l'étuve à 105°C pendant 24h afin d'en déterminer la masse sèche.

3.1.2 Extraction KCl

Du KCl 2M a été ajouté aux substrats en proportion 1 :2 (w:v), c'est-à-dire que les Falcons contenant la vermiculite ont reçu 10mL de KCl alors que ceux renfermant du sol en ont reçu 20mL. Les tubes ont ensuite été fixés horizontalement sur un mélangeur orbital (Figure 9) et secoués pendant une heure à 165rpm. Le contenu des tubes a ensuite été filtré à l'aide de filtre Wathman n°42 (Figure 10), puis les filtrats obtenus ont été stockés à -20°C.



Figure 9. Falcons fixés à l'horizontale sur le mélangeur orbital

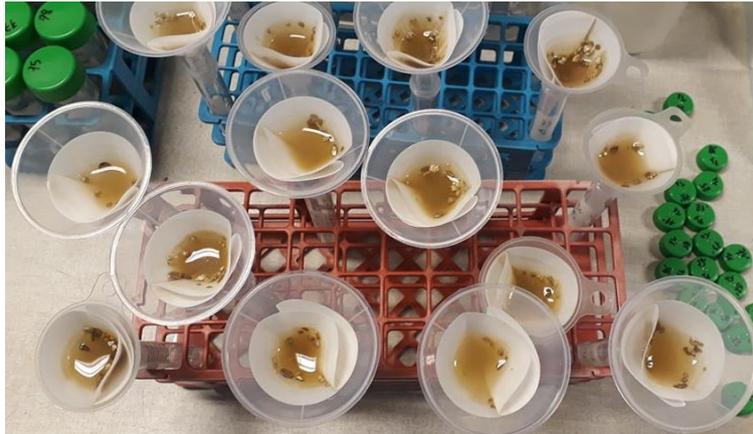


Figure 10. Filtration des échantillons après l'extraction au KCl

3.1.3 Dosage de l'azote minéral

L'azote contenu dans les filtrats récupérés après l'extraction au KCl a ensuite été dosé par spectrophotométrie. Les échantillons ont été répartis sur une microplaque de 96 puits (Figure 11) en présence des réactifs adéquats (Annexe 1) en fonction de la forme d'azote ciblée.



Figure 11. Dosage de l'azote. Microplaques de détermination de concentration de nitrate, ammonium et nitrite.

Les nitrates ont été déterminés à partir de la méthode VCl_3 -Griess de Miranda et al., (2001). Les nitrates (NO_3^-) ont d'abord été réduits en nitrite avec le VCl_3 . Ensuite, le contenu total en nitrite (NO_x^-) a été estimé à l'aide du réactif de Griess. Les nitrites présents à l'origine ont ensuite été dosés avec la solution de Griess. La concentration réelle en NO_3^- a ensuite été calculée comme suit : $NO_3^- = NO_x^- - NO_2^-$. Sur chaque plaque a été ajoutée une droite d'étalonnage préparée à base de KNO_3 pour les nitrates et de $NaNO_2$ pour les nitrites (Annexe 2). Après 30 minutes pour les nitrates et 15 minutes pour les nitrites, l'absorbance a été calculée par le spectrophotomètre à 540nm.

Le contenu en ammonium a été déterminé par la méthode Berthelot (Patton et al., 1977). Celle-ci est basée sur le dosage d'hypochlorite de phénol. Les échantillons dilués ont été également insérés dans des microplaques de 96 puits et trois réactifs à base de sodium phénolate, de sodium nitroprusside et de sodium hypochlorite leurs sont ajoutés (Annexe 1). Une droite d'étalonnage à base de $(NH_4)_2SO_4$ a été jointe sur la plaque (Annexe 2). Après 30 minutes, l'absorbance a été lue dans le spectrophotomètre à 635nm.

3.2 Dispositif expérimental

Dans le but de déterminer la source azotée préférentielle des adventices, le vulpin et le mouron ont été plantés seuls dans des pots et exposés à deux fertilisations différentes : nitrate ou ammonium. Ensuite, afin de tester si le froment peut tirer un avantage compétitif vis-à-vis de l'adventice en fertilisation ammonium, le froment a été mis en compétition avec du mouron et du vulpin et a été fertilisé avec les deux types d'azote (nitrate ou ammonium). Deux variétés de froment ayant des capacités contrastées à prélever et à utiliser l'ammonium ont été sélectionnées dans le but d'étudier si ces deux génotypes démontrent également un pouvoir compétitif contrasté vis-à-vis du développement des adventices.

Les différentes modalités de l'expérience sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Modalités de l'expérience

Facteurs	Nombre de modalités	Modalités
Fertilisation	2	- Ammonium sulfate + DMPP - Nitrate de potassium
Compétition	3	- Pas de compétition (adventice seule) - Compétition avec froment Cellule - Compétition avec froment KWS Smart
Adventice	2	- Mouron des oiseaux - Vulpin des champs
6 répétitions pour chaque modalité		

Un troisième type de fertilisation à base d'ammonium nitrate a également été testé mais sur des pots contenant uniquement une adventice. Cette modalité supplémentaire avait pour but d'analyser la dynamique de croissance des adventices en présence d'un équilibre des deux formes d'azote. Ce type de fertilisant a été choisi car, à l'heure actuelle, un apport simultané d'ammonium et de nitrate est souvent pratiqué dans les cultures céréalières. Les pots supplémentaires contenant une seule adventice fertilisée avec de l'ammonium nitrate ont été répétés trois fois pour chaque espèce d'adventices.

Des pots témoins ne contenant aucune plante ont été utilisés pour contrôler la concentration en azote de chaque modalité. Les modalités des pots témoins sont les suivantes :

Six pots témoins ayant reçu le traitement au sulfate d'ammonium +DMPP ;

Six pots témoins ayant reçu le traitement au nitrate de potassium ;

Deux pots témoins ayant reçu le traitement à l'ammonium nitrate ;

Quatre pots témoins n'ayant reçu aucune fertilisation.

Toutes les semaines, un échantillon de vermiculite a été prélevé pour en doser le contenu en ammonium, nitrate et nitrite. Certains pots témoins n'ont reçu aucune fertilisation durant l'expérience afin d'analyser l'évolution du stock d'azote contenu à l'origine dans la vermiculite.

Le nombre de pot total utilisé pour cette expérience est calculé dans l'équation suivante :

$$\text{Nombre total de pots} = 2 \times 3 \times 2 \times 6 + 2 \times 3 + 6 + 6 + 2 + 4 = 96 \text{ pots}$$

Le plan expérimental utilisé était un dispositif aléatoire complet étant donné qu'il n'y avait aucun gradient d'hétérogénéité. Les 96 pots ont été répartis par ligne de 4 pots sur 24 colonnes (Figure 12). Chaque semaine les pots ont été mélangés aléatoirement afin d'éviter les différences d'éclairage pouvant créer un biais.



Figure 12. Photo du design expérimental. Répartition aléatoire des 96 pots en 4 lignes de 24 colonnes.

3.2.1 Matériel végétal et germination

Pour réaliser cet essai, le matériel végétal utilisé a été le suivant :

- Mouron des oiseaux (Arbiotech, France, 2021)
- Vulpin des champs (Arbiotech, France, 2021)
- Froment d'hiver de la variété Cellule (Florimond Desprez, France, 2020)
- Froment d'hiver de la variété KWS Smart (KWS, France, 2020)

Les deux variétés de froment ont été choisies sur base de leur capacité d'utilisation de l'ammonium. Un ratio $\text{NH}_4\text{-NH}_4\text{NO}_3$ sur base des masses fraîches aériennes leur a été déterminé en hydroponie ou semi-hydroponie (sable) par Jauregui et al. (Unpublished). Froment Cellule possède un ratio $\text{NH}_4\text{-NH}_4\text{NO}_3$ de 1,207 tandis que le ratio du froment KWS_Smart est de 0,58. Le froment Cellule a donc été choisi pour sa supposée meilleure utilisation de l'ammonium et KWS_Smart pour sa meilleure valorisation des nitrates.

Le taux de germination du froment a été testé et estimé à 90% pour les 2 variétés. Celui du vulpin a été déterminé à environ 60% et celui du mouron entre 10 et 30%.

Les graines d'adventice ont été mises en prégermination avant le début de l'expérimentation pour assurer la croissance d'un minimum de plants d'adventice nécessaire à l'expérience. Dans une boîte de Pétri, sur 2 papiers filtres humidifiés, 10 graines ont été disposées et ensuite recouvertes par 2 autres papiers filtres également humides. Afin d'assurer l'humidification des papiers filtres, 5mL d'eau distillée ont été utilisés. Les boîtes ont ensuite été fermées à l'aide de Parafilm et déposées en chambre d'incubation. Les boîtes contenant les graines de mouron ont été laissées exposées à la lumière, tandis que celles contenant les graines de vulpin ont été maintenues à l'obscurité.

Lors du lancement de l'expérimentation, les graines de vulpin prégermées ont été transplantées dans les pots devant contenir un vulpin. Cependant, malgré plusieurs prétests et un grand nombre de graines de mouron mis en prégermination, il s'est avéré qu'un nombre insuffisant de graines a germé. Ce qui a amené à la plantation de 5 à 6 graines de mouron dans les pots devant contenir initialement un plant de mouron prégermé. Dans les pots en compétition, 4 graines de froment ont été semées pour avoir l'assurance d'au moins 3 froments par pot. Les graines de froment ont été semées autour de la graine d'adventice occupant le centre du pot. Après l'émergence des graines, les plants excédentaires de mouron et froment ont été retirés.

3.2.2 Choix du substrat et sa capacité de rétention d'eau

À la suite du prétest, le choix du substrat s'est porté sur la vermiculite. Ce matériau est à l'origine composé de minéraux argileux naturels possédant une structure en couche contenant de l'eau (Papadopoulos et al., 2008). La vermiculite est produite en chauffant à 1000°C la matière première broyée et tamisée. L'eau contenue dans le matériau se transforme en vapeur et écarte les couches les unes des autres (Papadopoulos et al., 2008). L'avantage de l'utilisation d'un substrat minéral est l'absence de bactéries nitrifiantes et donc la stabilité de l'ammonium apporté. La vermiculite utilisée pour cette expérience provient de la marque Nestaan et possède une granulométrie de 0,5 à 4mm et une densité de 65 à 145kg/m³ selon la granulométrie et l'origine.

La teneur en eau du substrat a été décidée initialement et maintenue constante durant toute l'expérience. La WHC (Water Holding Capacity) de la vermiculite a été fixé à 60% comme utilisé lors du prétest. Cependant, c'est la méthode WHC (Annexe 3) qui a été utilisée et non plus la WFPS, comme lors du prétest, jugée imprécise pour ce type de substrat. Après la réalisation du protocole, il a été déterminé que pour la vermiculite utilisée 2,186g d'eau devait être ajouté par g de substrat frais pour atteindre les 60% de WHC. L'arrosage des plantes a été réalisé à l'aide d'eau distillée tous les deux jours sur base du poids des pots afin de conserver les 60% de WHC. Ce pourcentage d'eau dans le sol est non seulement adéquat à la croissance des plantes mais permet également d'empêcher le lessivage d'azote par un écoulement d'eau excessif et non retenu par le substrat.

3.2.3 Solution nutritive

Etant donné la pauvreté en nutriments de la vermiculite, une solution nutritive a été apportée, de façon hebdomadaire dès le premier jour et ce pendant 4 semaines, pour assurer une croissance optimale des plantes. Cette solution a été réalisée sur mesure afin de répondre aux besoins des végétaux. La quantité d'éléments nutritifs à ajouter a été calculée sur base du pourcentage optimal retrouvé dans les tissus d'une plante (Grusak et al., 2016). La biomasse sèche des 4 plantes par pot, au bout de 6 semaines, a été estimée à 3 grammes sur base de données obtenues lors d'une autre expérience réalisée précédemment au sein du laboratoire (Vega Mas, communication personnelle). Les quantités totales de chaque nutriment en milligramme ont été calculées en multipliant le

pourcentage de la concentration optimale du nutriment retrouvée dans les tissus végétaux par 3 (représentant les 3g de biomasse sèche estimés). Ces quantités sont exposées dans le tableau suivant (Tableau 3). Cette solution contient du calcium (Ca), phosphore (P), fer (Fe), magnésium (Mg), manganèse (Mn), bore (B), zinc (Zn), cuivre (Cu), cobalt (Co), molybdène (Mo), soufre (S), potassium (K) et de l'azote (N) en fonction du fertilisant. La solution nutritive pour le traitement ammonium contenait également du DMPP à 1% d'N.

Tableau 3. Quantités optimales de chaque élément nutritif apporté aux plantes

Éléments	Biomasse sèche estimée pour les 4 plantes après 6 semaines (g)	Concentration optimale dans les tissus (%)	Quantité totale d'éléments nutritifs à apporter dans la solution nutritive par pot (mg)
Ca	3	0,2	6
P	3	0,2	6
Fe	3	0,005	0,15
Mg	3	0,2	6
Mn	3	0,002	0,06
B	3	0,0004	0,012
Zn	3	0,002	0,06
Cu	3	0,0006	0,018
Co	3	0,00006	0,0018
Mo	3	0,00006	0,0018
N	3	3	90

Un pot contenant 317g de vermiculite sèche, la dose d'azote totale apportée par pot a été arrondie à 300 mg N/Kg substrat sec. Selon les modalités de fertilisant, l'azote a donc été apporté sous trois formes différentes, à savoir : sous forme d'ammonium en utilisant du $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, sous forme de nitrate avec du KNO_3 , ou bien sous forme d'ammonium nitrate (NH_4NO_3) . L'ajout du fertilisant azoté a donc également engendré l'ajout de soufre et de potassium. Les quantités en soufre et potassium à apporter aux plantes ont donc du être adaptées en fonction du fertilisant ajouté. De plus, du soufre et du potassium ont aussi été ajoutés au travers des substances chimiques utilisées pour apporter d'autres minéraux (Annexe 4). Pour égaler les quantités de potassium apportées au traitement nitrates grâce à KNO_3 , les pots avec le traitement ammonium ont reçu 265,68mg de potassium. Ceux du traitement nitrate ont reçu quant à eux 108,96mg de soufre pour combler les apports reçus par les pots ammonium au travers du $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Les autres pots avec le traitement ammonium nitrate ont donc reçu 265,8mg de potassium et 108,96 mg de soufre.

L'apport d'élément nutritif (à l'exception du soufre) a été fractionné en 4 fois et appliqué une fois par semaine. La solution nutritive a été apportée à hauteur de 25mL par apport et à l'aide d'une pipette graduée, de manière à arroser l'entièreté de la surface du pot.

Les solutions mères avec la concentration idéale pour cette solution nutritive ont été préparées au préalable et utilisées pour les 4 apports. Pour les micronutriments (Mn, B, Zn, Cu, Co et Mo) une seule solution mère a été préparée contenant les six micronutriments. Le mélange des différentes solutions mères et l'ajout de DMPP ont été réalisés le jour même de l'application de la dose de fertilisant. L'Annexe 5 présente les concentrations de chaque élément dans 25mL de solution. Concernant le soufre, celui-ci a été introduit en une seule fois lors de la première dose de fertilisant, car la solubilité maximale du sulfate de calcium dans l'eau à 20°C est de 2,4g/L (<http://pravarini.free.fr/CaSO4.htm>). L'apport de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dans 25mL de solution requérait une concentration de 5,85g/L ce qui est supérieure à sa solubilité maximale, et donc le sulfate de calcium a donc été ajouté à la première dose dans un volume de 500mL pour une concentration de 1,17g/L.

Chaque semaine, avant l'emploi des solutions nutritives, le pH de celles-ci a été ajusté à 7.

3.2.4 Conditions de la serre

Un datalogger a été installé au centre de la paillasse dans la serre. Cet appareil a enregistré la température de l'humidité relative du milieu toutes les 6 heures (Annexe 6). La température moyenne sur les six semaines était de 21,1°C et l'humidité relative moyenne de 60,2.

Les conditions lumineuses journalières de la serre étaient 16 heures de lumière et 8 heures d'obscurité.

3.2.5 Contrôle du contenu en azote pour chaque modalité

3.2.5.1 Prélèvement vermiculite

Afin de contrôler le contenu en azote, trois prélèvements de 5g de vermiculite ont été réalisés toutes les semaines dans chaque pot témoin. Sur les trois prélèvements, deux ont servi au dosage d'azote et le troisième à la détermination du contenu en eau du pot. Ceux destinés au dosage de l'azote ont été réalisés, pour le premier, à 3-4cm de profondeur à l'aide d'une cuillère et le second a été extrait plus en profondeur à l'aide d'un tube métallique de 10cm de hauteur (Figure 13). Ces deux prélèvements, en superficie et en profondeur, ont permis d'estimer la répartition de la dose d'azote dans le pot au fur et à mesure de l'expérience.



Figure 13. Prélèvement de la vermiculite pour le dosage d'azote. Utilisation d'une cuillère et d'un tube métallique.

Une fois le substrat prélevé, l'étape suivante a été l'extraction au KCl, 15mL de KCl (2M) ont été ajoutés à chaque échantillon pour obtenir un ratio substrat:KCl de 1:3 (w:v). Le même protocole d'extraction a été utilisé que lors du prétest (3.1.2).

3.2.5.2 Dose de l'azote minéral

L'azote minéral contenu dans les filtrats a été dosé en appliquant la même démarche que décrite précédemment lors du prétest (3.1.3).

3.2.6 Observations et variables mesurées

3.2.6.1 Stade de développement des plants

La caractérisation des stades de développement des 3 espèces végétales a été réalisée à l'aide de l'échelle BBCH. Deux types d'échelle BBCH ont été utilisés, celle des céréales (Witzenberger et al. 1989, Lancashire et al. 1991 cités par Meier, 2018) pour le froment et celle des mauvaises herbes (Hess et al., 1997 cité par Meier, 2018) pour le mouron et le vulpin. Cette observation a été réalisée de façon hebdomadaire et pour chacune des plantes.

3.2.6.2 Hauteur et nombre de feuilles des plants

La hauteur des plants de froment et de vulpin a été mesurée une fois par semaine. Cette mesure a été effectuée à l'aide d'un mètre pliant, entre la surface du substrat et la feuille la plus haute (Figure 14).

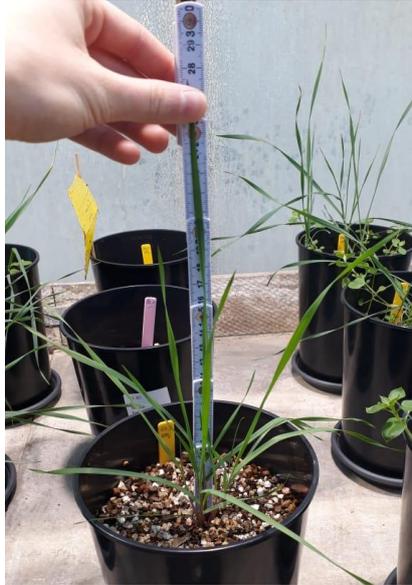


Figure 14. Mesure de la hauteur de la plus grande feuille à l'aide d'un mètre.

Le nombre de feuilles par mouron a également été relevé chaque semaine. Toutes celles entièrement dépliées ont été comptabilisées.

3.2.6.3 Biomasse sèche aérienne

Au bout de 6 semaines, lors de la récolte, les plantes ont été coupées à ras du substrat et ont été pesées pour en obtenir la masse fraîche aérienne. Elles ont ensuite été placées dans une étuve à 60°C pendant une semaine. Ce séchage a permis après un second pesage d'estimer la masse sèche (MS) des plantes.

3.2.6.4 Surface foliaire

La surface foliaire des plantes a été calculée à la récolte en fin d'expérience sur base d'une mesure destructive consistant à scanner les feuilles des plantes pour ensuite en déterminer la surface. Une fois récoltées, les plantes ont été effeuillées et les feuilles fraîches ont été pesées. Ces dernières ont ensuite été étalées entre 2 feuilles plastiques transparentes et scannées (Figure 15). Les images obtenues ont été traitées à l'aide du programme ImageJ qui a segmenté l'image (feuille et fond) sur base des pixels verts pour obtenir la surface foliaire. Seul un échantillon aléatoire de chaque espèce de plantes (mouron, vulpin, Cellule, KWS Smart) a été scanné. La surface foliaire des plantes non scannées a été estimée sur base de la relation linéaire entre la masse fraîche foliaire et la surface foliaire obtenue à l'aide des échantillons scannés (Annexe 7).

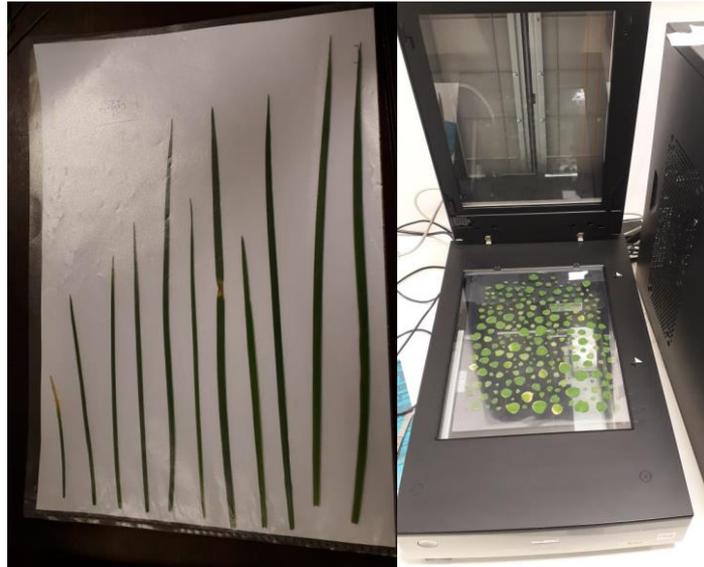


Figure 15. Etalement et scan des feuilles.

3.3 Analyses statistiques

Le traitement statistique des données a été réalisé avec le logiciel RStudio. Des analyses ont été effectuées pour le mouron, le vulpin, le froment Cellule et le froment KWS_Smart en fonction des paramètres mesurés lors de l'expérience.

Pour les variables quantitatives, des analyses de la variance (ANOVA) à 2 facteurs fixes (fertilisation et compétition) ont été réalisées. Lorsque l'interaction entre ces 2 derniers était significative, une décomposition en ANOVA à 1 facteur a été effectuée.

Concernant les pots contenant uniquement une adventice, des ANOVA à un facteur fixe (fertilisation) ayant 3 modalités (NH_4 , NO_3 et NH_4NO_3) ont été faites.

Les conditions d'application ont été vérifiées en utilisant les tests de Levene pour l'égalité des variances et Shapiro-Wilk pour la normalité des résidus. Si les conditions n'étaient pas respectées (p -valeur $< 0,05$), une ANOVA par permutation a été réalisée.

En présence de différence significative mise en évidence par l'ANOVA, une hiérarchisation des moyennes a été exécutée par le test de Newman et Keuls (SNK) selon le facteur significatif.

Un modèle linéaire généralisé (GLM) a été opéré en vue de traiter les données de comptage du nombre de feuilles chez le mouron. La fonction de lien log et une distribution de Poisson ont été utilisées pour les GLM. Pour les 3 premières semaines de croissance, des GLM à 2 facteurs fixes (fertilisation et compétition) ont été utilisés lorsque la moyenne du nombre de feuilles était inférieure à 30. Ensuite, vu l'augmentation des valeurs des données, une ANOVA a été utilisée pour les 3 dernières semaines.

Enfin, pour les données qualitatives (stade BBCH), un test « khi carré » ou un test exact de Fisher a été pratiqué. Pour les 6 semaines, le nombre de plantes à chaque stade de développement a été répertorié et la médiane qui a été utilisée comme stade seuil pour déterminer chaque semaine le nombre de plants ayant atteint la croissance imposée ou non, en a été calculée. Des tableaux de contingence contenant d'une part les facteurs étudiés et d'autre part, l'atteinte ou non du stade seuil ont été créés. Lorsque plus de 80% des classes du tableau avaient une valeur théorique supérieure ou

égale à 5, le test de « khi carré » a été utilisé. Mais dans le cas inverse, ce fut le test exact de Fisher qui a été choisi. L'hypothèse nulle de ces deux tests était l'indépendance des deux variables. Dans le cadre de cette expérience, cela signifiait que l'atteinte ou non du stade de développement seuil était indépendante de la fertilisation, de la compétition ou de l'interaction de ces 2 dernières en fonction du facteur testé.

Pour toutes les analyses menées, l'hypothèse nulle de chaque test a été acceptée lorsque la p-valeur était supérieure à 0,05. Dans le cas contraire, trois niveaux de significativité ont été épinglés :

- Significatif (*) : $0,05 < p\text{-valeur} < 0,01$
- Hautement significatif (**) : $0,01 < p\text{-valeur} < 0,001$
- Très hautement significatif (***) : $p\text{-valeur} < 0,001$.

4 Résultats

4.1 Prétest substrat

Les résultats des dosages d'azote minéral (ammonium et nitrate) des différents substrats (sol:sable (2:1), sol:sable (1:1) et vermiculite) testés durant le prétest sont repris dans la présente section. Les 4 doses de fertilisant à base d'ammonium sulfate ont été appliquées respectivement au démarrage de l'expérimentation (T0), après une semaine (T1), deux semaines (T2) et trois semaines (T3).

Les teneurs en ammonium au cours du temps pour les différents substrats sont exposés dans le graphique de la Figure 16. Les teneurs en ammonium au temps « T-1 » ont été déterminées pour chaque substrat (sol:sable (2:1), sol:sable (1:1) et vermiculite) avant l'ajout de la première dose de fertilisant afin de connaître la concentration initiale en ammonium de chaque substrat.

Sur la Figure 16, la teneur en ammonium en « T0 » correspond pour chaque type de substrat à la concentration en ammonium directement après l'ajout de la première dose de fertilisant.

La teneur en « T1 » provient du dosage d'azote réalisé une semaine après l'ajout de la première dose.

La teneur en « T2 » provient du dosage d'azote réalisé une semaine après l'ajout de la deuxième dose.

La teneur en « T3 » provient du dosage d'azote réalisé une semaine après l'ajout de la troisième dose.

La teneur en « T4 » provient du dosage d'azote réalisé une semaine après l'ajout de la quatrième dose.

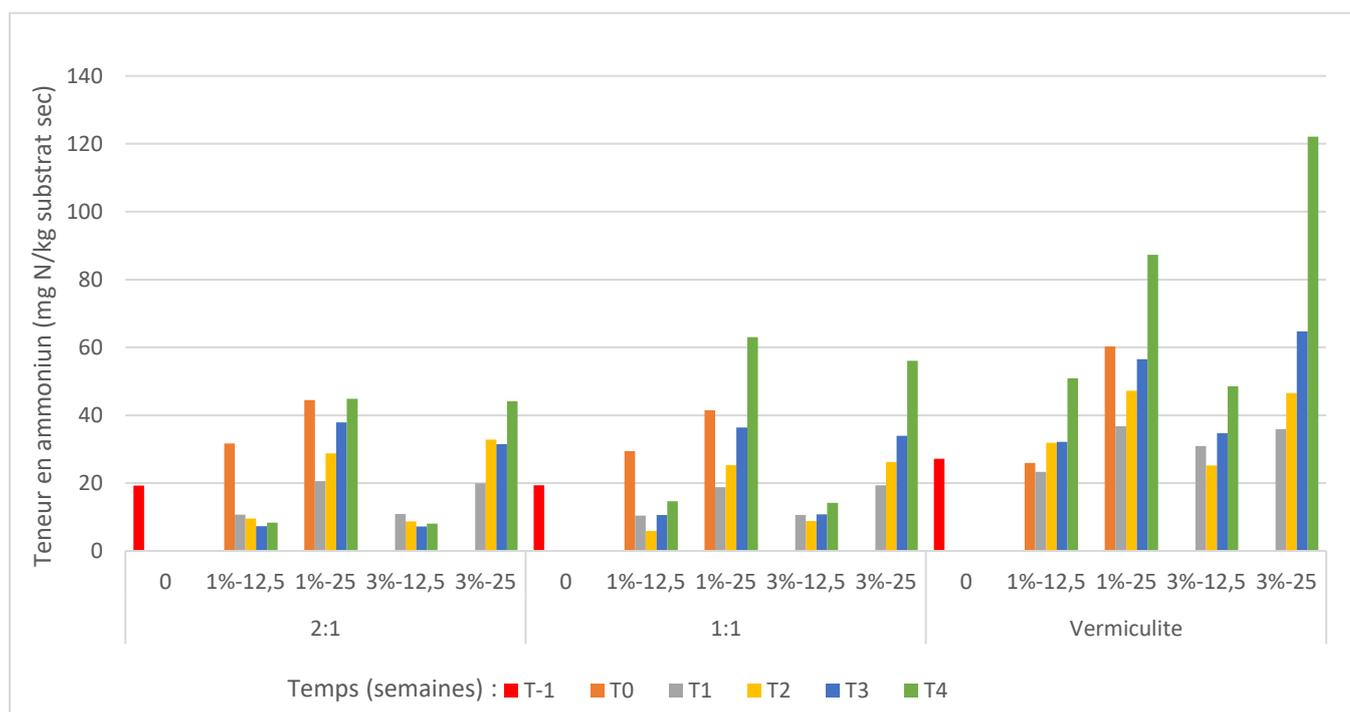


Figure 16. Graphique de l'évolution au cours du temps (T0 à T4) de la concentration en ammonium (mg N/kg substrat sec) pour les trois substrats testés (sol:sable (2:1), sol:sable (1:1), vermiculite) auxquels deux doses (12,5 ou 25 mg N-équivalent/kg substrat sec) d'ammonium sulfate ont été ajoutées chaque semaine et ceci en présence de DMPP appliqués selon deux concentrations (1 ou 3%).

Les substrats ayant reçu le traitement de 12,5mg N/kg substrat sec par semaine devaient atteindre une teneur en ammonium de 50mgN/kg substrat sec après l'ajout des 4 doses. De même, les substrats ayant reçu le traitement de 25mg N/kg substrat sec devaient atteindre au bout de 4 semaines une concentration en ammonium de 100mg N/kg substrat sec. Les 4 modalités du substrat vermiculite semblent avoir presque toutes atteintes leur objectif après 4 semaines. En effet, les substrats

vermiculites 1%-12,5 (DMPP%-mg N/kg substrat sec) et 3%-12,5 ont obtenu respectivement une concentration en ammonium de 50,9 et 48,5mg N/kg substrat sec à la fin du prétest. Les substrats vermiculites 1%-25 et 3%-25 ont atteint quant à eux une concentration en ammonium de 87,3 et 122,1mg N/kg substrat sec (Figure 16).

A l'opposé, les substrats sol:sable ont montré des pertes importantes d'ammonium et aucune des modalités n'a atteint son objectif de teneur en ammonium après 4 semaines d'incubation. Les substrats sol:sable ayant reçu le traitement de 12,5mg N/kg substrat sec par semaine ont atteint entre 8,05 et 14,6mg N/kg substrat sec au lieu de 50mg N/kg substrat sec. Il en est de même pour le traitement de 25mg N/kg substrat sec où le substrat sol:sable (1:1), 1%-25, est le plus proche de l'objectif avec néanmoins seulement 63,04mg N/kg de substrat sec (Figure 16).

Aucune différence significative n'a pu être remarquée entre les différentes concentrations de DMPP.

La Figure 17 présente les concentrations en nitrate des trois types de substrat en fonction du temps. Les teneurs en nitrate en « T-1 » ont été déterminées pour chaque substrat (sol:sable (2:1), sol:sable (1:1) et vermiculite) avant l'ajout de fertilisant afin de connaître la concentration initiale en nitrate de chaque substrat.

Les concentrations en nitrate ont significativement augmenté pour les substrats sol:sable dès la première semaine d'incubation. A l'inverse, la présence de nitrate dans la vermiculite avant l'expérience est insignifiante et le reste durant les 4 semaines. L'augmentation du pourcentage de DMPP à 3% ne semble pas avoir ralenti la nitrification dans les substrats sol:sable. Toutefois, l'augmentation des nitrates est plus faible dans les substrats sol:sable (1:1) que les substrats sol:sable (2:1).

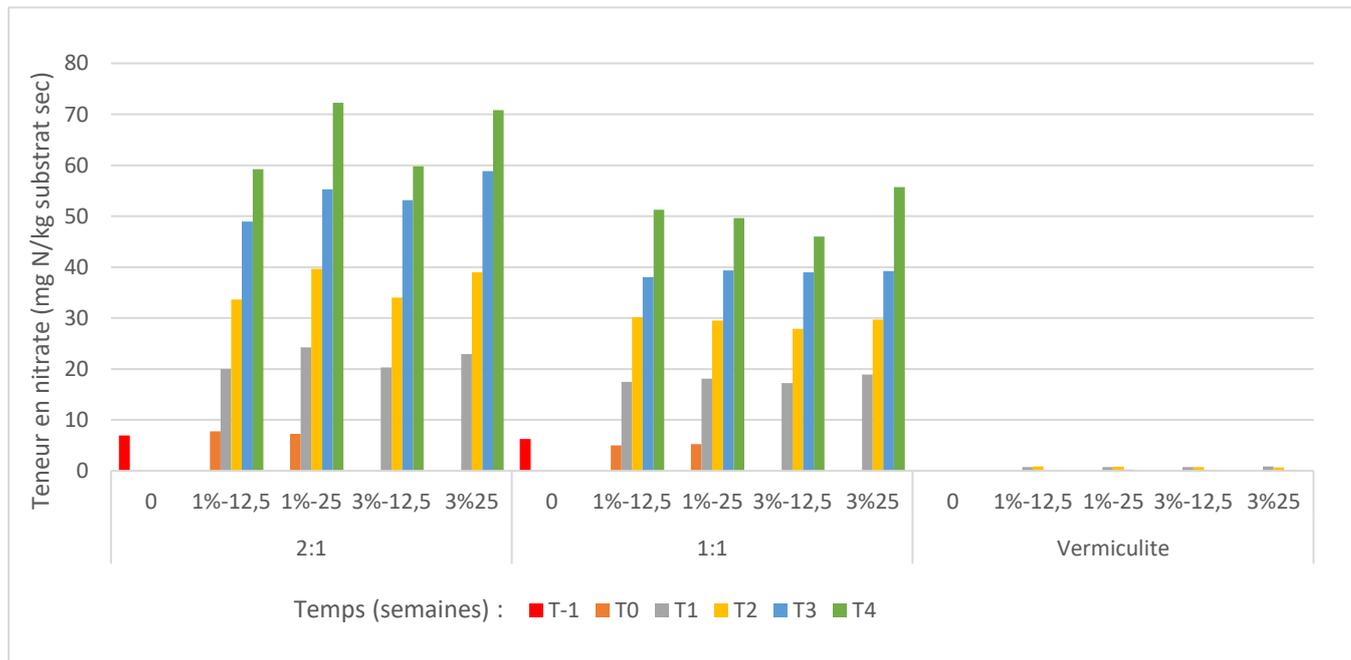


Figure 17. Graphique de l'évolution au cours du temps (T0 à T4) de la concentration en nitrate (mg N/kg substrat sec) pour les trois substrats testés (sol:sable (2:1), sol:sable (1:1), vermiculite) auxquels deux doses (12,5 ou 25 mg N-équivalent/kg substrat sec) d'ammonium sulfate ont été ajoutées chaque semaine et ceci en présence de DMPP appliqués selon deux concentrations (1 ou 3%).

En conclusion, dans les conditions d'incubation utilisées pour ce prétest, l'ammonium apporté sous forme d'ammonium sulfate, quelle qu'en soit sa dose n'a pas pu être stabilisé dans les substrats à base

de sol durant 4 semaines. Malgré un ajout de DMPP avec une concentration trois fois supérieure à la concentration recommandée, la nitrification de l'ammonium en nitrate n'a pas pu être empêchée dans les mélanges sol:sable. Sur base de ces résultats, c'est le substrat vermiculite qui a été retenu pour l'expérience principale où les conditions requises étaient l'absence non négociable de nitrate dans le traitement où l'azote était apporté sous forme d'ammonium.

4.2 Suivi du contenu en azote des pots témoins de l'expérience principale

Lors de l'expérimentation principale, trois traitements azotés de même dose mais de composition différente (nitrate, ammonium « stabilisé » et ammonium-nitrate) ont été appliqués. Afin d'éviter des prélèvements de substrat dans les pots pendant la croissance des plantes, des pots témoins sans plante ont été utilisés afin de suivre le contenu en azote des trois traitements. Cette section des résultats présente les concentrations en ammonium et en nitrate des 4 modalités de pot témoin (nitrate, ammonium stabilisé, ammonium-nitrate et sans fertilisant) au fil du temps. Les 4 doses de fertilisant ont été ajoutées au temps T0, T1, T2 et T3. Les prélèvements de vermiculite ont été réalisés avant l'ajout d'engrais excepté pour le temps T0 qui a été réalisé directement après l'application de fertilisant le premier jour de l'expérience. Les temps « T » représentent les prélèvements en surface du pot (3-4 premiers centimètres) et les temps « T' » les prélèvements en profondeur (10cm). Les prélèvements de substrat ont été réalisés de façon hebdomadaire pendant les 6 semaines de croissance.

Sur les Figure 18, Figure 19 et Figure 20, la teneur en azote minéral en « T0 » correspond à la concentration en azote dosé directement après l'ajout de la première dose de fertilisant.

Les teneurs en « T1 et T1' » correspondent aux dosages d'azote faits une semaine après l'ajout de la première dose.

Les teneurs en « T2 et T2' » correspondent aux dosages d'azote faits une semaine après l'ajout de la deuxième dose.

Les teneurs en « T3 et T3' » correspondent aux dosages d'azote faits une semaine après l'ajout de la troisième dose.

Les teneurs en « T4 et T4' » correspondent aux dosages d'azote faits une semaine après l'ajout de la quatrième dose.

Les teneurs en « T5 et T5' » correspondent aux dosages d'azote faits deux semaines après l'ajout de la quatrième dose.

Les teneurs en « T6 et T6' » correspondent aux dosages d'azote faits trois semaines après l'ajout de la quatrième dose.

4.2.1 Fertilisation nitrate de potassium

Le graphique de la Figure 18 représente les concentrations en azote des pots témoins du traitement à base de nitrate. Quasiment la totalité de l'azote dosé se retrouve sous forme de nitrate comme souhaité dans le cadre de cet essai.

La concentration en nitrate en surface augmente de façon croissante jusqu'à T4 représentant le dosage de la dernière dose d'azote appliquée. En T4, la concentration en nitrate est de 1056mg N/kg vermiculite sèche. Celle en profondeur croît également jusqu'en T4 mais de façon moins importante que celle en surface. La concentration en azote à 10 cm de profondeur est 2 à 3,5 fois moins concentrée que celle dosée à 3-4cm de la surface.

Après la quatrième semaine (T4), la concentration en azote aurait dû rester stable car plus aucune dose de fertilisant n'a été ajoutée. Or, à la cinquième semaine, la concentration en nitrate en surface a diminué d'environ 300mg N/kg vermiculite sèche et à la sixième semaine, elle a augmenté de 650mg N/kg vermiculite sèche. Les fluctuations de cette dernière peuvent s'expliquer par la variation du prélèvement de vermiculite dosé qui peut avoir été fait dans une zone du pot plus ou moins concentrée en azote en fonction de la répartition hétérogène du fertilisant.

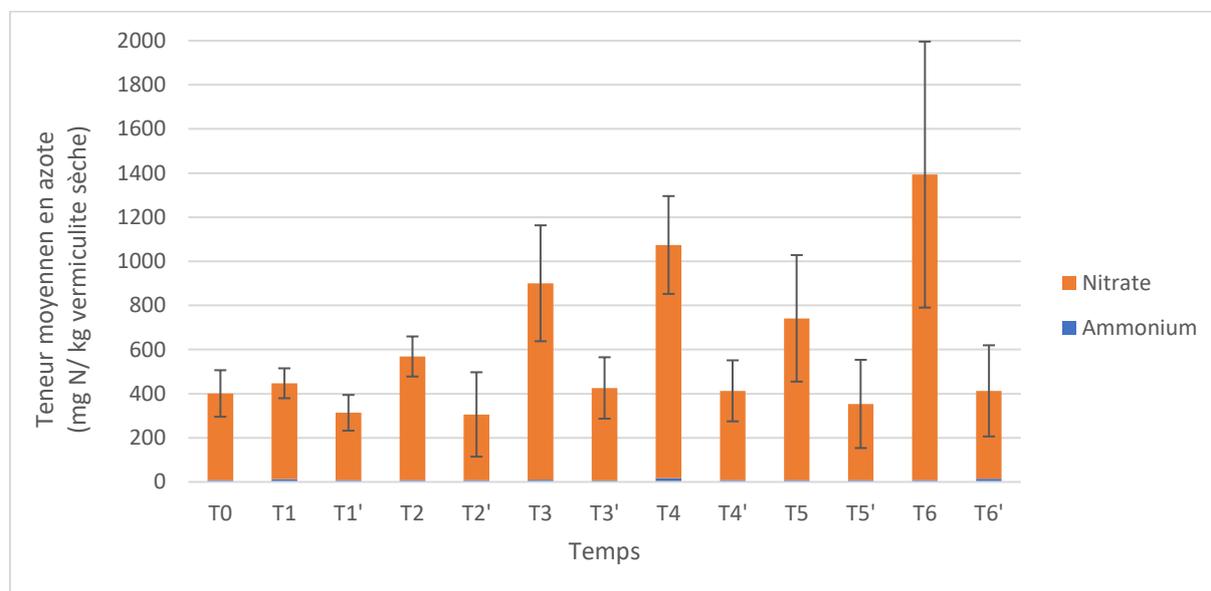


Figure 18. Evolution de la teneur moyenne en azote minéral (mg N/kg vermiculite sèche) en fonction du temps (T0 à T6) pour le traitement à base de nitrate de potassium. Les temps « T » représentent les prélèvements en surface (3-4 premiers centimètres) et les temps « T' » les prélèvements en profondeur (10cm). Les barres d'erreur correspondent aux écart-types.

En conclusion, la forme majoritaire d'azote minéral dosée dans les pots témoins ayant reçu la fertilisation au nitrate de potassium est bien le nitrate (NO_3^-) comme souhaité.

4.2.2 Fertilisation sulfate d'ammonium + DMPP

Le graphique de la Figure 19 relate la teneur moyenne en azote minéral des pots témoins ayant reçu le traitement à base d'ammonium stabilisé (ammonium sulfate + DMPP). La concentration en nitrate reste insignifiante durant les 6 semaines. En revanche, celle en ammonium augmente progressivement jusqu'au dosage de la quatrième dose de fertilisant en « T4 » où elle atteint 1358mg N/kg vermiculite sèche. Le contenu en ammonium en profondeur croît également mais de manière plus lente causant une différence de concentration de plus en plus importante entre la surface et la profondeur du pot.

Après la quatrième semaine (T4), la concentration en azote aurait dû rester stable car plus aucune dose de fertilisant n'a été ajoutée. Cependant, à partir de la cinquième semaine, celle-ci diminue aussi bien en surface qu'en profondeur.

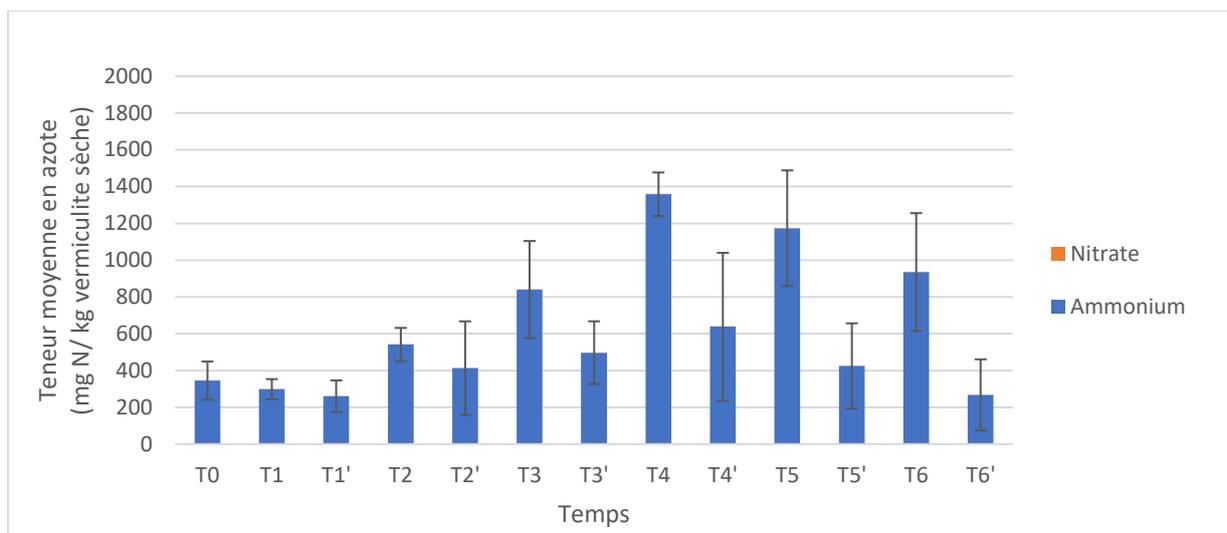


Figure 19. Evolution de la teneur moyenne en azote minéral (mg N/kg vermiculite sèche) en fonction du temps (T0 à T6) pour le traitement à base d'ammonium sulfate + DMPP. Les temps « T » représentent les prélèvements en surface (3-4 premiers centimètres) et les temps « T' » les prélèvements en profondeur (10cm). Les barres d'erreur correspondent aux écart-types.

En conclusion, la forme majoritaire d'azote minéral dosée dans les pots témoins ayant reçu la fertilisation à base de sulfate d'ammonium + DMPP est bien l'ammonium (NH_4^+) comme souhaité.

4.2.3 Fertilisation ammonium nitrate

Le contenu en azote minéral au fil du temps de pots témoins fertilisés à l'ammonium-nitrate est repris dans la Figure 20.

La teneur en azote suite au dosage semble être composée d'une proportion équivalente d'ammonium et de nitrate. La concentration en azote augmente en surface jusqu'à la troisième semaine (855mg N/kg vermiculite sèche) puis semble se stabiliser. Au cours des 6 semaines, la teneur en azote à 10 cm de profondeur n'a pas dépassé la concentration maximale de 515mg N/kg vermiculite sèche atteinte en T3'. Notons également que la teneur en azote en profondeur diminue à la deuxième et quatrième semaine.

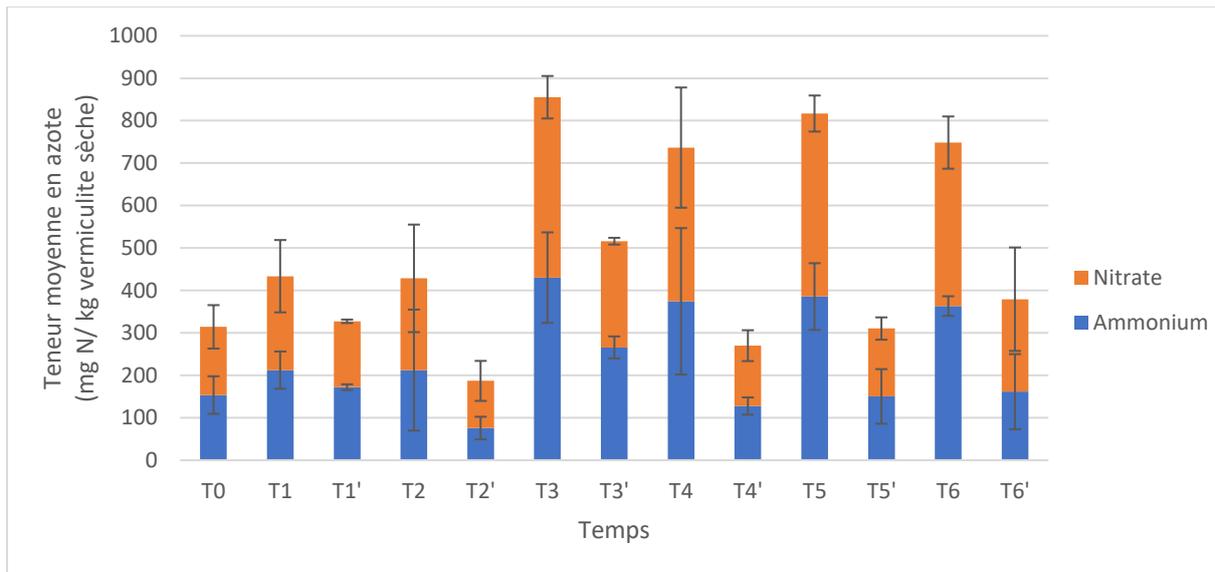


Figure 20. Evolution de la teneur moyenne en azote minéral (mg N/kg vermiculite sèche) en fonction du temps (T0 à T6) pour le traitement à base d'ammonium-nitrate. Les temps « T » représentent les prélèvements en surface (3-4 premiers centimètres) et les temps « T' » les prélèvements en profondeur (10cm). Les barres d'erreur correspondent aux écart-types.

Notons également que la teneur maximale en azote minéral dosée dans les pots fertilisés avec de l'ammonium-nitrate est inférieure à celles retrouvées pour les traitements NH_4^+ et NO_3^- . Or les 3 traitements ont apporté la même dose d'N aux substrats, seule la forme d'N appliquée a varié entre les traitements.

En conclusion, le traitement ammonium nitrate a quasiment apporté les mêmes quantités d'ammonium et de nitrate dans les pots.

4.2.4 Témoins sans fertilisant

La concentration en azote des pots témoins n'ayant reçu que de l'eau distillée (sans fertilisant) durant toute la durée de l'expérience a également été dosée (Figure 21). La teneur en azote ne dépasse pas les 15mgN/kg vermiculite sèche en surface et en profondeur. La quasi-totalité de l'azote contenu dans la vermiculite est sous forme d'ammonium.

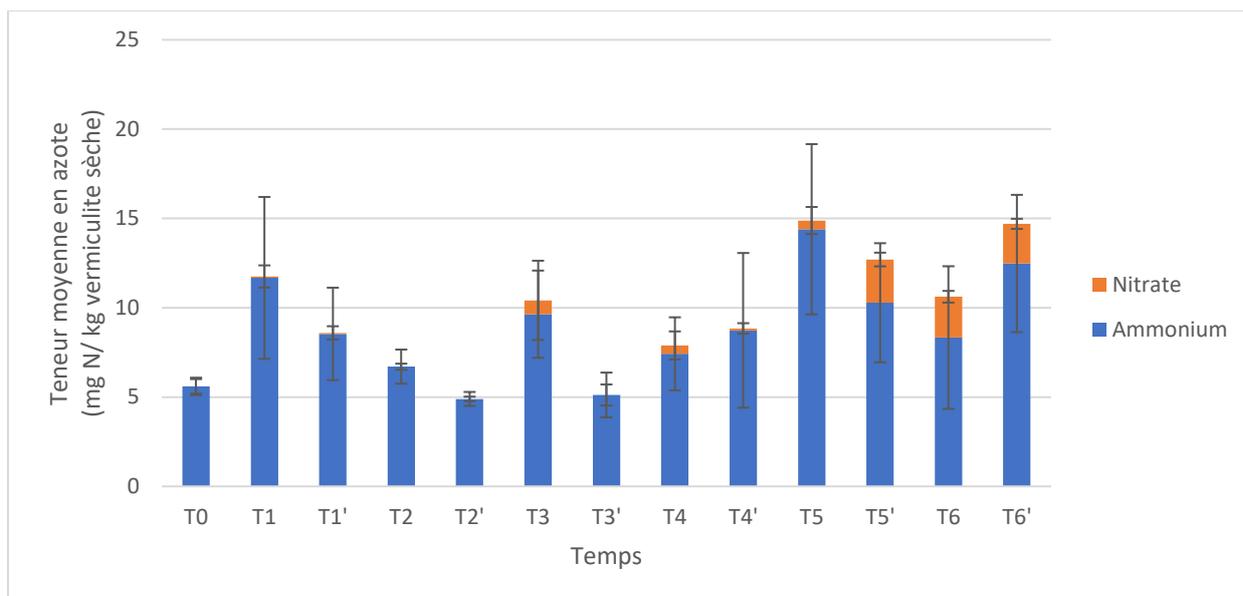


Figure 21. Evolution de la teneur moyenne en azote minéral (mg N/kg vermiculite sèche) en fonction du temps (T0 à T6) pour les pots sans traitement. Les temps « T » représentent les prélèvements en surface (3-4 premiers centimètres) et les temps « T' » les prélèvements en profondeur (10cm). Les barres d'erreur correspondent aux écart-types.

Ces derniers résultats ont permis d'estimer la concentration en azote contenu à l'origine dans la vermiculite. Ces concentrations sont très faibles par rapport à celles apportées par les fertilisants dans les 3 traitements.

4.3 Analyse de la biomasse aérienne

Cette section du présent rapport comprend les résultats des analyses statistiques des données récoltées relatives à la biomasse aérienne des plantes. Les 2 facteurs fixes des ANOVA 2 sont la fertilisation (nitrate ou ammonium) et la compétition (adventice seule, compétition avec froment Cellule ou compétition avec froment KWS_Smart). Des ANOVA 2 ont d'abord été réalisées sur chaque donnée mesurée pour chaque plante à savoir le nombre de feuille (mouron), la hauteur des plants (vulpin et froments), la masse sèche (MS) et la surface foliaire (SF). Les degrés de significativité des p-values obtenues pour ces ANOVA 2 sont repris dans la première partie des tableaux 4 et 5. Lorsque l'interaction des 2 facteurs (fertilisation et compétition) s'est avérée significative, une décomposition des ANOVA 2 en ANOVA 1 a été réalisée. Cette décomposition a été effectuée de 2 manières, soit selon la compétition ou soit selon la fertilisation. C'est-à-dire trois ANOVA 1 pour la décomposition selon la compétition avec comme facteur la fertilisation et deux ANOVA 1 pour la décomposition selon la fertilisation avec la compétition comme facteur de variation. Les résultats de ces décompositions sont présentés dans la partie centrale des tableaux 4 et 5.

Concernant les adventices cultivées seules, une ANOVA 1 a été réalisée pour déterminer l'influence de la fertilisation (nitrate, ammonium ou ammonium-nitrate). Les résultats de ces ANOVA 1 sont présentés dans la dernière colonne du tableau 4.

Tableau 4. Résultats des ANOVA pour le mouron et le vulpin. Df = Degré de liberté, Nb feuille = nombre de feuilles, MS = Masse sèche, SF = Surface foliaire, ns = non significatif, (*)=p-valeur<0,05 ; (**)=p-valeur<0,01 ; (***)=p-valeur<0,001.

	ANOVA 2			ANOVA 1 issues de la décomposition de l'ANOVA 2 s'il y a interaction des 2 facteurs					ANOVA 1
				Décomposition selon la compétition			Décomposition selon la fertilisation		
Mouron	Facteur : Fertilisation (F)	Facteur : Compétition (C)	Interaction : F*C	Mouron seul Facteur : (F)	Cellule Facteur : (F)	KWS_Smart Facteur : (F)	NH ₄ ⁺ Facteur : (C)	NO ₃ ⁻ Facteur : (C)	Facteur : (F)
Df	1	2	2	1	1	1	2	2	2
Nb feuilles T1	ns	ns	ns						ns
Nb feuilles T2	ns	ns	ns						ns
Nb feuilles T3	***	ns	ns						**
Nb feuilles T4	***	ns	ns						***
Nb feuilles T5	***	ns	*	*	***	**	ns	***	**
Nb feuilles T6	***	ns	*	*	***	***	ns	*	***
MS	***	ns	**	ns	***	**	ns	*	**
SF	***	*	*	ns	***	**	ns	**	**
Vulpin	Facteur : Fertilisation (F)	Facteur : Compétition (C)	Interaction : F*C	Vulpin seul Facteur : (F)	Cellule Facteur : (F)	KWS_Smart Facteur : (F)	NH ₄ ⁺ Facteur : (C)	NO ₃ ⁻ Facteur : (C)	Facteur : (F)
Df	1	2	2	1	1	1	2	2	2
Hauteur T1	ns	ns	ns						ns
Hauteur T2	ns	ns	ns						ns
Hauteur T3	ns	ns	ns						ns
Hauteur T4	*	ns	ns						ns
Hauteur T5	*	ns	*	***	**	ns	ns	ns	**
Hauteur T6	**	ns	ns						*
MS	ns	ns	ns						*
SF	ns	ns	ns						*

Tableau 5. Résultats des ANOVA pour les variétés de froment Cellule et KWS_Smart. Df = Degré de liberté, MS = Masse sèche, SF = Surface foliaire, ns = non significatif, (*)=p-valeur<0,05 ; (**)=p-valeur<0,01 ; (***)=p-valeur<0,001.

Cellule	ANOVA 2			ANOVA 1 issues de la décomposition de l'ANOVA 2 s'il y a interaction des 2 facteurs			
	Facteur : Fertilisation (F)	Facteur : Compétition (C)	Interaction : F*C	Décomposition selon la compétition		Décomposition selon la fertilisation	
				Mouron Facteur : (F)	Vulpin Facteur : (F)	NH ₄ ⁺ Facteur : (C)	NO ₃ ⁻ Facteur : (C)
Df	1	1	2	1	1	1	1
Hauteur T1	*	ns	ns				
Hauteur T2	***	*	ns				
Hauteur T3	***	ns	*	**	ns	**	ns
Hauteur T4	***	*	ns				
Hauteur T5	***	*	*	***	**	**	ns
Hauteur T6	***	ns	*	***	**	*	ns
MS	**	ns	*	**	ns	ns	ns
SF	***	ns	ns				
KWS_Smart	Facteur : Fertilisation (F)	Facteur : Compétition (C)	Interaction : F*C	Mouron Facteur : (F)	Vulpin Facteur : (F)	NH ₄ ⁺ Facteur : (C)	NO ₃ ⁻ Facteur : (C)
Df	1	1	2	1	1	1	1
Hauteur T1	ns	ns	ns				
Hauteur T2	ns	ns	ns				
Hauteur T3	*	ns	ns				
Hauteur T4	***	ns	ns				
Hauteur T5	**	ns	ns				
Hauteur T6	***	ns	ns				
MS	**	ns	ns				
SF	***	ns	ns				

4.3.1 Mouron en monoculture

Cette première partie des résultats concernant le mouron prend en compte les données récoltées sur les pots contenant un plant de mouron en culture seule (non soumis à la compétition) et fertilisé avec 3 traitements azotés différents (nitrate, ammonium ou ammonium-nitrate). Les analyses suivantes ont pour but de déterminer si le type de fertilisation azotée (ammonium stabilisé, nitrate ou ammonium-nitrate) influence la dynamique de développement du mouron seul ainsi que sa biomasse après 6 semaines de croissance.

4.3.1.1 Nombre de feuilles par plante

La dernière colonne du tableau 4 relative aux ANOVA 1 indique une significativité de la fertilisation sur le nombre de feuilles du mouron à partir de la troisième semaine. En effet, la Figure 22 met en évidence un nombre de feuilles moyen significativement plus élevé pour le mouron fertilisé avec du

nitrate d'ammonium. A la récolte (T6), le nombre de feuilles moyen en $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ ($223,33 \pm 56,01$) est plus de 2 fois plus élevé que celui en NO_3^- ($102 \pm 59,07$) et presque 6 fois plus élevé que pour NH_4^+ ($39,33 \pm 24,41$).

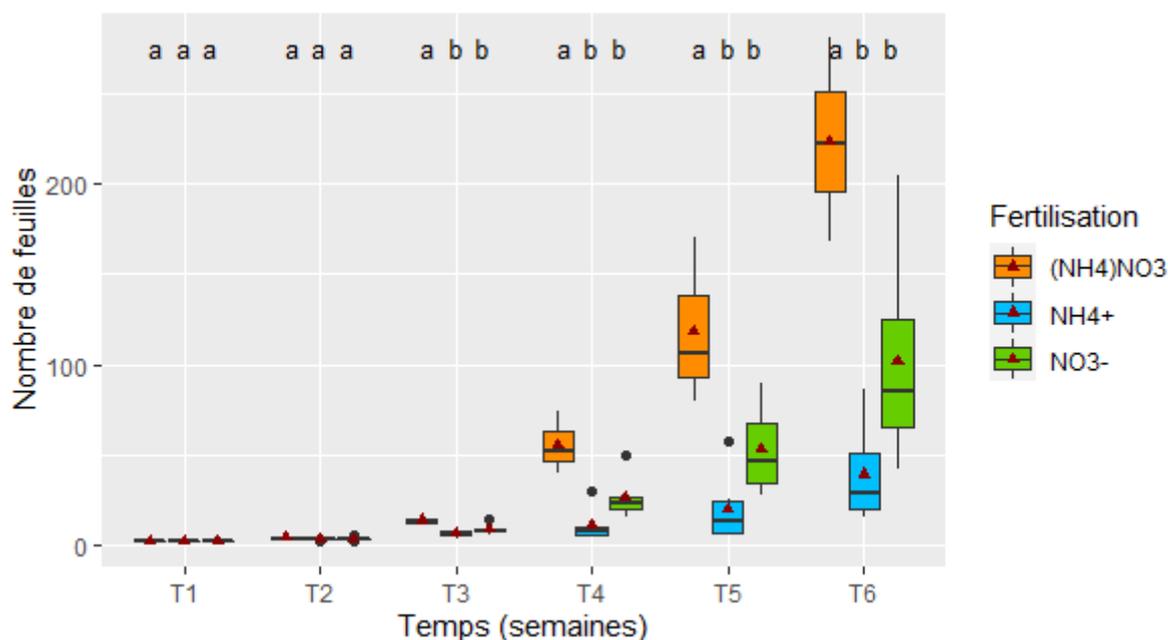


Figure 22. Boxplot du nombre de feuilles du mouron seul en fonction de la fertilisation azotée et du temps. Les lettres représentent les groupes créés par les tests SNK de l'effet de la fertilisation. Les triangles rouges indiquent les nombres de feuilles moyens pour chaque modalité.

4.3.1.2 Masse sèche de la biomasse aérienne

L'ANOVA 1 sur le mouron seul révèle une haute significativité de la fertilisation sur la masse sèche de la biomasse aérienne. En effet, le mouron en $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ possède une MS 2,3 fois plus élevée qu'en fertilisation NO_3^- et 5 fois plus élevée qu'en NH_4^+ (Tableau 6).

Tableau 6. Masse sèche de la biomasse du mouron en culture seule en fonction des trois fertilisations azotées. La p-valeur de l'ANOVA est hautement significative (**). Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la fertilisation.

Facteurs	MS \pm Ecart-type	Test SNK
Fertilisation	p-valeur = $1,59 \cdot 10^{-3}$ (**)	
$(\text{NH}_4)\text{NO}_3$	$0,612 \pm 0,21$	a
NO_3^-	$0,265 \pm 0,15$	b
NH_4^+	$0,122 \pm 0,1$	b

4.3.1.3 Surface foliaire

Lorsque le mouron est cultivé seul, l'analyse de la variance indique une différence hautement significative des surfaces foliaires moyennes en fonction de la fertilisation (Tableau 4). En effet, le mouron en $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ possède une surface foliaire plus de 2 fois plus élevée qu'en fertilisation NO_3^- et un peu moins de 5 fois plus élevée qu'en NH_4^+ (Tableau 7).

Tableau 7. Surface foliaire du mouron en culture seule en fonction des trois fertilisations azotées. La p-valeur de l'ANOVA est hautement significative (**). Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la fertilisation.

Facteurs	Surface foliaire ± Ecart-type	Test SNK
Fertilisation	p-valeur = $1,74 \cdot 10^{-3}$ (**)	
(NH₄)NO₃	154,48 ± 57,34	a
NO₃⁻	65,5 ± 34,55	b
NH₄⁺	31,55 ± 26,8	b

La fertilisation à base d'ammonium nitrate a donc engendré une croissance et une production de biomasse plus importante chez le mouron en culture seule.

4.3.2 Mouron en compétition avec le froment

Cette section présente les résultats des ANOVA 2 sur le mouron en fonction de la compétition (culture seule, froment Cellule ou froment KWS_Smart) et de la fertilisation (nitrate ou ammonium). Ces analyses ont pour but de tenter de déterminer si lorsque le mouron est mis en compétition avec du froment, il est possible d'influencer sa biomasse produite en jouant sur le type de fertilisation azotée. L'analyse de la compétition permet également d'estimer quel génotype de froment exerce une plus grande concurrence sur la dynamique de développement du mouron.

4.3.2.1 Nombre de feuilles

Concernant le nombre de feuilles par plant, le tableau 4 indique une significativité de l'interaction entre les facteurs compétition et fertilisation à partir de la cinquième semaine (T5). Le nombre de feuilles par mouron semble plus élevé lorsque celui-ci est mis en compétition avec le froment Cellule en fertilisation nitrate (Figure 23).

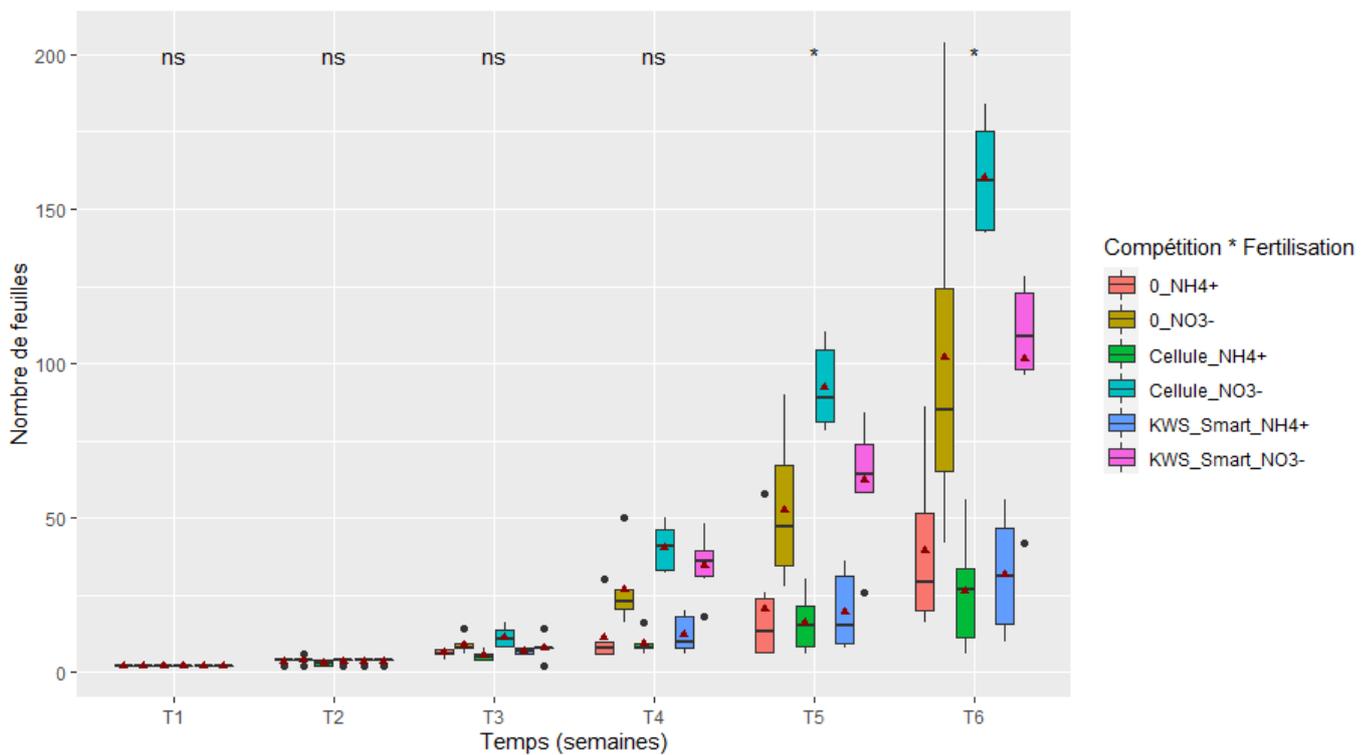


Figure 23. Boxplot représentant le nombre de feuilles du mouron en fonction de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation au cours des 6 semaines de croissance (T1 à T6). Les symboles au sommet du graphique représentent les degrés de significativité de l'interaction des facteurs compétition*fertilisation. ns : non significatif, * : $0,01 < p\text{-valeur} < 0,05$. Les moyennes pour chaque modalité sont indiquées par les triangles rouges.

La figure suivante (Figure 24) est un aperçu détaillé de l'influence de la fertilisation et de la compétition sur le nombre de feuilles à la récolte (T6). La fertilisation ammonium semble diminuer significativement le nombre de feuilles chez le mouron peu importe la compétition. De plus, même si cette différence n'est pas significative, la compétition avec le forment Cellule réduit le nombre de feuilles moyen chez le mouron lorsqu'une fertilisation ammonium est apportée (Figure 24).

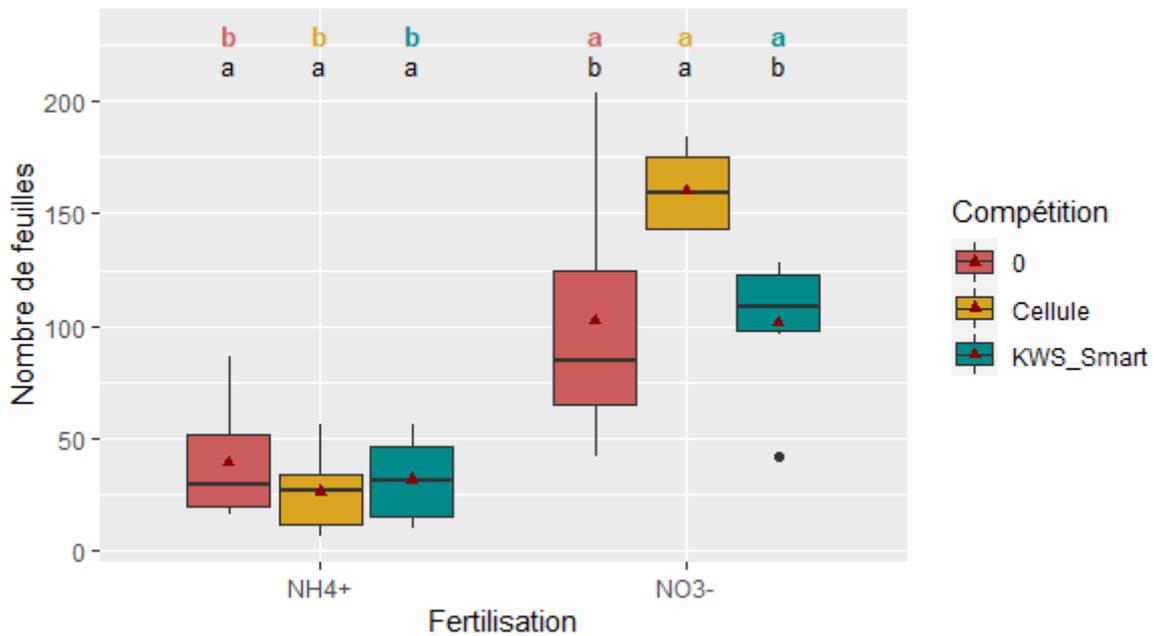


Figure 24. Boxplot du nombre de feuilles du mouron à la récolte (T6) en fonction de la fertilisation et de la compétition. Les lettres noires représentent les résultats des tests SNK de l'influence de la compétition. Les lettres en couleur représentent les résultats des tests SNK de l'influence de la fertilisation. Les moyennes pour chaque type de fertilisant et de compétition sont indiquées par les triangles rouges.

De son côté, la compétition entre le mouron et le froment est significative en fertilisation nitrate (Tableau 4 : Colonne « AV1 NO₃⁻, Facteur : (C) »). A partir de la cinquième semaine, le nombre de feuilles est significativement plus bas chez le mouron lorsqu'il est en compétition avec la variété de froment KWS_Smart ou lorsqu'il est cultivé seul (Figure 25). Ensuite, au temps T6, le nombre de feuilles moyen du mouron seul ou en compétition avec la variété KWS_Smart est plus de 1,5 fois plus faible que celui du mouron en compétition avec le froment Cellule.

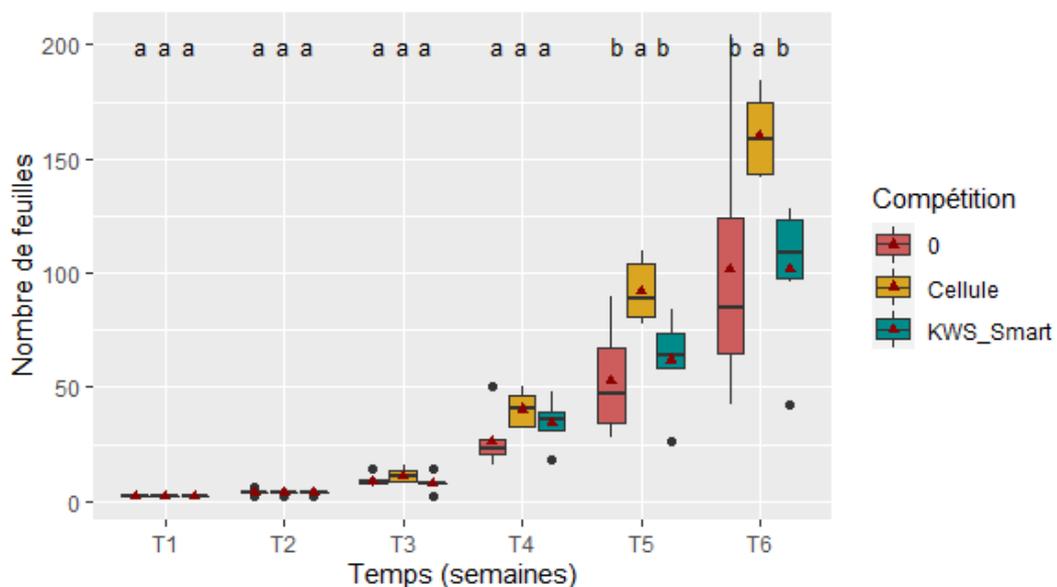


Figure 25. Boxplot de l'influence de la compétition sur le nombre de feuilles du mouron en fertilisation nitrate en fonction du temps. Les lettres représentent les résultats des tests SNK de l'effet de la compétition. Les moyennes pour chaque type de compétition (en fertilisation nitrate) sont indiquées par les triangles rouges.

4.3.2.2 Masse sèche de la biomasse aérienne

Concernant la masse sèche de la biomasse aérienne, les analyses de la variance (Tableau 4) nous indiquent que l'interaction des facteurs compétition et fertilisation est hautement significative (p -valeur = 0,00642). Le facteur compétition (toute fertilisation confondue) n'influence pas la MS du mouron. A l'opposé, la fertilisation influence très hautement la MS (p -valeur = $1,43 \cdot 10^{-7}$). En effet, la fertilisation ammonium diminue la MS du mouron lorsqu'il est en compétition avec du froment (Figure 26). C'est la variété Cellule qui semble réduire le plus la MS du mouron en NH_4^+ même si cette différence n'est pas significative. Cependant, une fois les plantes fertilisées avec NO_3^- , c'est la variété KWS_Smart qui réduit le plus la biomasse produite par le mouron.

Ces résultats vont dans le même sens que les observations faites sur le nombre de feuilles.

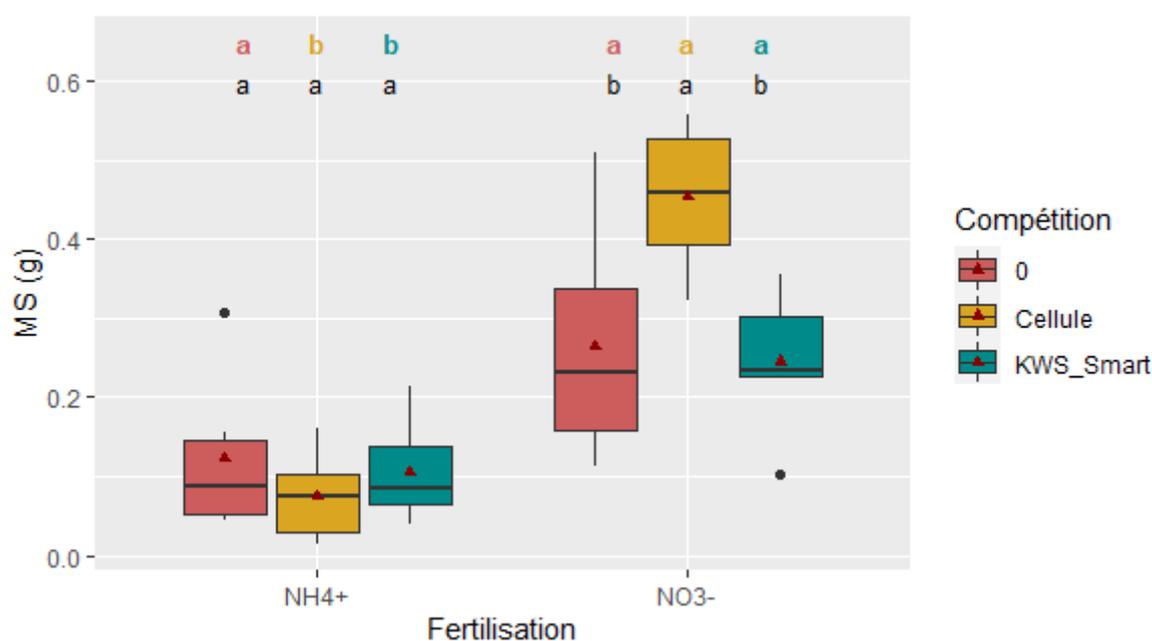


Figure 26. Boxplot de la masse sèche (MS) du mouron en fonction de la fertilisation azotée et de la compétition. Les lettres en noir indiquent les résultats des tests SNK de l'effet de la compétition et les lettres en couleur correspondent aux tests SNK en fonction de la fertilisation. Les triangles rouges représentent les moyennes de la MS du mouron pour chaque modalité.

4.3.2.3 Surface foliaire

La surface foliaire du mouron semble suivre la même tendance que la MS de la biomasse aérienne. La fertilisation influence très hautement la surface foliaire (p -valeur = $1,43 \cdot 10^{-7}$). En effet, la fertilisation ammonium diminue la surface foliaire du mouron lorsqu'il est en compétition avec du froment (Figure 27). Aucune des 2 variétés de froment ne semble réduire davantage la surface foliaire du mouron par rapport à l'autre en fertilisation NH_4^+ . Cependant, une fois les plantes fertilisées avec NO_3^- , c'est la variété KWS_Smart qui réduit le plus la surface foliaire du mouron.

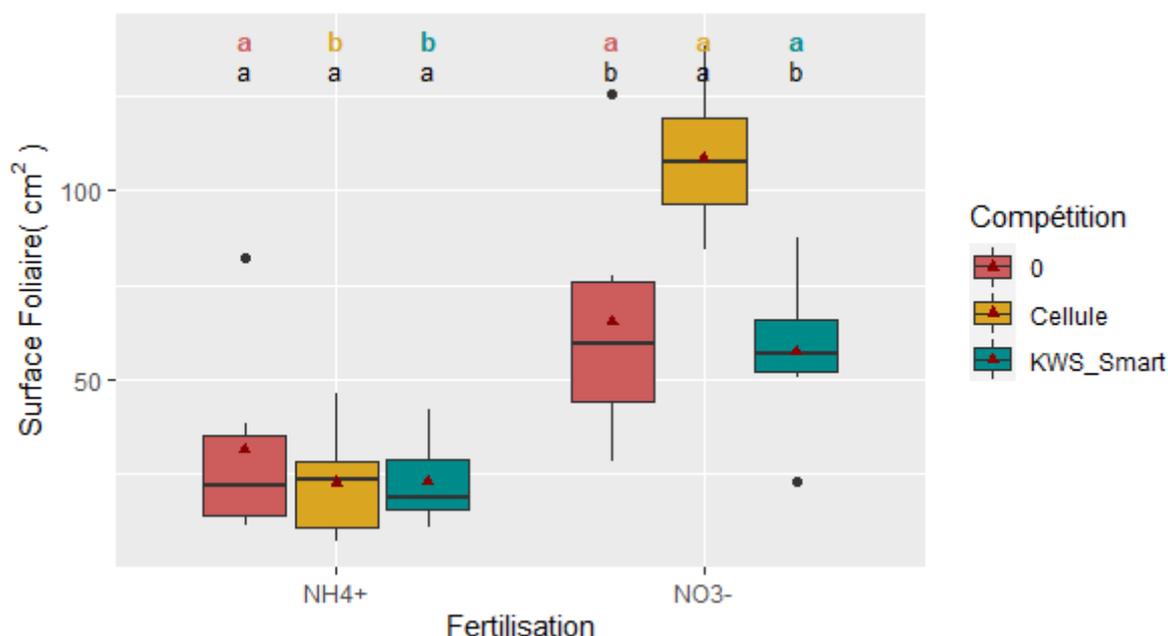


Figure 27. Boxplot de la surface foliaire du mouron en fonction de la fertilisation azotée et de la compétition. Les lettres en noir indiquent les résultats des tests SNK de l'effet de la compétition et les lettres en couleur correspondent aux tests SNK en fonction de la fertilisation. Les triangles rouges représentent les surfaces foliaires moyennes du mouron chaque modalité.

4.3.2.4 Stades de développement (échelle BBCH)

L'analyse des stades de développement du mouron n'a pas été réalisée pour la première semaine de croissance car toutes les plantes avaient atteint le même stade. Aucune influence de la fertilisation ou de la compétition sur le stade de développement du mouron ne pouvait donc être mise en évidence. Pour rappel, l'hypothèse nulle du test exact de Fisher est l'indépendance du facteur testé et de la variable qualitative. A partir de la troisième semaine, l'atteinte du stade BBCH seuil est dépendante de la fertilisation et de l'interaction du facteur fertilisation et compétition (Tableau 8).

Tableau 8. Stade de développement du mouron en fonction de la fertilisation, de la compétition et de l'interaction de ces 2 facteurs. Les BBCH seuils sont les stades seuils utilisés pour réaliser les tableaux de contingence pour les tests exacts de Fisher.

Mouron	BBCH seuil	Fertilisation (F)	Compétition (C)	F*C
BBCH T2	12	ns	ns	ns
BBCH T3	16	**	ns	*
BBCH T4	23	***	ns	**
BBCH T5	24	*	ns	*
BBCH T6	27	**	ns	**

Les tableaux de contingence créés pour réaliser les tests exacts de Fisher sont repris dans l'Annexe 8.

A l'image de ce qui a été observé pour les autres paramètres, les mourons fertilisés avec des nitrates se développent plus rapidement que ceux ayant reçu de l'ammonium. L'interaction des deux facteurs est apparue deux semaines plus tôt que pour le nombre de feuilles. Le relevé des stades de

développement a également permis de constater que les mouroins ayant reçu de l'ammonium ont fleuri plus précocement. L'apparition de l'inflorescence (stade 51 et 55) ou bien l'éclosion de 10% des fleurs (stade 61) ont été observées chez quatre plants de mouroin pour la fertilisation à base de NH_4^+ , contre deux plants pour la fertilisation NO_3^- (toutes compétitions confondues).

4.3.3 Vulpin en monoculture

Cette première partie des résultats concernant le vulpin ne prend en compte que les données récoltées sur les pots contenant un plant de vulpin en culture seule (non soumis à la compétition) et fertilisé avec 3 traitements azotés différents (nitrate, ammonium stabilisé ou ammonium-nitrate). Les analyses suivantes ont pour but de déterminer si le type de fertilisation azotée (NH_4^+ , NO_3^- ou $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$) influence la dynamique de développement du vulpin seul ainsi que sa biomasse après 6 semaines de croissance.

4.3.3.1 Hauteur

La dernière colonne du tableau 4 indique que le facteur fertilisation s'est révélé significatif à partir de la cinquième semaine sur la hauteur des plants de vulpin. La Figure 28 illustre une hauteur de vulpin significativement plus faible en fertilisation ammonium. Toutefois, les écarts entre les hauteurs moyennes de vulpin pour chaque traitement sont moins importants que ceux calculés entre les nombres de feuilles moyens du mouroin pour chaque traitement.

A la récolte (T6), la hauteur moyenne du vulpin en cm est de $22,67 \pm 2,52$ en fertilisation $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$, de $22,5 \pm 3,15$ en fertilisation NO_3^- et de $18 \pm 1,87$ en fertilisation NH_4^+ .

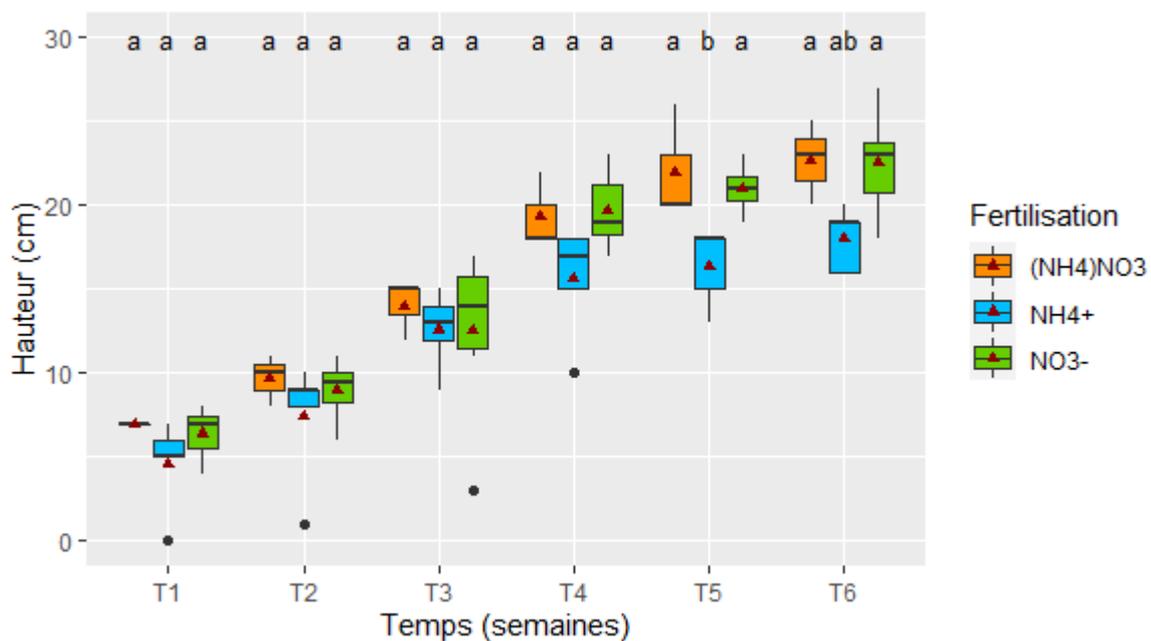


Figure 28. Boxplot de la hauteur de vulpin cultivé seul en fonction de la fertilisation azotée au cours du temps. Les lettres représentent les groupes créés par les tests SNK de l'effet de la fertilisation. Les triangles rouges représentent les hauteurs moyennes du vulpin pour chaque fertilisation.

4.3.3.2 Masse sèche de la biomasse aérienne

Lorsque le vulpin est cultivé seul, la fertilisation azotée exerce une influence significative (p -valeur = 0,0148) sur la masse sèche de la biomasse aérienne produite après 6 semaines de croissance (Tableau 4). La MS du vulpin est la plus élevée en fertilisation ammonium-nitrate (Tableau 9).

Tableau 9. Masse sèche de la biomasse du vulpin en culture seule en fonction des trois fertilisations azotées. La p -valeur de l'ANOVA est significative (*). Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la fertilisation.

Facteurs	MS \pm Ecart-type	Test SNK
Fertilisation	p -valeur = 0,0148 (*)	
(NH₄)NO₃	0,393 \pm 0,042	a
NO₃⁻	0,258 \pm 0,088	b
NH₄⁺	0,173 \pm 0,096	b

4.3.3.3 Surface foliaire

Lorsque le vulpin est cultivé seul, l'analyse de la variance indique une différence significative (p -valeur = 0,0261) entre les surfaces foliaires moyennes des modalités du facteur fertilisation. En effet, le mouron en (NH₄)NO₃ possède une surface foliaire presque 1,5 fois plus élevée qu'en fertilisation NO₃⁻ et plus de 2 fois plus élevée qu'en NH₄⁺ (Tableau 10).

Tableau 10. Surface foliaire du vulpin en culture seule en fonction des trois fertilisations azotées. La p -valeur de l'ANOVA est significative (*). Les lettres représentent les résultats du test SNK de l'effet de la fertilisation.

Facteurs	Surface foliaire \pm Ecart-type	Test SNK
Fertilisation	p -valeur = 0,026 (*)	
(NH₄)NO₃	114,64 \pm 13,16	a
NO₃⁻	79,98 \pm 32,57	ab
NH₄⁺	54,04 \pm 23,39	b

4.3.4 Vulpin en compétition avec du froment

Cette section présente les résultats des ANOVA 2 sur le vulpin en fonction de la compétition (culture seule, en compétition avec le froment Cellule ou en compétition avec le froment KWS_Smart) et de la fertilisation (nitrate ou ammonium). Ces analyses ont pour but de tenter de déterminer si lorsque le vulpin est mis en compétition avec du froment, il est possible d'influencer sa biomasse produite en jouant sur le type de fertilisation azotée. L'analyse de la compétition permet également d'estimer quel génotype de froment exerce une plus grande concurrence sur la dynamique de développement du vulpin.

4.3.4.1 Hauteur

Le Tableau 4 indique une significativité de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation sur la hauteur des plants uniquement à la cinquième semaine (p -valeur = 0,0481). Toutefois, à la récolte (T6), la hauteur du vulpin semble la plus élevée lorsque celui-ci est cultivé seul ou avec le froment Cellule en fertilisation nitrate (Figure 29). Mais cette différence n'est pas significative.

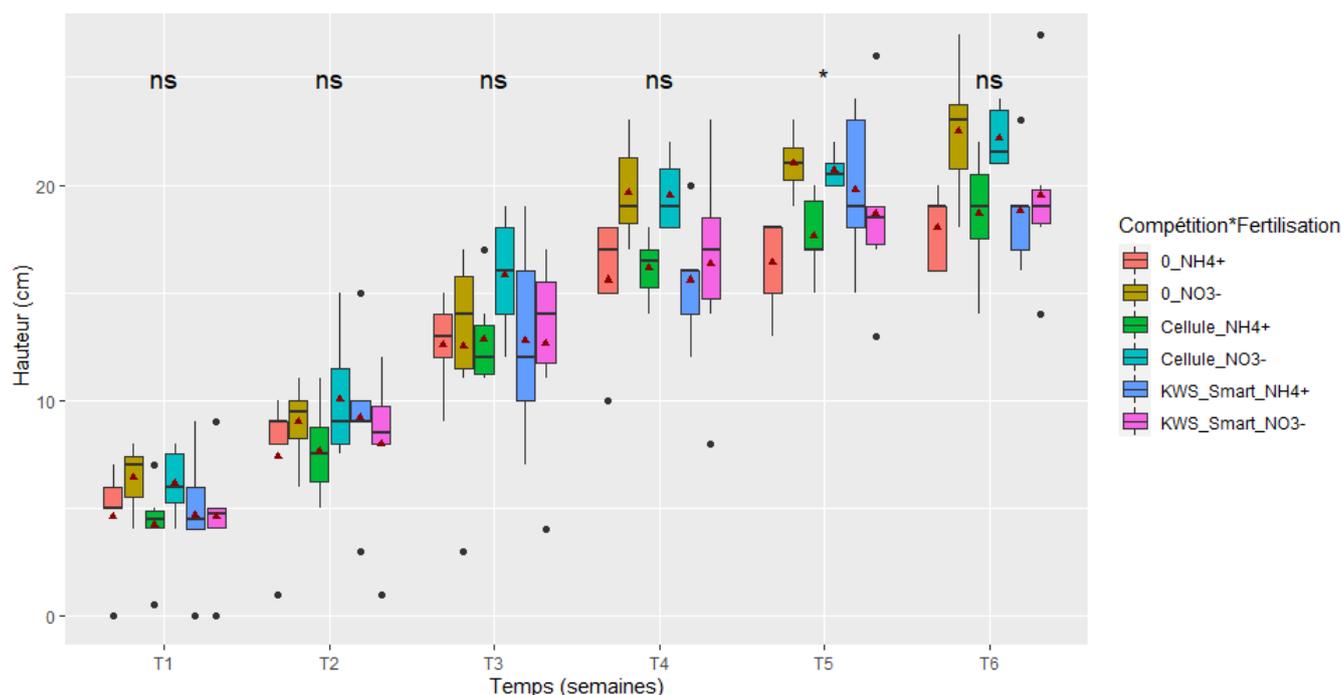


Figure 29. Boxplot de la hauteur du vulpin en fonction de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation au cours du temps. Les symboles au sommet du graphique représentent les degrés de significativité de l'interaction des facteurs compétition*fertilisation. ns : non significatif, * : 0,01 < p-valeur < 0,05. Les triangles rouges représentent les hauteurs moyennes du vulpin pour chaque modalité.

La décomposition de l'interaction des 2 facteurs en T5 révèle qu'en compétition avec le froment Cellule, la hauteur moyenne du vulpin est significativement plus basse lorsque celui-ci est cultivé en fertilisation NH_4^+ plutôt qu'en NO_3^- (Figure 30). A l'inverse, quand le vulpin est en compétition avec le froment KWS_Smart, sa hauteur moyenne est plus faible en NO_3^- (Figure 30). Bien que cette dernière différence ne soit pas significative.

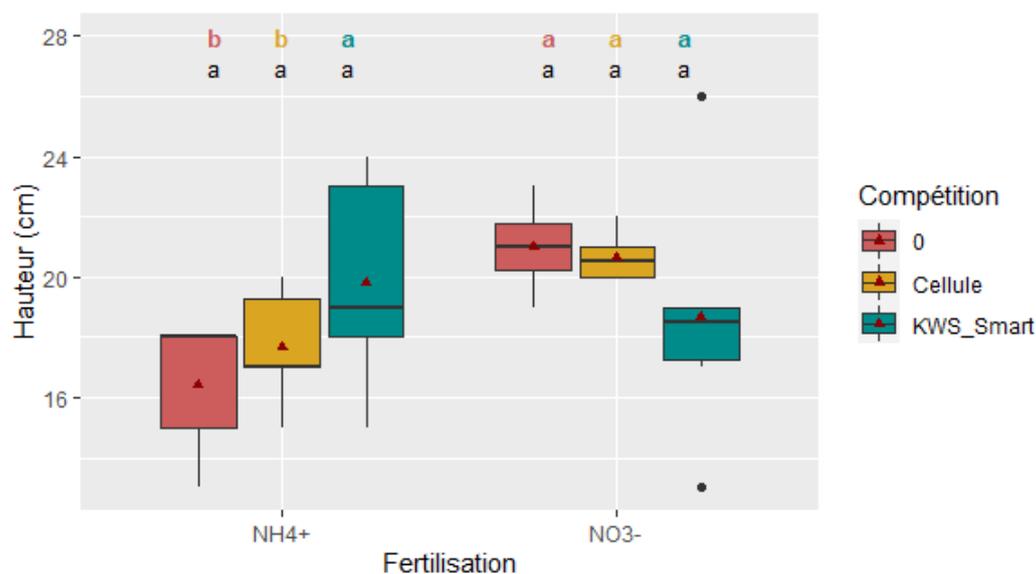


Figure 30. Boxplot de la hauteur du vulpin à la cinquième semaine (T5) en fonction de la compétition et de la fertilisation. Les lettres en noir indiquent les résultats des tests SNK de l'effet de la compétition et les lettres en couleur correspondent aux tests SNK en fonction de la fertilisation. Les triangles rouges représentent les hauteurs moyennes du vulpin chaque modalité.

4.3.4.2 Matière sèche de la biomasse aérienne

Comme présenté dans le Tableau 4, aucune différence significative de matière sèche du vulpin n'a été mise en évidence en fonction de la fertilisation, de la compétition ou de l'interaction des 2 facteurs. Toutefois, les MS moyennes semblent suivre la même tendance que les hauteurs moyennes. En effet, la MS moyenne du vulpin en compétition avec le froment Cellule est plus faible en NH_4^+ . Alors que quand il est en compétition avec KWS_Smart, sa MS moyenne est plus faible en NO_3^- (Figure 31). Notons également que le vulpin obtient une MS moyenne plus importante en NH_4^+ lorsqu'il est cultivé en compétition avec du froment et qu'en fertilisation à base de nitrate, celle-ci est plus élevée pour le vulpin cultivé seul.

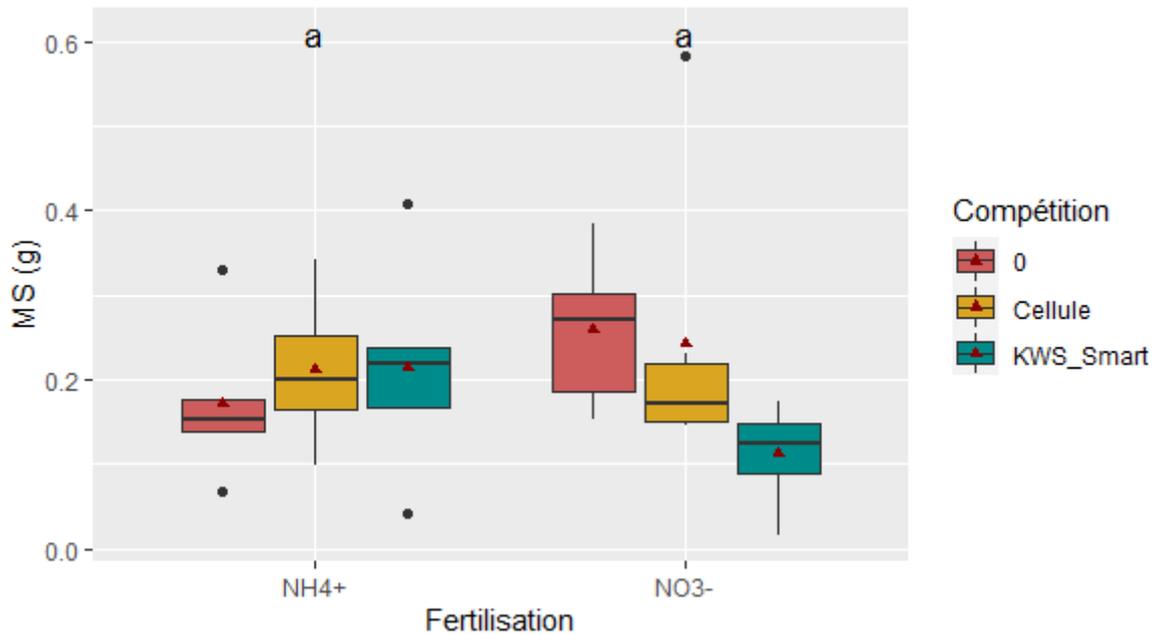


Figure 31. Boxplot de la masse sèche (MS) du vulpin en fonction de la compétition et de la fertilisation. Les lettres en noir indiquent le résultat du test SNK de l'effet du facteur fertilisation (toutes compétitions confondues). Les triangles rouges représentent les MS moyennes du vulpin pour chaque modalité.

4.3.4.3 Surface foliaire

Aucune significativité du facteur fertilisation ou compétition n'a été mise en évidence sur la surface foliaire du vulpin par l'analyse de la variance (Tableau 4). Le graphique de la Figure 32 permet tout de même de souligner qu'en compétition avec le froment KWS_Smart, la surface foliaire moyenne du vulpin est plus faible en NO_3^- qu'en NH_4^+ .

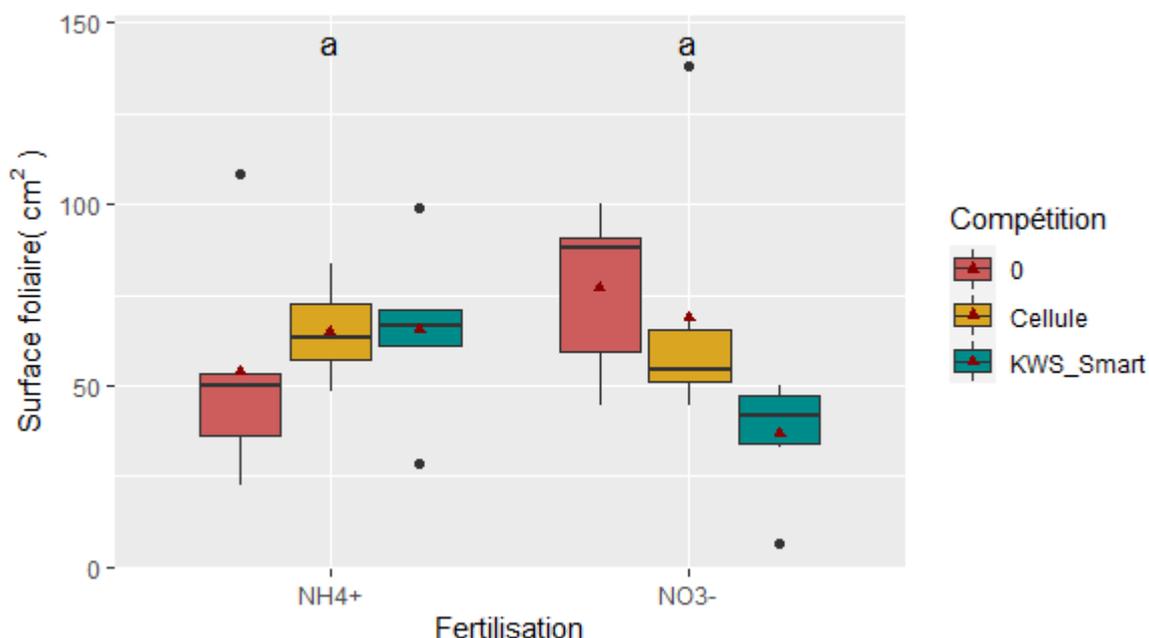


Figure 32. Surface foliaire du vulpin en fonction de la fertilisation et de la compétition. Les lettres en noir indiquent le résultat du test SNK de l'effet du facteur fertilisation (toutes compétitions confondues). Les triangles rouges représentent les surfaces foliaires moyennes du vulpin pour chaque modalité.

4.3.4.4 Stade de développement (échelle BBCH)

L'analyse des stades de développement du vulpin n'a mené à aucun résultat significatif (Tableau 11). L'atteinte du stade BBCH seuil est donc indépendante des facteurs de fertilisation, de compétition et de leur interaction.

Tableau 11. Stade de développement du vulpin en fonction de la fertilisation, de la compétition et de l'interaction des 2 facteurs précédents. Les BBCH seuils sont les stades seuils utilisés pour réaliser les tableaux de contingence pour les tests exacts de Fisher.

Vulpin	BBCH seuil	Fertilisation (F)	Compétition (C)	F*C
BBCH T1	11	ns	ns	ns
BBCH T2	12	ns	ns	ns
BBCH T3	13	ns	ns	ns
BBCH T4	23	ns	ns	ns
BBCH T5	24	ns	ns	ns
BBCH T6	26	ns	ns	ns

Les tableaux de contingence utilisés pour réaliser les tests exacts de Fisher sont repris dans l'Annexe 9.

4.3.5 Froment Cellule

L'analyse du développement de la biomasse aérienne du froment Cellule a pour but de déterminer si ce génotype de froment ayant des capacités contrastées à prélever et utiliser l'ammonium comme source d'azote démontre également un pouvoir compétitif contrasté vis-à-vis du développement

d'adventices. En l'occurrence, Cellule a montré une capacité accrue en hydroponie à prélever et à utiliser l'azote sous forme d'ammonium par rapport à une nutrition à base de nitrate.

4.3.5.1 Hauteur

4.3.5.1.1 Interaction : Compétition * Fertilisation

Une interaction significative entre les facteurs compétition et fertilisation est visible à la troisième, cinquième et sixième semaine (Tableau 5). A partir de la cinquième semaine, le froment Cellule semble atteindre une hauteur plus importante lorsqu'il est cultivé en fertilisation nitrate (Figure 33).

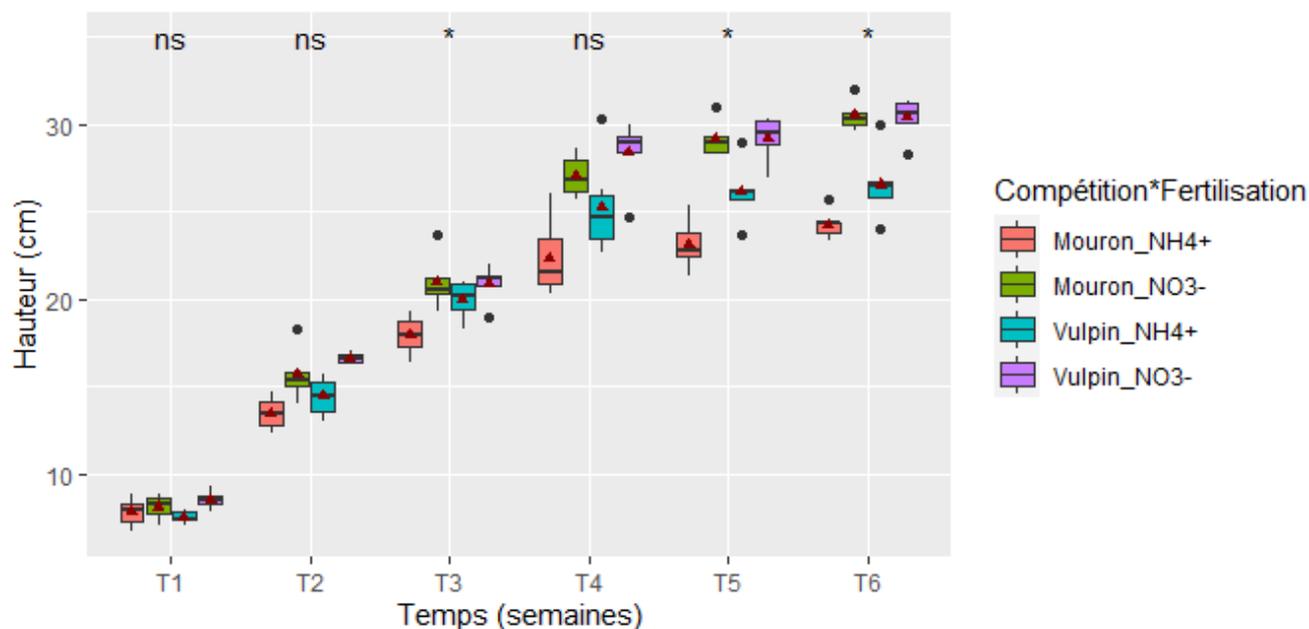


Figure 33. Boxplot de la hauteur du froment Cellule en fonction de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation au cours du temps. Les symboles au sommet du graphique représentent les degrés de significativité de l'interaction des facteurs compétition*fertilisation. ns : non significatif, * : 0,01 < p-valeur < 0,05. Les triangles rouges représentent les hauteurs moyennes du froment Cellule pour chaque modalité.

A la récolte (T6), la décomposition de l'interaction des 2 facteurs nous indique qu'en fertilisation NH_4^+ , la hauteur du froment Cellule est significativement plus faible lorsqu'il est en compétition avec du mouron (Figure 34). Comme dit précédemment, le froment Cellule obtient une hauteur significativement plus élevée en fertilisation nitrate plutôt qu'en fertilisation ammonium (Figure 34).

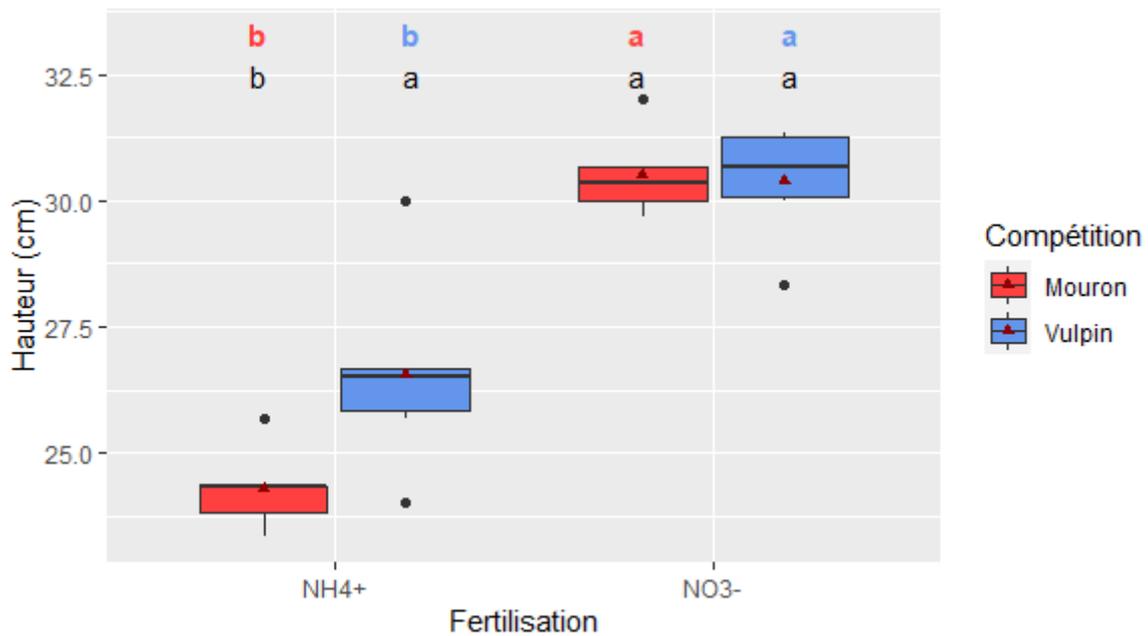


Figure 34. Boxplot de la hauteur du froment Cellule au temps T6 en fonction de la fertilisation et de la compétition. Les lettres en noir indiquent les résultats des tests SNK de l'effet de la compétition et les lettres en couleur correspondent aux tests SNK en fonction de la fertilisation. Les triangles rouges représentent les hauteurs moyennes du froment Cellule pour chaque modalité.

4.3.5.1.2 Facteur fertilisation

Le facteur fertilisation exerce une influence significative à très hautement significative sur la hauteur du froment Cellule dès le début de l'expérience (Tableau 5). La hauteur moyenne des plants de froment Cellule est plus élevée en fertilisation nitrate qu'en fertilisation ammonium (Figure 35).

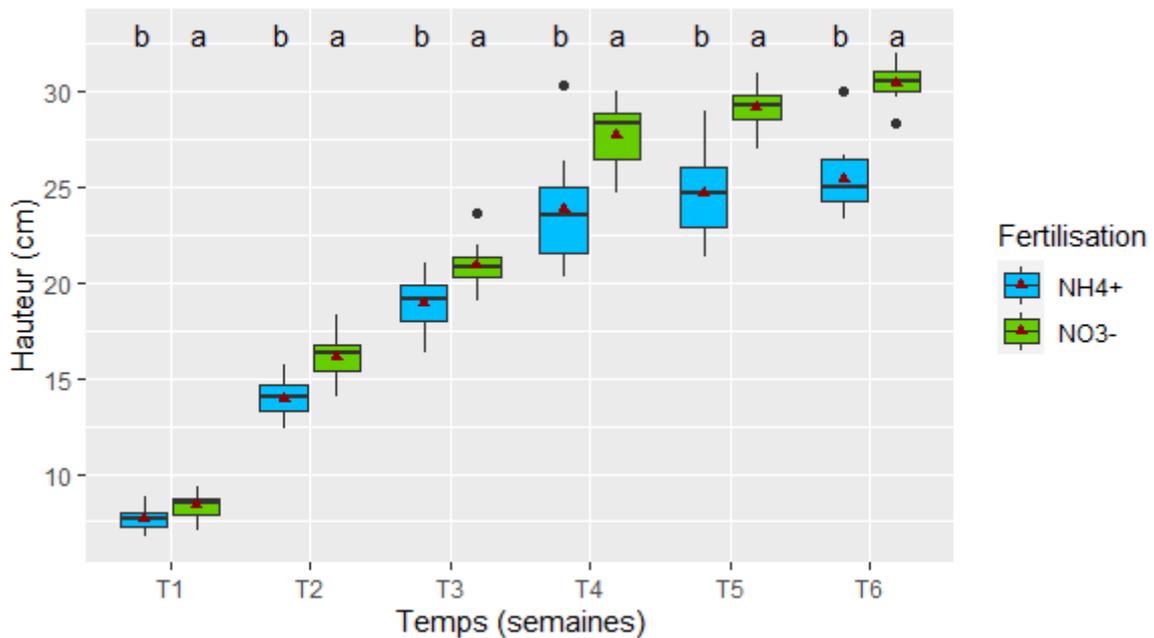


Figure 35. Boxplot de la hauteur du froment Cellule en fonction de la fertilisation et du temps. Les lettres indiquent les résultats des tests SNK de l'influence de la fertilisation. Les triangles rouges représentent les surfaces foliaires moyennes du vulpin pour chaque fertilisation.

4.3.5.1.3 Facteur compétition

Comme abordé plus haut, la compétition avec les adventices influence parfois significativement la hauteur du froment Cellule (Tableau 5). Le mouron semble ralentir davantage la croissance du froment par rapport au vulpin bien que les hauteurs moyennes ne semblent pas très éloignées les unes des autres (Tableau 12).

Tableau 12. Influence de la compétition avec les adventices sur la hauteur du froment Cellule en fonction du temps. Le facteur compétition est non significatif (ns) ou significatif (*) en fonction du temps.

Facteurs	Hauteur \pm Ecart-type	Test SNK
Compétition (T1)	p-valeur = 0,8 (ns)	
Mouron	7,96 \pm 0,76	a
Vulpin	8,03 \pm 0,71	a
Compétition (T2)	p-valeur = 0,039 (*)	
Mouron	14,58 \pm 1,62	b
Vulpin	15,52 \pm 1,38	a
Compétition (T3)	p-valeur = 0,054 (ns)	
Mouron	19,44 \pm 2,01	a
Vulpin	20,44 \pm 1,1	a
Compétition (T4)	p-valeur = 0,022 (*)	
Mouron	24,69 \pm 2,99	b
Vulpin	26,83 \pm 2,81	a
Compétition (T5)	p-valeur = 0,011 (*)	
Mouron	26,14 \pm 3,37	b
Vulpin	27,69 \pm 2,14	a
Compétition (T6)	p-valeur = 0,051 (ns)	
Mouron	27,39 \pm 3,34	a
Vulpin	28,47 \pm 2,52	a

4.3.5.2 Masse sèche de la biomasse aérienne

Le graphique suivant (Figure 36) présente la masse sèche de la biomasse aérienne du froment Cellule en fonction de la fertilisation et de la compétition. Seule une différence significative de MS a été détectée en fonction de la fertilisation quand le froment est cultivé avec le mouron (Figure 36). En effet, si le froment Cellule est en compétition avec le mouron, sa MS est significativement plus élevée en fertilisation NO_3^- (Figure 36). Pour un même type de fertilisation, la compétition ne semble pas influencer la MS du froment Cellule, contrairement à ce qui a été observé pour la hauteur des plants en T6 (Figure 34).

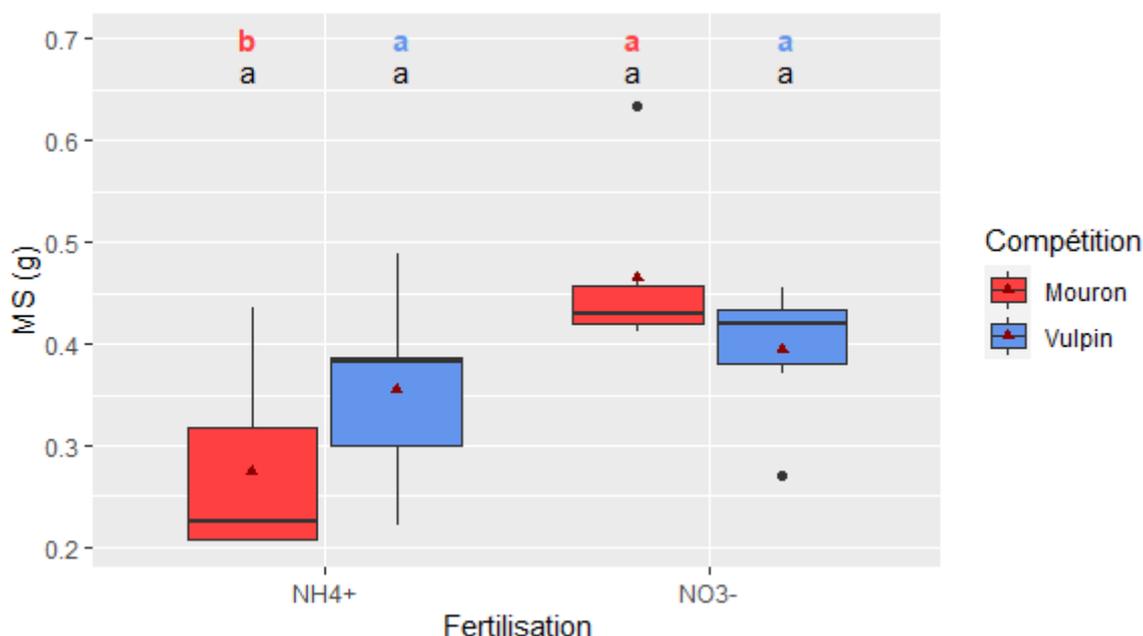


Figure 36. Boxplot de la masse sèche du froment Cellule en fonction de la fertilisation et de la compétition. Les lettres en noir indiquent les résultats des tests SNK de l'effet de la compétition et les lettres en couleur correspondent aux tests SNK en fonction de la fertilisation. Les triangles rouges représentent les surfaces foliaires moyennes du vulpin pour chaque modalité.

4.3.5.3 Surface foliaire

Une différence très hautement significative de la fertilisation a été révélée sur la surface foliaire du froment Cellule (p -valeur = $1,19 \cdot 10^{-4}$) (Tableau 5). En effet, la surface foliaire du froment est 1,5 fois plus élevée en fertilisation NO_3^- qu'en fertilisation NH_4^+ (Tableau 13).

Tableau 13. Surface foliaire du froment Cellule en fonction de la fertilisation ayant une très haute significativité (***)

Facteurs	Surface foliaire \pm Ecart-type	Test SNK
Fertilisation	p -valeur = $1,19 \cdot 10^{-4}$ (***)	
NO_3^-	$96,99 \pm 13,35$	a
NH_4^+	$65,24 \pm 20,1$	b

4.3.5.4 Stade de développement (échelle BBCH)

Les stades de développement du froment Cellule n'ont été analysés qu'à partir de la troisième semaine. En effet, pour les 2 premiers relevés hebdomadaires, tous les plants de froment possédaient le même stade de développement pour toutes les modalités. Aucune différence significative ne pouvait donc être mise en évidence. Le stade BBCH seuil est identique de la quatrième à la sixième semaine. L'interaction des 2 facteurs (fertilisation et compétition) et le facteur fertilisation sont significatifs à la quatrième et cinquième semaine (Tableau 14). Le facteur compétition quant à lui n'est significatif qu'à la quatrième semaine (Tableau 14).

Tableau 14. Stade de développement du froment Cellule en fonction de la fertilisation, de la compétition ou de l'interaction de ces 2 facteurs. Les BBCH seuils sont les stades seuils utilisés pour réaliser les tableaux de contingence pour les tests exacts de Fisher ou khi carré.

Cellule	BBCH seuil	Fertilisation (F)	Compétition (C)	F*C
BBCH T3	13	ns	ns	ns
BBCH T4	20	*	*	**
BBCH T5	20	**	ns	*
BBCH T6	20	ns	ns	ns

Les tableaux de contingence utilisés pour réaliser les tests exacts de Fisher ou de khi carré sont repris dans l'Annexe 10.

En synthèse, la fertilisation à base de nitrate amène un plus grand nombre de froment à atteindre le stade BBCH seuil hebdomadaire. Ces résultats indiquent également que l'interaction des deux facteurs et, dans une moindre mesure, la compétition ont influencé les stades de développement du froment de la variété Cellule.

4.3.6 Froment KWS_Smart

L'analyse du développement de la biomasse aérienne du froment KWS_Smart a pour but de déterminer si ce génotype ayant des capacités contrastées à prélever et utiliser l'ammonium comme source d'azote démontre également un pouvoir compétitif contrasté vis-à-vis du développement d'adventices. En l'occurrence, KWS Smart a montré une capacité accrue en hydroponie à prélever et à utiliser l'azote sous forme de nitrate par rapport à une nutrition à base d'ammonium.

4.3.6.1 Hauteur

4.3.6.1.1 Interaction : Compétition * Fertilisation

Pour le froment KWS_Smart, aucune interaction significative entre les facteurs fertilisation et compétition n'a été détectée pour toutes les données mesurées (Tableau 5, Figure 37).

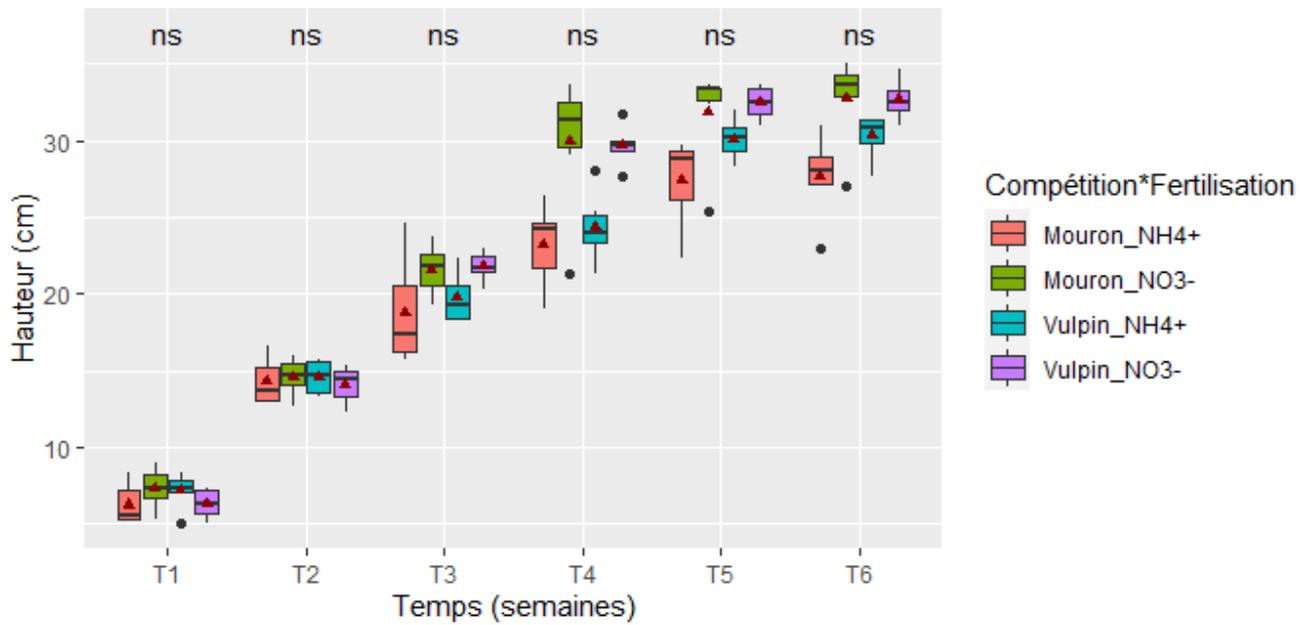


Figure 37. Boxplot de la hauteur du froment KWS_Smart en fonction de l'interaction des facteurs compétition et fertilisation au cours du temps. Les symboles au sommet du graphique représentent les degrés de significativité de l'interaction des facteurs compétition*fertilisation. ns : non significatif.

4.3.6.1.2 Facteur fertilisation

Concernant la hauteur des plants, le facteur fertilisation est significatif à partir de la troisième semaine (Tableau 5). Cette hauteur est plus importante en fertilisation NO_3^- que NH_4^+ (Figure 38).

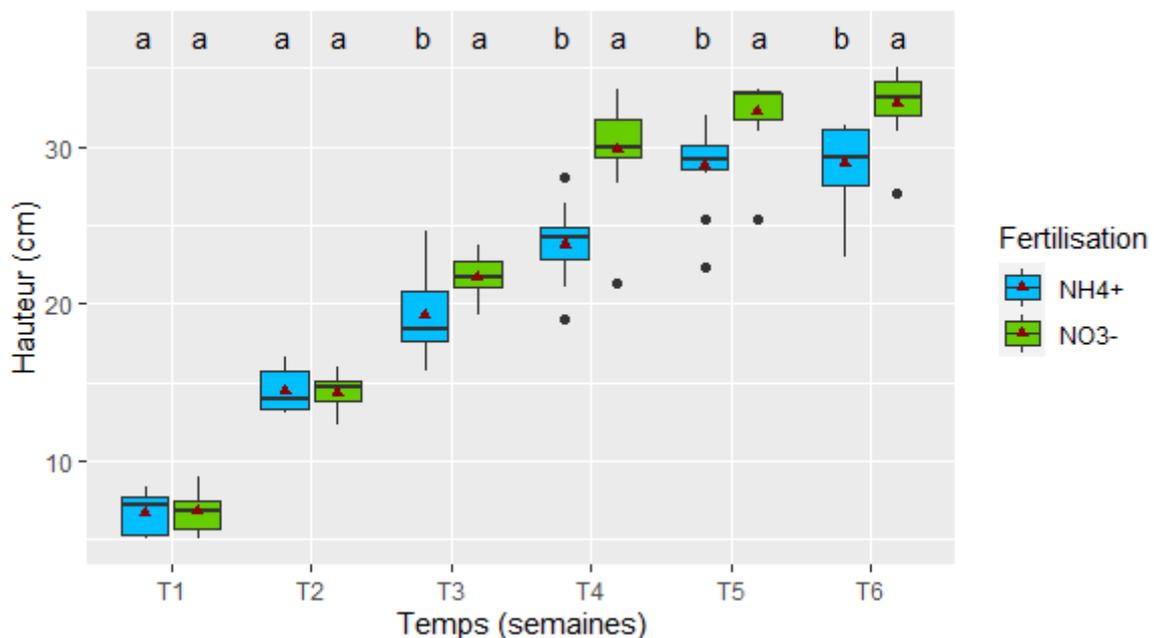


Figure 38. Boxplot de la hauteur du froment KWS_Smart en fonction de la fertilisation et du temps. Les lettres indiquent les résultats des tests SNK de l'effet de la fertilisation. Les triangles rouges représentent les hauteurs moyennes du froment KWS_Smart pour chaque fertilisation.

Notons également que pour les 2 fertilisations, les hauteurs moyennes du froment KWS_Smart sont plus élevées que celles du froment Cellule (Tableau 15).

Tableau 15. Comparaison des hauteurs moyennes des froments Cellule et KWS_Smart en fonction de la fertilisation.

Facteurs	Hauteur ± Ecart-type
Fertilisation	
NO₃⁻_Cellule	30,44 ± 0,96
NO₃⁻_KWS_Smart	32,7 ± 2,15
NH₄⁺_Cellule	25,42 ± 1,86
NH₄⁺_KWS_Smart	28,97 ± 2,47

4.3.6.1.3 Facteur compétition

Le facteur compétition n'a aucun effet significatif sur la hauteur des plants de froment KWS_Smart (Figure 39). A partir de la cinquième semaine, la hauteur moyenne du froment est tout de même plus élevée lorsque que celui-ci est en compétition avec le vulpin.

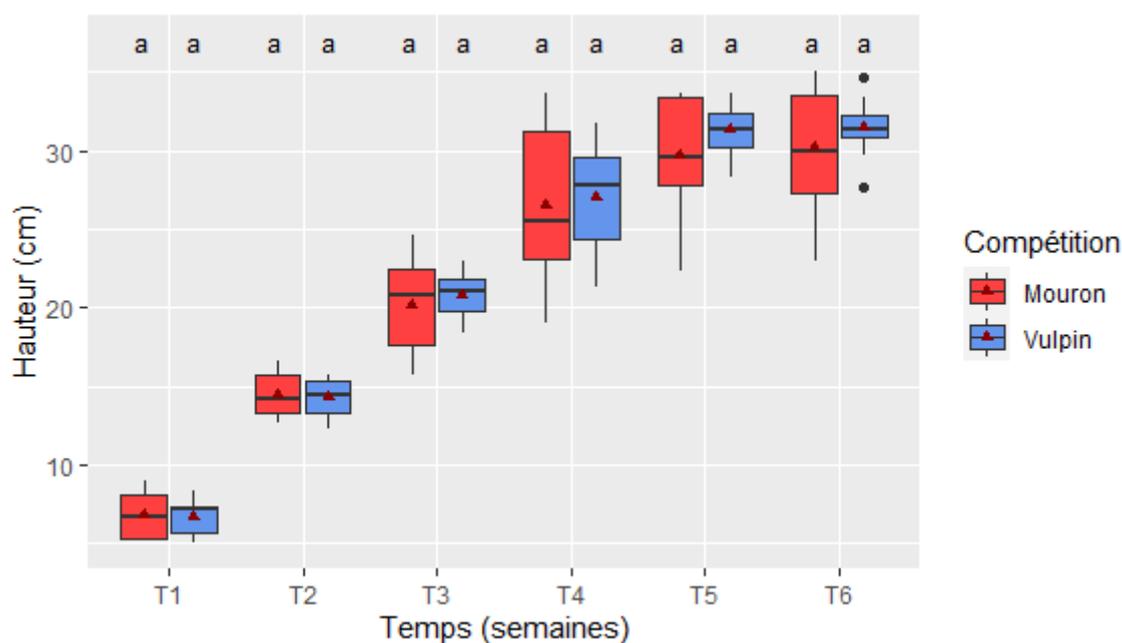


Figure 39. Boxplot de la hauteur du froment KWS_Smart en fonction de la compétition au cours du temps. Les lettres représentent les résultats des tests SNK de l'influence de la compétition. Les triangles rouges représentent les hauteurs moyennes du froment KWS_Smart pour chaque modalité de compétition.

4.3.6.2 Masse sèche de la biomasse aérienne

La fertilisation exerce une influence significative sur la masse sèche de la biomasse aérienne du froment KWS_Smart (p -valeur = $1,56 \cdot 10^{-3}$) (Tableau 5). La MS moyenne est plus élevée en fertilisation nitrate qu'ammonium (Figure 40).

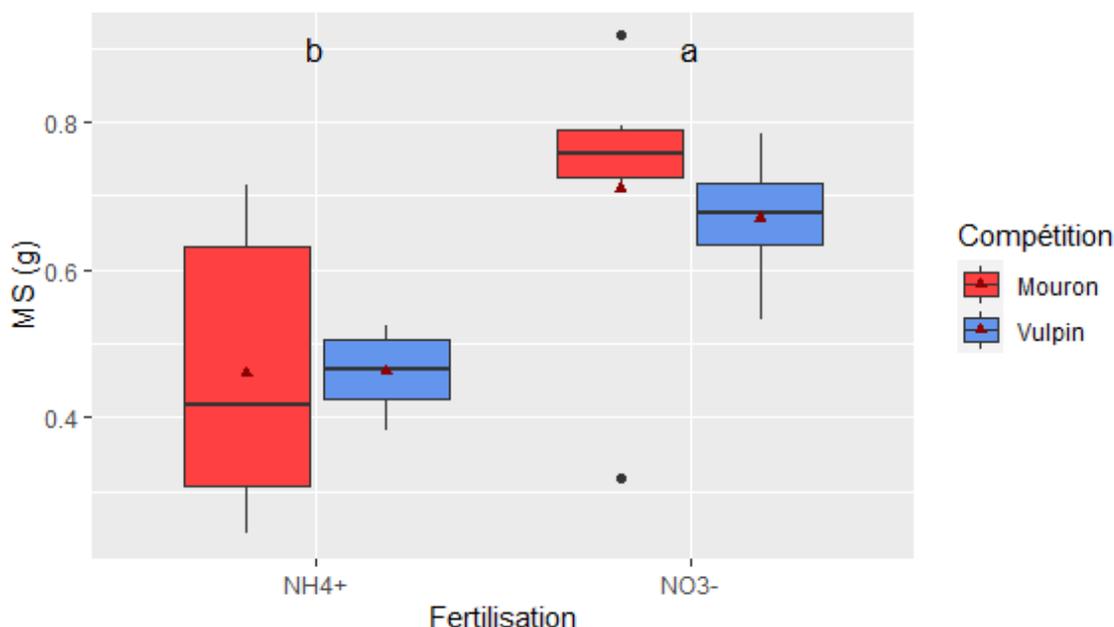


Figure 40. Boxplot de la masse sèche de la biomasse aérienne du froment KWS_Smart en fonction de la fertilisation et de la compétition. Les lettres représentent le résultat du test SNK de l'influence de la fertilisation (toutes compétitions confondues). Les triangles rouges représentent les hauteurs moyennes du froment KWS_Smart pour chaque modalité.

Le facteur compétition n'a pas d'effet significatif sur la masse sèche de la biomasse des plants de froment KWS_Smart (Tableau 5).

Notons également que la MS du froment KWS_Smart est plus élevée que celle du froment Cellule pour les 2 fertilisations (Tableau 16)

Tableau 16. Comparaison des masses sèches (MS) moyennes des froments Cellule et KWS_Smart en fonction de la fertilisation.

Facteurs	MS ± Ecart-type
Fertilisation	
NO₃⁻_Cellule	0,43 ± 0,1
NO₃⁻_KWS_Smart	0,69 ± 0,14
NH₄⁺_Cellule	0,32 ± 0,08
NH₄⁺_KWS_Smart	0,46 ± 0,15

4.3.6.3 Surface foliaire

Le facteur fertilisation, contrairement au facteur compétition, exerce une influence significative sur la surface foliaire du froment KWS_Smart (p-valeur = $3,11 \cdot 10^{-4}$) (Tableau 5). La surface foliaire moyenne est plus élevée en fertilisation nitrate qu'en fertilisation ammonium (Tableau 17).

Tableau 17. Surface foliaire du froment KWS_Smart en fonction de la fertilisation. Le facteur fertilisation est très hautement significatif (***)

Facteurs	Surface foliaire ± Ecart-type	Test SNK
Fertilisation	p-valeur = $3,11 \cdot 10^{-4}$ (***)	
NO₃⁻	133,45 ± 18,84	a
NH₄⁺	93,39 ± 23,97	b

De plus, les surfaces foliaires moyennes du froment KWS_Smart sont également plus élevées que celles du froment Cellule pour les 2 fertilisations (Tableau 18).

Tableau 18. Comparaison des surfaces foliaires moyennes des froments Cellule et KWS_Smart en fonction de la fertilisation.

Facteurs	Surface foliaire ± Ecart-type
Fertilisation	
NO₃⁻_Cellule	96,99 ± 13,35
NO₃⁻_KWS_Smart	133,45 ± 18,84
NH₄⁺_Cellule	65,24 ± 20,1
NH₄⁺_KWS_Smart	93,39 ± 23,97

4.3.6.4 Stade de développement (échelle BBCH)

Les stades de développement du froment KWS_Smart n'ont été analysés qu'à partir de la troisième semaine. En effet, pour les 2 premiers relevés hebdomadaires, tous les froments possédaient le même stade de développement pour toutes les modalités. Aucune différence significative ne pouvait donc être mise en évidence. Le stade BBCH seuil est identique de la quatrième à la sixième semaine. L'interaction des 2 facteurs (fertilisation et compétition) est significative de la troisième à la cinquième semaine (Tableau 19). Le facteur fertilisation est très hautement significatif pour la quatrième et cinquième semaine (Tableau 19).

Tableau 19. Stade de développement du froment KWS_Smart en fonction de la fertilisation, de la compétition et de l'interaction des 2 facteurs précédents. Les BBCH seuils sont les stades seuils utilisés pour réaliser les tableaux de contingence pour les tests exacts de Fisher ou khi carré.

KWS_Smart	BBCH seuil	Fertilisation (F)	Compétition (C)	F*C
BBCH T3	13	ns	ns	*
BBCH T4	20	***	ns	***
BBCH T5	20	***	ns	**
BBCH T6	20	ns	ns	ns

Les tableaux de contingence utilisés pour réaliser les tests exacts de Fisher ou de khi carré sont repris dans l'Annexe 11.

En conclusion, la fertilisation à base de nitrate amène un plus grand nombre de froment KWS_Smart à atteindre le stade BBCH seuil hebdomadaire. L'interaction des deux facteurs influencent également les stades de développement du froment KWS_Smart.

4.3.7 Ratio d'utilisation de l'ammonium

Les ratios présentés dans le Tableau 20 ont été calculés sur base des masses sèches de la biomasse aérienne des plantes en fertilisation NH₄⁺ et NO₃⁻.

Le mouron semble mieux valoriser l'ammonium en culture seule. Lorsqu'il est mis en compétition avec le froment de la variété Cellule, son ratio NH₄⁺-NO₃⁻ est fortement diminué.

Le vulpin semble moins bien valoriser l'ammonium que le mouron en culture seule. De plus, lorsque le vulpin est mis en compétition, c'est également avec la variété Cellule que son ratio $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ est le plus faible.

Lorsque le froment Cellule est en compétition avec le vulpin, il obtient le ratio le plus élevé et proche de 1. Ce ratio est également supérieur à ceux du froment KWS_Smart. La compétition avec les 2 espèces d'adventices ne semble pas influencer la valorisation de l'ammonium par le froment KWS_Smart car ses 2 ratios sont presque équivalents.

Aucun ratio n'excède 1 donc aucune espèce végétale ne semble mieux se développer en fertilisation NH_4^+ que NO_3^- .

Tableau 20. Ratios NH_4/NO_3 pour chaque espèce d'adventice seule ou en compétition et pour les 2 variétés de froment.

Espèces végétales	Ratio $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$
Mouron seul	0,46
Mouron_compétition Cellule	0,164
Mouron_compétition KWS_Smart	0,432
Vulpin seul	0,189
Vulpin_compétition_Cellule	0,256
Vulpin_compétition_KWS_Smart	0,509
Froment Cellule_compétition mouron	0,589
Froment Cellule_compétition vulpin	0,899
Froment KWS_Smart_compétition mouron	0,649
Froment KWS_Smart_compétition vulpin	0,688

5 Discussion

5.1 Les concentrations en azote minéral dans le substrat vermiculite

Le prétest réalisé sur les trois types de substrats (sol:sable (2:1), sol:sable (1:1), vermiculite) afin de déterminer leur capacité à stabiliser l'ammonium a démontré que la nitrification de l'ammonium n'a pas pu être évitée dans les substrats à base de sol. En effet, une augmentation significative de la concentration en nitrate a été observée dans les substrats sol:sable laissant penser que le DMPP n'a pas totalement pu empêcher la nitrification de l'ammonium apporté.

Le maintien de l'azote apporté sous sa forme NH_4^+ est un réel enjeu visé par le projet de recherche GAIN. En effet, l'utilisation de la fertilisation à base d'ammonium pour gérer les adventices ne sera possible que si l'ammonium peut être stabilisé à court et moyen terme dans le sol. Lors du prétest, ce sont des inhibiteurs de la nitrification synthétiques (DMPP) qui ont été utilisés. L'échec du contrôle de la nitrification dans les substrats sol:sable peut être dû à une mauvaise conservation du DMPP ou à son utilisation inadaptée pour les conditions spécifiques de notre expérience. Une alternative à ces inhibiteurs synthétiques pourrait être les inhibiteurs de nitrification biologiques (BNI) naturellement produits par certaines espèces de plantes (Coskun et al., 2017; Subbarao et al., 2021). La recherche des génotypes de froment capables de produire ces BNI fait également l'objet du projet de recherche GAIN (Unpublished, 2021). La sélection de ces génotypes de blé pouvant produire naturellement et continuellement des inhibiteurs de la nitrification pourrait être une solution pour combler l'inefficacité à long terme des inhibiteurs de la nitrification synthétiques ajoutés aux engrais à base d'ammonium.

À la suite de ce prétest, c'est la vermiculite qui a été choisie comme substrat pour l'expérience principale aux vues de ses capacités à maintenir l'ammonium stabilisé. Grâce à sa stérilité (Papadopoulos et al., 2008), aucune transformation d'azote par les micro-organismes ne semble avoir eu lieu dans ce type de substrat minéral. De plus, la vermiculite est un matériau chargé négativement possédant une capacité d'échange cationique (CEC) importante comprise entre 15 et 21 cmol.kg^{-1} (Papadopoulos et al., 2008). Durant l'expérimentation, l'azote est resté sous sa forme apportée pour les 3 traitements, c'est-à-dire sous forme d' NH_4^+ pour le traitement à base d'ammonium sulfate, sous forme de NO_3^- pour le fertilisant composé de nitrate de potassium et sous forme équivalente de NH_4^+ et NO_3^- pour le fertilisant ammonium-nitrate. Les fluctuations des teneurs moyennes en azote minéral des substrats après l'ajout de la dernière dose de fertilisant peuvent s'expliquer par des imprécisions au niveau de l'épandage de l'engrais ou lors du prélèvement de l'échantillon à doser. Effectivement, d'une semaine à l'autre, l'échantillonnage a été fait dans des zones différentes du pot pouvant avoir reçu plus ou moins de fertilisant. Ces variations entre les prélèvements sont retranscrites au travers des écart-types souvent importants. La diminution de la teneur en azote en surface après l'ajout de la quatrième dose de fertilisant peut s'expliquer par une descente de l'azote en profondeur du pot emmené par l'eau ajoutée tous les deux jours. Cependant, aucune augmentation significative de la teneur en azote à 10cm de profondeur n'a été constatée dans les 3 types de fertilisation. L'azote a donc pu être entraîné plus en profondeur ou bien maintenu en surface. Notons également qu'aucune perte d'azote par lixiviation n'a eu lieu car grâce au maintien de la WHC à 60% et que donc aucun surplus d'eau ne s'est écoulé des pots durant les 6 semaines d'arrosage.

Toutefois, ces méthodes d'extraction et de dosage de l'azote minéral pourrait ne pas être les plus appropriées pour la vermiculite. En réalité, plusieurs soucis techniques ont été rencontrés pendant l'expérience comme la forte adhérence de la vermiculite humide sur les outils utilisés pour son prélèvement. De plus, la vermiculite a une forte capacité de rétention en eau (3 à 4 fois son poids en

eau (Papadopoulos et al., 2008)) et a tendance à se tasser lorsqu'elle est hydratée. Le prélèvement de 5g de vermiculite humide pour l'extraction d'azote correspond donc à peu de matière sèche de ce substrat, en moyenne 1,8g, ce qui est faible pour réaliser un dosage d'azote probant.

5.2 Discussion de l'analyse de la biomasse aérienne des plantes cultivées

L'un des premiers objectifs de ce travail était de déterminer la source azotée préférentielle du mouron et du vulpin entre les nitrates, l'ammonium ou l'ammonium-nitrate et d'étudier son influence sur leur dynamique de développement en culture seule.

En ce qui concerne le mouron, une préférence marquée pour la fertilisation à base d'ammonium nitrate s'est révélée au travers des analyses des différents paramètres de croissance de l'adventice. Assurément, l'influence du type de fertilisation azotée est significative dès la troisième semaine de croissance pour le nombre de feuilles et le stade de développement et après 6 semaines pour la masse sèche de la biomasse aérienne et la surface foliaire. Le mouron semble donc préférer un mélange d'ions NH_4^+ et NO_3^- pour sa nutrition azotée ce qui rejoint les résultats observés par Maire et al. (2009) démontrant la préférence des plantes pour un compromis entre ces deux formes d'azote.

La source préférentielle d'azote du vulpin quant à elle ne semble pas aussi flagrante que pour le mouron. Effectivement, les fertilisations à base de nitrate et d'ammonium-nitrate semblent toutes deux améliorer la croissance du vulpin. Bien qu'aucun de ces deux types de fertilisant ne semble être davantage préféré par le vulpin, la fertilisation ammonium apparaît être la source d'azote la moins propice au développement de cette adventice.

Un autre but de cette expérience était aussi de déterminer la possibilité d'influencer la production de biomasse des adventices en jouant sur le type de fertilisation (NH_4^+ ou NO_3^-) et d'estimer quel génotype de froment exerce une plus grande compétition sur la dynamique de croissance des adventices.

Tout d'abord, lorsque les adventices sont mises en compétition avec du froment, l'interaction des facteurs compétition et fertilisation semble davantage influencer la croissance du mouron plutôt que celle du vulpin. Rappelons que cette interaction est significative pour le nombre de feuilles (en T5 et T6), la MS et la surface foliaire du mouron. En fonction de la fertilisation utilisée, le choix de la variété de froment mériterait donc d'être réfléchi car il semble pouvoir influencer la dynamique de développement de certaines adventices comme le mouron et par conséquent déterminer l'usage d'herbicides.

Ensuite, concernant l'influence de la fertilisation azotée (toutes compétitions confondues), l'ajout de fertilisant ammonium réduit le développement des deux adventices par rapport au fertilisant à base de nitrate. Ce type de fertilisation semble avoir provoqué une situation de stress chez le mouron qui a fleuri plus rapidement qu'en fertilisation nitrate. L'influence de cette fertilisation est plus importante chez le mouron que chez le vulpin. En effet, la MS de la biomasse et la surface foliaire du vulpin en fonction de la fertilisation présentent des différences de moyenne entre les traitements mais celles-ci ne sont pas significatives. Le vulpin semble donc avoir pu s'adapter aux conditions azotées dans lesquelles il a été soumis. Effectivement, en fertilisation ammonium, le ratio $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$, la hauteur moyenne (en T5 et T6), la MS moyenne et la surface foliaire moyenne du vulpin en compétition sont plus élevés que ceux du vulpin en monoculture et indiquent donc une capacité possible de l'adventice à mieux valoriser l'ammonium lorsqu'il se sent menacé par la compétition d'une autre plante. De plus, la combinaison ammonium et compétition avec le froment de la variété KWS_Smart donne une croissance moyenne du vulpin plus élevée que pour la combinaison nitrate et froment KWS_Smart. Ce

résultat est interpellant car c'est la seule situation pour les deux mauvaises herbes où le paramètre étudié est accru en fertilisation NH_4^+ par rapport à la même situation en fertilisation NO_3^- . Rappelons toutefois que ces différences de moyenne ne sont pas significatives. Notons également que le dispositif utilisé pour cette expérience (choix des densités des plantes) n'a donc pas permis de créer une réelle situation de compétition où le vulpin serait significativement pénalisé par la présence de l'une ou l'autre variété de froment.

Les conclusions des données récoltées pour chaque adventice (nombre de feuilles ou hauteur de plant, MS de la biomasse aérienne et surface foliaire) sont les suivantes.

Un développement plus faible du mouron lorsqu'il est cultivé en compétition avec la variété de froment Cellule et en fertilisation NH_4^+ . Cette analyse rejoint celle de Jauregui (n.d.), selon laquelle la variété de froment Cellule valoriserait mieux l'ammonium que la variété KWS_Smart. Le génotype de froment Cellule aurait donc privé plus tôt le mouron d'azote grâce à ses aptitudes à prélever l'ammonium. Dans le cadre de cette expérience, c'est donc la combinaison d'une fertilisation à base d'ammonium et de la variété Cellule qui semble être la méthode de lutte la plus efficace contre le mouron.

A l'inverse, quand les deux mauvaises herbes sont fertilisées avec du NO_3^- , leur développement est davantage ralenti par le froment KWS_Smart. Ce phénomène peut être expliqué par les compétences accrues de cette variété de froment à prélever les nitrates (Jauregui, n.d.) et ainsi à priver les adventices de ce nutriment induisant un ralentissement de leur croissance. Notons également qu'en fertilisation nitrate, le mouron se développe mieux lorsqu'il est en compétition avec le froment de la variété Cellule plutôt que s'il est cultivé seul. Ce résultat est inattendu et va à l'encontre des conclusions de Gaba et al. (2018) selon lesquelles la simple présence d'une culture diminue la biomasse des adventices. Plus amples recherches seraient nécessaires pour déterminer la cause de cette promotion de la croissance du mouron en compétition avec la variété Cellule. Il serait également intéressant d'étendre les recherches pour déterminer si cette interaction entre le type de fertilisation et la variété de froment influence aussi la croissance d'autres adventices ainsi que de déterminer le rôle joué par le système racinaire des deux espèces (mouron et froment) et la nature et fonctions des signaux émis dans la rhizosphère qui auraient pu contribuer à ce phénomène inattendu de promotion.

Le dernier objectif de cette recherche était de déterminer si les génotypes de froment ayant des capacités contrastées à prélever et utiliser l'ammonium comme source d'azote démontrent également un pouvoir compétitif contrasté vis-à-vis du développement d'adventices.

La variété Cellule semble plus sensible à la compétition avec les adventices et au type de fertilisation azotée que la variété KWS_Smart. Les deux variétés de froment s'avèrent toutes deux mieux se développer avec une fertilisation apportant des nitrates. Cette préférence des nitrates apparaît plus rapidement chez la variété Cellule et de façon plus marquée que pour KWS_Smart. En effet, le froment Cellule présente des différences de hauteur en fonction de la fertilisation dès la première semaine de croissance. Cette tendance ne correspond pas exactement aux résultats de Jauregui et al. avançant que la variété Cellule valoriserait mieux l'ammonium que les nitrates. Cependant, le froment Cellule possède tout de même un ratio de valorisation de NH_4^+ proche de 1 lorsqu'il est en compétition avec du vulpin. De plus, la masse sèche du froment Cellule nous indique qu'en fertilisation ammonium, c'est le mouron qui diminue le plus sa croissance alors qu'en fertilisation nitrate, c'est le vulpin qui impacte davantage le froment. La hauteur moyenne de la variété Cellule est réduite par le mouron pour les deux types de fertilisation. Le génotype Cellule paraît donc moins compétitif vis-à-vis du mouron en comparaison avec le vulpin. Le froment KWS_Smart quant à lui ne s'avère pas plus impacté par l'une ou l'autre adventice et a réalisé un développement végétatif aérien plus important que le froment Cellule durant les six semaines.

Rappelons également qu'en fertilisation ammonium, la croissance des deux variétés de froment est inférieure à celle en nitrate. Il serait donc intéressant de tester l'application de ces deux types de fertilisant sur les deux génotypes à plus long terme afin de déterminer si la fertilisation ammonium réduit significativement le rendement du froment. En réalité, même si la variété Cellule semble avoir des capacités compétitives face aux adventices en fertilisation NH_4^+ , il faudrait également que son rendement attendu soit atteint sinon cette stratégie de gestion des adventices perdrait de son intérêt.

De plus, l'expérience réalisée pour ce travail a été menée dans un environnement contrôlé, en pot et dans un substrat minéral s'éloignant beaucoup de la réalité en champ. Effectivement, la croissance en pot n'est pas optimale pour le froment qui possède un système racinaire profond (Annexe 12). Le développement de celui-ci a donc pu être restreint par la quantité de substrat mise à sa disposition et ainsi biaiser les résultats de la croissance du froment, même si un pot d'une hauteur non négligeable (20 cm) a été choisi pour cette expérience. Ensuite, l'utilisation de la vermiculite a empêché l'analyse du système racinaire des plantes qui s'est entremêlé dans les feuillets du substrat rendant ainsi son extraction très délicate. Or, selon Moreau et al., (2017), l'architecture du système racinaire exerce une influence majeure sur la compétition pour les nutriments entre les plantes.

Notons également que la serre est un milieu contrôlé où les facteurs environnementaux peuvent être manipulés pour éviter les situations de stress aux plantes. Dans l'expérience réalisée pour ce travail, les stress hydriques, thermiques et lumineux ont été évités. Or, Patterson (1995) démontre l'effet de stress environnementaux sur l'interaction entre les adventices et la culture. Selon lui, la température, la lumière, l'eau et la disponibilité des nutriments peuvent interférer dans la gestion des adventices. Il serait donc utile de tester l'influence de la fertilisation ammonium sur les adventices au champ pour en estimer l'impact réel, en interaction avec les autres facteurs environnementaux.

Enfin, le type de fertilisant n'est pas le seul facteur intéressant pour la gestion des adventices. En effet, la dose, la méthode d'application et le timing sont des éléments pouvant influencer la croissance des adventices (Blackshaw et al., 2004; Kaur et al., 2018). Si le moment d'application de l'engrais est bien choisi, il pourra créer un stress ou des carences chez l'adventice. Concernant la méthode d'application de l'engrais, si celle-ci est réalisée en profondeur, les nutriments apportés seront inexploitablement par les adventices germant en surface (Kaur et al., 2018). Finalement, en plus de tester le type de fertilisant azoté, il serait également judicieux d'en tester la dose d'application.

6 Conclusion et perspectives

Les objectifs de ce travail de fin d'études étaient tout d'abord la détermination de la source azotée préférentielle du mouron et du vulpin. Celle-ci semble être l'ammonium nitrate pour le mouron et l'ammonium nitrate ainsi que les nitrates pour le vulpin. Ensuite, le second objectif était de déterminer si la fertilisation à base d'ammonium stabilisé pouvait pénaliser la croissance des adventices et si le froment pouvait en tirer un avantage compétitif. La fertilisation ammonium semble affecter la croissance du mouron mais moins celle du vulpin. De plus, l'association de la fertilisation ammonium et du froment Cellule semble également ralentir la dynamique de croissance du mouron. La variété KWS_Smart quant à elle paraît plus compétitive face au mouron et au vulpin en fertilisation nitrate. Les deux variétés de froment ne semblent pas être impactées de la même manière face à la concurrence avec les adventices. La variété Cellule semble plus impactée par les adventices et plus particulièrement par le mouron.

Toutefois, rappelons que tous les résultats présentés dans ce travail proviennent d'une expérience réalisée en serre et qu'il serait judicieux de tester les mêmes facteurs au champ, en conditions réelles.

Concernant les perspectives de cette stratégie de lutte contre les adventices, l'utilisation d'azote sous forme d'ammonium offrirait plusieurs avantages. Son utilisation et celle des inhibiteurs de la nitrification permettraient d'éviter l'une des principales pertes d'azote qui est la lixiviation des nitrates. L'ammonium, grâce à sa charge positive, serait davantage maintenu par les particules de sol et resterait disponible plus longtemps pour les plantes. La réduction de la nitrification diminuerait également la dénitrification des nitrates en monoxyde d'azote étant un gaz à effet de serre (Raun et al., 1999; Subbarao et al., 2021). L'incorporation d'ammonium dans la fertilisation azotée pourrait également augmenter les rendements des cultures préférant un compromis entre les ions NH_4^+ et NO_3^- (Cox et al., 1973; Subbarao et al., 2021).

Toutefois, cette stratégie présente également des inconvénients qu'il faudra prendre en considération lors de sa future utilisation. En effet, l'utilisation de fertilisant à base d'ammonium pourrait favoriser des adventices assimilant et valorisant mieux l'ammonium que les nitrates. Ces dernières pourraient donc tirer un avantage compétitif de ce type de fertilisation et devenir nuisible pour les cultures. C'est le cas notamment de la folle avoine (*Avena fatua* L.) dont la croissance a été favorisée par un engrais composé de sulfate d'ammonium et a provoqué des pertes de rendement sur du blé de printemps (Carlson et al., 1985). De plus, l'ammonium utilisé à trop forte dose peut s'avérer toxique pour les plantes. Bien que le froment ne fasse pas partie des espèces les plus sensibles à ce type d'azote, il faudra veiller à utiliser l'ammonium dans des quantités adéquates afin d'éviter l'inhibition de la croissance de la culture (Britto et al., 2002).

En conclusion, il est primordial de continuer les recherches sur le développement des adventices et leur interaction avec les cultures. Ces études devront être par la suite réalisées au champ en conditions réelles, durant toute une saison culturale, en vue d'analyser les relations de l'adventice avec son environnement et sa capacité à s'adapter. L'utilisation de la fertilisation azotée pour gérer les adventices présente plusieurs avantages comme la réduction des herbicides et des pertes d'azote par lixiviation ou dénitrification. Mais l'utilisation d'une fertilisation composée exclusivement d'ammonium stabilisé nécessitera un contrôle adéquat des doses appliquées afin d'éviter les effets nocifs de cette forme d'azote. Il faudra également rester vigilant au développement de nouvelles espèces d'adventices préférant l'ammonium.

Cette stratégie mérite donc que l'on s'y intéresse afin de trouver le moyen de l'utiliser sur d'autres cultures que le froment et contre d'autres adventices sensibles à l'ammonium.

Références bibliographiques

- Benckiser G., Christ E., Herbert T., Weiske A., Blome J., Hardt M., Benckiser G., Christ E., Herbert T., Weiske A., Höhenblick J.B. & Hardt M., 2001. The nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole-phosphat (DMPP)-quantification and effects on soil metabolism. *Nutr Cycl Agroecosys* **34**, 257–266, DOI:10.1007/s11104-013-1664-6.
- Blackshaw R.E., Molnar L.J. & Janzen H.H., 2004. Nitrogen Fertilizer Timing and Application Method Affect Weed Growth and Competition with Spring Wheat. *Weed Sci.*
- Boudsocq S., Niboyet A., Lata J.C., Raynaud X., Loeuille N., Mathieu J., Blouin M., Abbadie L. & Barot S., 2012. Plant preference for ammonium versus nitrate: A neglected determinant of ecosystem functioning? *Am. Nat.* **180**(1), 60–69, DOI:10.1086/665997.
- Britto D.T. & Kronzucker H.J., 2002. Review NH₄⁺ toxicity in higher plants: a critical review. *J. Plant Physiol* **159**, 567–584.
- Britto D.T. & Kronzucker H.J., 2013. Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. *Ann. Bot.* **112**, 957–963.
- Cameron K.C., Di H.J. & Moir J.L., 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. *Ann. Appl. Biol.* **162**(2), 145–173.
- Cantarel A.A.M., Allard V., Andrieu B., Barot S., Enjalbert J., Gervais J., Goldringer I., Pommier T., Saint-Jean S. & Le Roux X., 2021. Plant functional trait variability and trait syndromes among wheat varieties: the footprint of artificial selection. *J. Exp. Bot.* **72**(4), 1166–1180, DOI:10.1093/jxb/eraa491.
- Carlson H.L. & Hill J.E., 1985. Wild Oat (*Avena fatua*) Competition with Spring Wheat : Effects of Nitrogen Fertilization. *Weed Sci.* **34**(1), 29–33.
- Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N. & Rodriguez A., 2018. *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, 77–98.
- Collège des Producteurs, 2018. Avis d'orientation de la recherche de l'encadrement et de la formation.
- Commission européenne, 2017. Rapport sur la mise en oeuvre des mesures des Etats membres pour parvenir à une utilisation durable des pesticides au titre de la directive 2009/128/CE.
- Coskun D., Britto D.T., Shi W. & Kronzucker H.J., 2017. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nat. PLANTS* **3**, 17074, DOI:10.1038/nplants.2017.74.
- Cox W.J. & Reisenauer H.M., 1973. GROWTH AND ION UPTAKE BY WHEAT SUPPLIED NITROGEN AS NITRATE, OR AMMONIUM, OR BOTH **38**(2), 363–380.
- Erismann J.W., Sutton M.A., Galloway J., Klimont Z. & Winiwarter W., 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nat. Geosci.* **1**(10), 636–639, DOI:10.1038/ngeo325.
- FAO, 2021. Agriculture mondiale: horizon 2015/2030. <https://www.fao.org/3/y3557f/y3557f08.htm#l1>, (11/12/2021).

- FAOSTAT, 2021. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL/visualize>, (11/12/2021).
- Fuertes-Mendizábal T., González-Torralba J., Arregui L.M., González-Murua C., González-Moro M.B. & Estavillo J.M., 2013. Ammonium as sole N source improves grain quality in wheat. *J. Sci. Food Agric.* **93**(9), 2162–2171, DOI:10.1002/jsfa.6022.
- Fuertes-Mendizábal T., Huérfano X., Vega-Mas I., Torralbo F., Menéndez S., Ippolito J.A., Kammann C., Wrage-Mönnig N., Cayuela M.L., Borchard N., Spokas K., Novak J., González-Moro M.B., González-Murua C. & Estavillo J.M., 2019. Biochar reduces the efficiency of nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) mitigating N₂O emissions. *Sci. Reports 2019* **9**(1), 1–16, DOI:10.1038/s41598-019-38697-2.
- Gaba S., Caneill J., Nicolardot B., Perronne R. & Bretnolle V., 2018. Crop competition in winter wheat has a higher potential than farming practices to regulate weeds. *Ecosphere* **9**(10), e02413.
- Gallardo A., Parama R. & Covelo F., 2006. Differences between soil ammonium and nitrate spatial pattern in six plant communities. Simulated effect on plant populations. *Plant Soil* **279**, 333–346, DOI:10.1007/s11104-005-8552-7.
- Grusak M.A., Broadley M.R. & White P.J., 2016. *Plant Macro- and Micronutrient Minerals*, eLS, John Wiley & Sons, Ltd, 1–6.
- Havlin J. L., Tisdale S. L., Werner L.N & Beaton J.D, 2014. *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*, Person, Inc.
- Henriet F., Jaunard D., Gillemann A., Monty A., Mahy G. & Bodson B., 2014. 3. Lutte contre les mauvaises herbes. *Libr. Blanc "Céréales."*
- Herbicide Resistance Action Committee, December-28-2021. . <https://hracglobal.com/tools/hrac-mode-of-action-classification-2021-map>, (28/12/2021).
- Houlton B.Z., Almaraz M., Aneja V., Austin A.T., Bai E., Cassman K.G., Compton J.E., Davidson E.A., Erismann J.W., Galloway J.N., Gu B., Yao G., Martinelli L.A., Scow K., Schlesinger W.H., Tomich T.P., Wang C. & Zhang X., 2019. A World of Cobenefits: Solving the Global Nitrogen Challenge. *Earth's Futur.* **7**(8), 865–872, DOI:10.1029/2019EF001222.
- Inderjit & Dakshini K.M.M., 1998. Allelopathic interference of chickweed, *Stellaria media* with seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*). *Can. J. Bot.* **76**(7), 1317–1321, DOI:10.1139/b98-159.
- International Survey of Herbicide Resistant Weeds, 2021. International herbicide-resistant weed database. <http://www.weedscience.org/Home.aspx>, (11/12/2021).
- Izrael Y.A., Semenov S.M., Anisimov O.A., Anokhin Y.A., Velichko A.A., Revich B.A. & Shiklomanov I.A., 2007. *The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Working Group II contribution*, Russian Meteorology and Hydrology, 551–556.
- Jauregui I., n.d. . *Unpublished*.
- Kaur S., Kaur R. & Chauhan B.S., 2018. Understanding crop-weed-fertilizer-water interactions and their implications for weed management in agricultural systems. *Crop Prot.* **103**, 65–72, DOI:10.1016/j.cropro.2017.09.011.

- Ladha J.K., Pathak H., Krupnik T.J., Six J. & van Kessel C., 2005. Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. *Adv. Agron.* **87**(05), 85–156.
- Laforest M. & Soufiane B., 2018. Coevolution of two sulfonylurea-resistant common chickweed (*Stellaria media*) biotypes with different mutations in the acetolactate synthase Gene. *Weed Sci.* **66**(4), 439–445, DOI:10.1017/wsc.2018.26.
- Linn A.I., Mink R., Peteinatos G.G. & Gerhards R., 2019. In-field classification of herbicide-resistant *Papaver rhoeas* and *Stellaria media* using an imaging sensor of the maximum quantum efficiency of photosystem II. *Weed Res.* **59**(5), 357–366, DOI:10.1111/WRE.12374.
- Livre Blanc Céréales, 2013. .
- Lutman P.J.W., Moss S.R., Cook S. & Welham S.J., 2013. A review of the effects of crop agronomy on the management of *Alopecurus myosuroides* DOI:10.1111/wre.12024.
- Maire V., Gross N., Da L., Pontes S., Picon-Cochard C. & Soussana J.-F., 2009. Trade-off between root nitrogen acquisition and shoot nitrogen utilization across 13 co-occurring pasture grass species. *Funct. Ecol.* **23**, 668–679, DOI:10.1111/j.1365-2435.2009.01557.x.
- Malice E., 2019. La gestion des adventices et la pollution résultant de la transformatin des engrais azotés sont deux problèmes importants en agriculture. Le projet GAIN a pour but de concilier ces deux enjeux. *CRA-W info* **61**.
- Malice E., Henriet F. & Thonar C., n.d. Tillage intensity and pedoclimatic conditions are the main drivers of weed pressure and weed populations composition in wheat agro-systems in Wallonia. *Front. Agron. (In Prep)*.
- Maréchal P.-Y., Henriet F., Vancutsem F. & Bodson B., 2012. B A Ecological review of black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) propagation abilities in relationship with herbicide resistance. *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* **16**(1), 103–113.
- Meier U., 2018. Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées. BBCH Monographie DOI:10.5073/20180906-075455.
- Moreau D., Abiven F., Busset H., Matejcek A. & Pagès L., 2017. Effects of species and soil-nitrogen availability on root system architecture traits – study on a set of weed and crop species. *Ann. Appl. Biol.* **171**(1), 103–116, DOI:10.1111/AAB.12355.
- Moreau D., Bardgett R.D., Finlay R.D., Jones D.L. & Philippot L., 2019. A plant perspective on nitrogen cycling in the rhizosphere. *Funct. Ecol.* **33**(4), 540–552, DOI:10.1111/1365-2435.13303/FORMAT/PDF/OEBPS/PAGES/1.PAGE.XHTML.
- Moreau D., Busset H., Matejcek A. & Munier-Jolain N., 2014. The ecophysiological determinants of nitrophily in annual weed species. *Weed Res.* **54**(4), 335–346, DOI:10.1111/wre.12090.
- Morison M., Guichard L., Jeuffroy M.-H., Valantin-Morison M., Guichard L. & Jeuffroy M.H., 2008. Comment maîtriser la flore adventice des grandes cultures à travers les éléments de l’itinéraire technique ? **3**, 27–41.
- Moss S., 2013. Black-grass (*Alopecurus myosuroides*) Revised 2013. *Rothamsted Res.*
- Moss S. & Lutman P., 2013. Black-grass: the potential of non-chemical control. *Rothamsted Res.*

- Oerke E., 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* **144**, 31–43, DOI:10.1017/S0021859605005708.
- Palou A.T., Ranzenberger A.C. & Larios C.Z., 2008. Management of Herbicide-Resistant Weed Populations: 100 questions on resistance 105.
- Papadopoulos A.P., Bar-Tal A., Silber A., Saha U.K. & Raviv M., 2008. *Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixes*, Soilless Culture: Theory and Practice, Elsevier Ltd., 505–543.
- Patterson D.T., 1995. Effects of Environmental Stress on Weed / Crop Interactions **43**(3), 483–490.
- Pätzold S., Hbirkou C., Dicke D., Gerhards R., Welp G. & Pätzold spaetzold S., 2020. Linking weed patterns with soil properties: a long-term case study. *Precis. Agric.* **21**, 569–588, DOI:10.1007/s11119-019-09682-6.
- Poortmans M., 2013. Etude de la dynamique des populations de vulpin (*Alopecurus myosuroides* Huds.) et de matricaire (*Matricaria recutita* L.) en culture de froment d’hiver pour la mise en oeuvre de méthodes intégrées de leur contrôle.
- Raun W.R. & Johnson G. V., 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* **91**(3), 357–363, DOI:10.2134/agronj1999.00021962009100030001x.
- Schaffers A.P. & Sýkora K. V., 2000. Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction: a comparison with field measurements. *J. Veg. Sci.* **11**(2), 225–244, DOI:10.2307/3236802.
- Schvartz C., Muller J.-C. & Decroux J., 2005. *Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies*, France agricole, 414.
- Smith S.E. & Read D.J., 2008. Mycorrhizal Symbiosis 3rd edn Academic Press: San Diego. *Acad. Press San Diego, and London*.
- Söderlund R., 1981. Dry and wet deposition of nitrogen compounds. *Ecol. Bull.* **33**, 123–130.
- STATBEL, 2021. Exploitations agricoles et horticoles | Statbel. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche/exploitations-agricoles-et-horticoles#figures>, (11/12/2021).
- Station Rhône-Alpes Légumes, n.d. .
- Subbarao G. V. & Searchinger T.D., 2021. A “more ammonium solution” to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **118**(22), 2107576118, DOI:10.1073/PNAS.2107576118/-/DCSUPPLEMENTAL.
- Thomson A.J., Giannopoulos G., Pretty J., Baggs E.M. & Richardson D.J., 2012. Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **367**(1593), 1157–1168, DOI:10.1098/RSTB.2011.0415.
- Unpublished, 2021. Rapport annuel du projet de recherche GAIN, année 2 1–13.
- Uusitalo T., Saarinen A. & Mäkelä P.S.A., 2013. Effect of Management of Sulfonylurea Resistant *Stellaria media* on Barley Yield . *ISRN Agron.* **2013**, 1–5, DOI:10.1155/2013/310764.

Van Delden A., Lotz L.A.P., Bastiaans L., Franke A.C., Smid H.G., Groeneveld R.M.W. & Kropff M.J., 2002. The influence of nitrogen supply on the ability of wheat and potato to suppress *Stellaria media* growth and reproduction. *Weed Res.* **42**(6), 429–445, DOI:10.1046/j.1365-3180.2002.00303.x.

Voss-Fels K.P., Stahl A., Wittkop B., Lichthardt C., Nagler S., Rose T., Chen T.W., Zetzsche H., Seddig S., Majid Baig M., Ballvora A., Frisch M., Ross E., Hayes B.J., Hayden M.J., Ordon F., Leon J., Kage H., Friedt W., Stützel H. & Snowdon R.J., 2019. Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. *Nat. Plants* 2019 57 **5**(7), 706–714, DOI:10.1038/s41477-019-0445-5.

Vulpin des champs, October-22-2021. . <http://www.infloweb.fr/vulpin-des-champs>, (22/10/2021).

Wieser H., Koehler P. & Scherf K.A., 2020. Botanical features of wheat. *In: Wheat - An Exceptional Crop*. Woodhead Publishing, 1–12.

Annexes

Annexe 1. Composition des réactifs pour le dosage de l'azote

Utilisation	Réactif	Composition	Quantité dans chaque puit
Détermination NO_3^-	VCl_3	0,8% VCl_3 dans HCl (1M)	100 μl
Détermination NO_3^- et NO_2^-	Griess (mélange en volume équivalent de 2 réactifs)	1% sulphanilamide dans HCl (3N) 0,1% N-naphthylethylenediamine dihydrochloride (NEDD)	100 μl
Détermination NH_4^+	A	0,33 M sodium phenolate (Sodium phenoxide trihydrate) dans NaOH (0,16M)	100 μl
Détermination NH_4^+	B	0,02% sodium nitroprusside (Sodium nitroferricyanide)	50 μl
Détermination NH_4^+	C	2% sodium hypochlorite	100 μl

Annexe 2. Courbes d'étalonnage utilisées pour le dosage de l'azote minéral.

Courbes d'étalonnage pour un volume final de 2mL.

Courbe d'étalonnage (mg NO_3^- / L)	Volume solution stock (100 mg NO_3^- /L) (μl)	H_2O (μl)
0	0	2000
2	40	1960
4	80	1920
6	120	1880
10	200	1800
14	280	1720
20	400	1600
24	480	1520
Courbe d'étalonnage (mg NO_2^- / L)	Volume solution stock (10 mg NO_2^- /L) (μl)	H_2O (μl)
0	0	2000
0.1	20	1980
0.2	40	1960
0.3	60	1940
0.4	80	1920

0.8	160	1840
1	200	1800
2	400	1600
Courbe d'étalonnage (mg NH₄⁺ / L)	Volume solution stock (100 mg NH₄⁺/L) (μl)	H₂O (μl)
0	0	2000
1	20	1980
2	40	1960
3	60	1940
4	80	1920
6	120	1880
8	160	1840
10	200	1800

Annexe 3. Méthode de calcul de la capacité de rétention d'eau du substrat.

Maximum Water Holding Capacity (mWHC)

La vermiculite fraîche est remplie dans des cylindres ouverts des 2 cotés sur une hauteur de 8cm, légèrement compactée et pesée (FWB). Les cylindres sont fermés avec un fin tissu en-dessous et avec un papier aluminium au-dessus. Ils sont placés dans une boîte de Pétri contenant de l'eau sur 2-3cm de hauteur. L'eau doit être montée à la surface du substrat par capillarité pour que les cylindres soient ensuite placés dans un berlin avec une hauteur d'eau allant jusqu'à 1 cm au-dessus de la limite de vermiculite dans les cylindres. Les cylindres y sont laissés pendant 1 heure pour atteindre la saturation complète.



Un bain de sable saturé en eau est préalablement préparé. Un ballon d'eau renversé y est placé à la surface afin d'assurer un niveau d'eau constant dans le bain de sable. Les cylindres sont placés sur le sable pendant 4 heures pour permettre à l'eau non liée par capillarité de s'écouler. Une fois le temps écoulé, le poids humide de la vermiculite est mesuré (AWB) et les échantillons sont ensuite placés dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. La vermiculite sèche est ensuite pesée (TWB) et la WHC peut être calculée comme suit :

$$mWHC = \frac{AWB - TWB}{TWB - Tara}$$

mWHC = maximum water holding capacity (capacité maximale de rétention d'eau)
 Tara = poids du plateau de séchage (g)
 AWB = poids brut de l'échantillon de vermiculite après saturation (g)
 TWB = poids brut de l'échantillon de vermiculite sèche (g)

Le contenu en matière sèche de la vermiculite humide est calculé :

$$\% \text{ DM} = 100 * (\text{TWB} - \text{Tara}) / (\text{FWB} - \text{Tara})$$

FWB = poids brut de l'échantillon de vermiculite frais (g)

Le contenu en eau (WC) de la vermiculite fraîche (g eau par g matière sèche) est calculé :

$$\text{WC} = (100 - \% \text{ DM}) / \% \text{ DM}$$

La quantité d'eau (y) qu'il faut ajouter à la vermiculite fraîche par g de matière sèche pour atteindre x% de mWHC est donnée par :

$$y = \left(mWHC * \frac{x}{100} \right) - (WC)$$

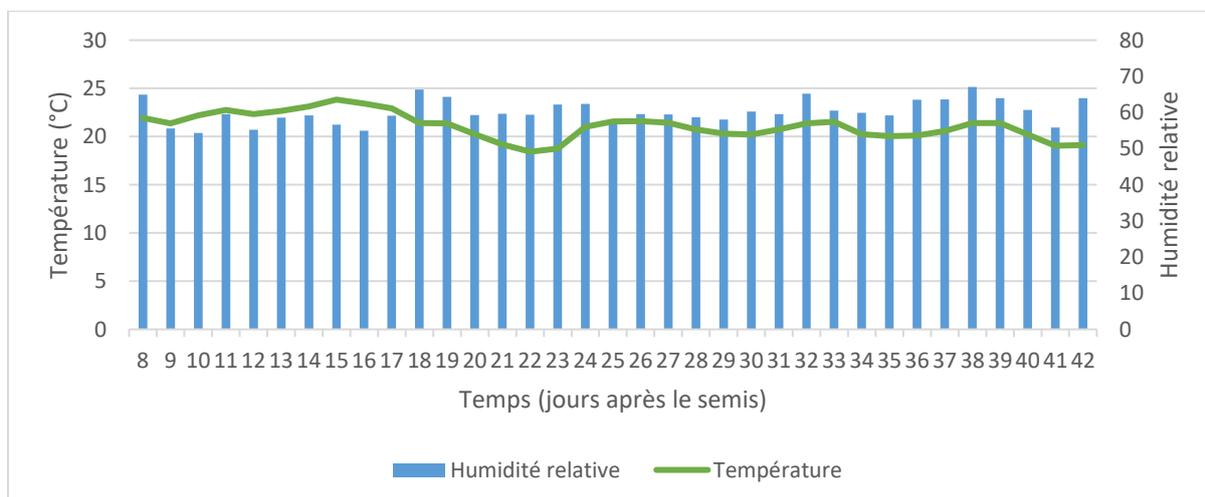
Annexe 4. Sels utilisés pour préparer la solution nutritive

Eléments	Sels utilisés
Ca	CaCl ₂ ·2H ₂ O
P	KH ₂ PO ₄
Fe	Fe-EDTA
Mg	MgSO ₄ ·7H ₂ O
Mn	MnSO ₄ ·H ₂ O
B	H ₃ BO ₃
Zn	ZnSO ₄ ·7H ₂ O
Cu	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Co	CoSO ₄ ·7H ₂ O
Mo	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O
N	(NH ₄) ₂ SO ₄ KNO ₃ (NH ₄)NO ₃
K	KCl
S	CaSO ₄ ·2H ₂ O

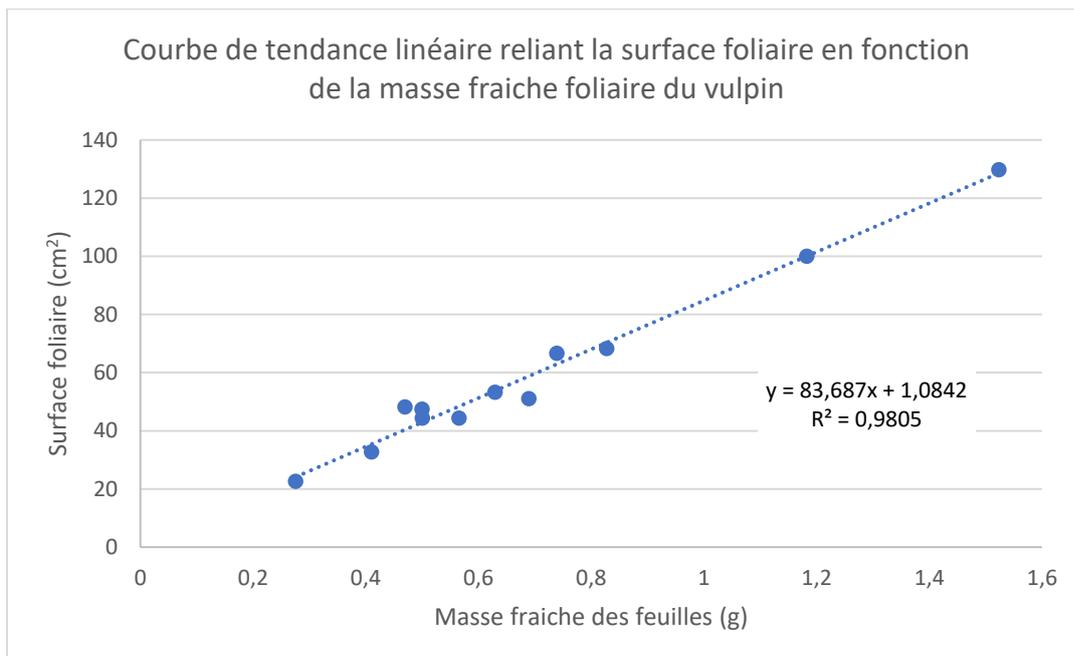
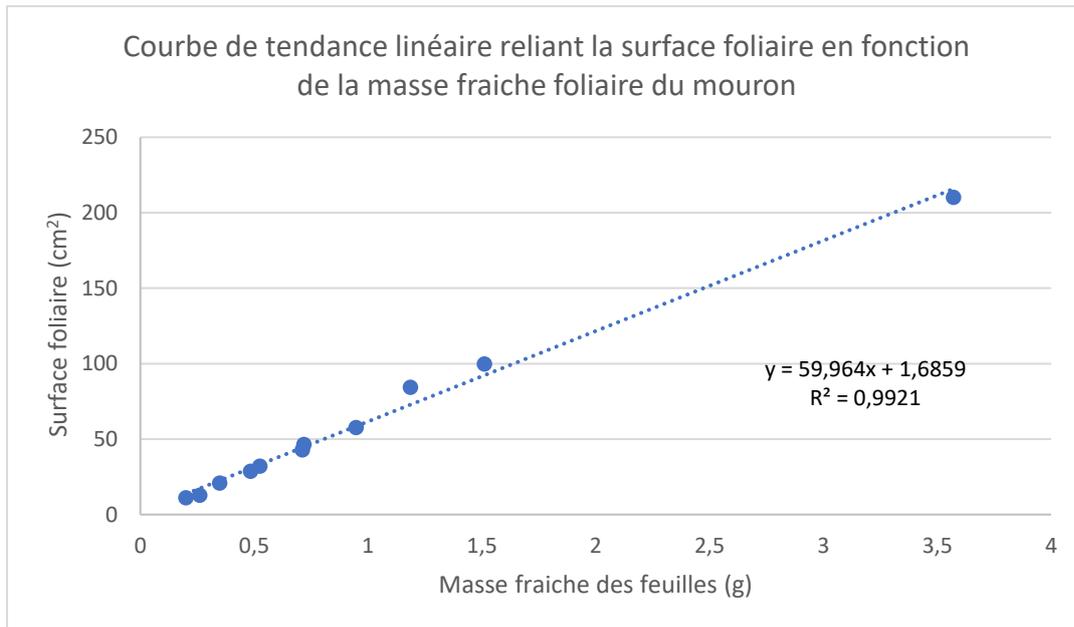
Annexe 5. Concentrations des éléments nutritifs dans 25mL de solution

Sels	Concentration dans 25mL (g/L)
Ca	0,06
P	0,06
Fe	0,0015
Mg	0,06
Mn	0,0006
B	0,00012
Zn	0,0006
Cu	0,00018
Co	0,000018
Mo	0,000018
N	0,951
K	2,66
DMPP	0,010

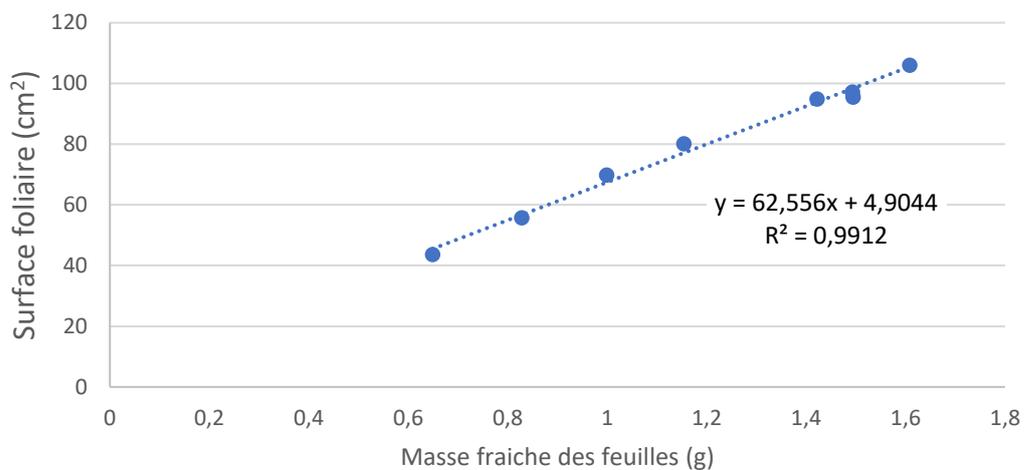
Annexe 6. Température et humidité dans la serre en fonction du temps.



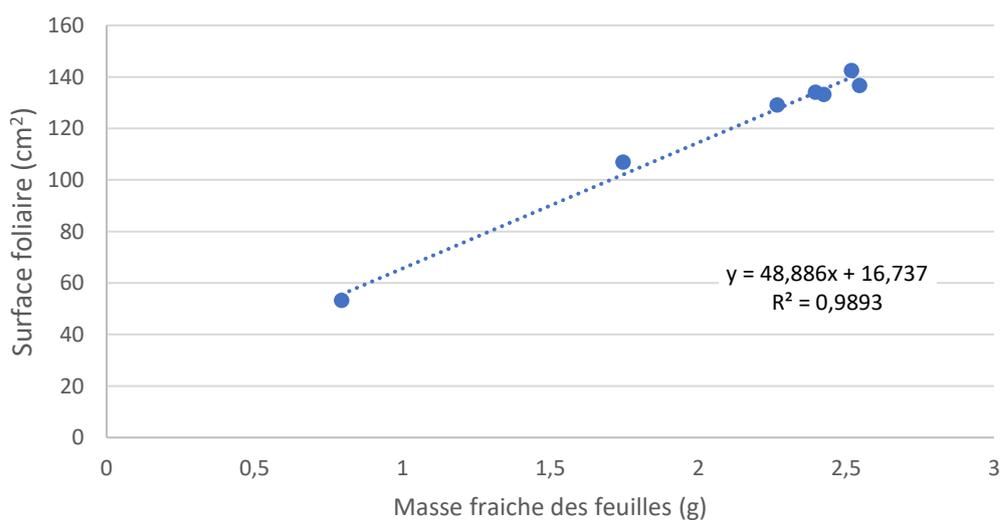
Annexe 7. Relations linéaires reliant la masse fraîche des feuilles à la surface foliaire pour le mouron, le vulpin, les froments Cellule et KWS Smart.



Courbe de tendance linéaire reliant la surface foliaire en fonction de la masse fraîche foliaire du froment Cellule



Courbe de tendance linéaire reliant la surface foliaire en fonction de la masse fraîche foliaire du froment KWS Smart



Annexe 8. Tableaux de contingence pour les analyses des stades de développement du mouron.

T2	F*C	<12	≥ 12
	NH ₄ _0	1	5
	NH ₄ _Cellule	1	5
	NH ₄ _KWS_Smart	1	5
	NO ₃ _0	1	5
	NO ₃ _Cellule	1	5
	NO ₃ _KWS_Smart	1	5

F	<12	≥ 12
NH ₄	5	13
NO ₃	3	15

C	<12	≥ 12
0	2	10
Cellule	4	8
KWS_Smart	2	10

T3	F*C	<16	≥ 16
	NH ₄ _0	4	2
	NH ₄ _Cellule	5	1
	NH ₄ _KWS_Smart	3	3
	NO ₃ _0	1	5
	NO ₃ _Cellule	0	6
	NO ₃ _KWS_Smart	1	5

F	<16	≥ 16
NH ₄	12	6
NO ₃	2	16

C	<16	≥ 16
0	5	7
Cellule	5	7
KWS_Smart	4	8

T4	F*C	<23	≥ 23
	NH ₄ _0	4	2
	NH ₄ _Cellule	6	0
	NH ₄ _KWS_Smart	4	2
	NO ₃ _0	1	5
	NO ₃ _Cellule	0	6
	NO ₃ _KWS_Smart	1	5

F	<23	≥ 23
NH ₄	14	4
NO ₃	2	16

C	<23	≥ 23
0	5	7
Cellule	6	6
KWS_Smart	5	7

T5	F*C	<25	≥ 25
	NH ₄ _0	3	3
	NH ₄ _Cellule	5	1
	NH ₄ _KWS_Smart	5	1
	NO ₃ _0	3	3
	NO ₃ _Cellule	0	6
	NO ₃ _KWS_Smart	2	4

F	<25	≥ 25
NH ₄	13	5
NO ₃	5	13

C	<25	≥ 25
0	6	6
Cellule	5	7
KWS_Smart	7	5

T6	F*C	<27	≥ 27
	NH ₄ _0	3	3
	NH ₄ _Cellule	5	1
	NH ₄ _KWS_Smart	5	1
	NO ₃ _0	2	4
	NO ₃ _Cellule	0	6
	NO ₃ _KWS_Smart	0	6

F	<27	≥ 27
NH ₄	13	5
NO ₃	4	14

C	<27	≥ 27
0	5	7
Cellule	5	7
KWS_Smart	7	5

Annexe 9. Tableaux de contingence pour les analyses des stades de développement du vulpin.

T1	F*C	<11	≥ 11	F	<11	≥ 11	C	<11	≥ 11
	NH ₄ _0	1	4	NH ₄	2	14	0	1	10
	NH ₄ _Cellule	0	6	NO ₃	1	17	Cellule	0	12
	NH ₄ _KWS_Smart	1	4				KWS_Smart	2	9
	NO ₃ _0	0	6						
	NO ₃ _Cellule	0	6						
	NO ₃ _KWS_Smart	1	5						

T2	F*C	<12	≥ 12	F	<12	≥ 12	C	<12	≥ 12
	NH ₄ _0	1	4	NH ₄	2	14	0	1	10
	NH ₄ _Cellule	1	5	NO ₃	1	17	Cellule	1	11
	NH ₄ _KWS_Smart	0	5				KWS_Smart	1	10
	NO ₃ _0	0	6						
	NO ₃ _Cellule	0	6						
	NO ₃ _KWS_Smart	1	5						

T3	F*C	<13	≥ 13	F	<13	≥ 13	C	<13	≥ 13
	NH ₄ _0	1	4	NH ₄	2	14	0	1	10
	NH ₄ _Cellule	1	5	NO ₃	1	17	Cellule	1	11
	NH ₄ _KWS_Smart	0	5				KWS_Smart	1	10
	NO ₃ _0	0	6						
	NO ₃ _Cellule	0	6						
	NO ₃ _KWS_Smart	1	5						

T4	F*C	<23	≥ 23	F	<23	≥ 23	C	<23	≥ 23
	NH ₄ _0	2	3	NH ₄	4	12	0	3	8
	NH ₄ _Cellule	1	5	NO ₃	3	15	Cellule	1	11
	NH ₄ _KWS_Smart	1	4				KWS_Smart	3	8
	NO ₃ _0	1	5						
	NO ₃ _Cellule	0	6						
	NO ₃ _KWS_Smart	2	4						

T5	F*C	<25	≥ 25	F	<25	≥ 25	C	<25	≥ 25
	NH ₄ _0	4	1	NH ₄	8	8	0	7	4
	NH ₄ _Cellule	3	3	NO ₃	10	8	Cellule	6	5
	NH ₄ _KWS_Smart	1	4				KWS_Smart	5	6
	NO ₃ _0	3	3						
	NO ₃ _Cellule	3	3						
	NO ₃ _KWS_Smart	4	2						

T6	F*C	<26	≥ 26
	NH ₄ _0	1	4
	NH ₄ _Cellule	2	4
	NH ₄ _KWS_Smart	1	4
	NO ₃ _0	2	4
	NO ₃ _Cellule	2	4
	NO ₃ _KWS_Smart	4	2

F	<26	≥ 26
NH ₄	4	12
NO ₃	8	10

C	<26	≥ 26
0	3	8
Cellule	4	8
KWS_Smart	5	6

Annexe 10. Tableaux de contingence pour les analyses des stades de développement du froment Cellule.

T3	F*C	< 13	≥ 13
	NH ₄ _Mouron	0	18
	NH ₄ _Vulpin	1	17
	NO ₃ _Mouron	1	17
	NO ₃ _Vulpin	0	18

F	< 13	≥ 13
NH ₄	1	35
NO ₃	1	35

C	< 13	≥ 13
Mouron	1	35
Vulpin	1	35

T4	F*C	< 20	≥ 20
	NH ₄ _Mouron	12	6
	NH ₄ _Vulpin	4	14
	NO ₃ _Mouron	4	14
	NO ₃ _Vulpin	3	15

F	< 20	≥ 20
NH ₄	16	20
NO ₃	7	29

C	< 20	≥ 20
Mouron	16	20
Vulpin	7	29

T5	F*C	< 20	≥ 20
	NH ₄ _Mouron	8	10
	NH ₄ _Vulpin	6	12
	NO ₃ _Mouron	2	16
	NO ₃ _Vulpin	1	17

F	< 20	≥ 20
NH ₄	14	22
NO ₃	3	33

C	< 20	≥ 20
Mouron	10	26
Vulpin	7	29

T6	F*C	< 20	≥ 20
	NH ₄ _Mouron	4	14
	NH ₄ _Vulpin	2	16
	NO ₃ _Mouron	0	18
	NO ₃ _Vulpin	1	17

F	< 20	≥ 20
NH ₄	6	30
NO ₃	1	35

C	< 20	≥ 20
Mouron	4	32
Vulpin	3	33

Annexe 11. Tableaux de contingence pour les analyses des stades de développement du froment KWS_Smart.

T3	F*C		<13	≥ 13
	NH ₄ _Mouron	14	22	
NH ₄ _Vulpin	7	29		
NO ₃ _Mouron	2	34		
NO ₃ _Vulpin	5	31		

F	<13	≥ 13
	NH ₄	25
NO ₃	7	9

C	<13	≥ 13
	Mouron	16
Vulpin	16	20

T4	F*C		<20	≥ 20
	NH ₄ _Mouron	32	4	
NH ₄ _Vulpin	6	30		
NO ₃ _Mouron	3	33		
NO ₃ _Vulpin	3	33		

F	<20	≥ 20
	NH ₄	26
NO ₃	6	30

C	<20	≥ 20
	Mouron	17
Vulpin	15	21

T5	F*C		<20	≥ 20
	NH ₄ _Mouron	10	26	
NH ₄ _Vulpin	8	28		
NO ₃ _Mouron	3	33		
NO ₃ _Vulpin	1	35		

F	<20	≥ 20
	NH ₄	18
NO ₃	4	32

C	<20	≥ 20
	Mouron	13
Vulpin	9	27

T6	F*C		<20	≥ 20
	NH ₄ _Mouron	4	32	
NH ₄ _Vulpin	0	36		
NO ₃ _Mouron	1	35		
NO ₃ _Vulpin	0	36		

F	<20	≥ 20
	NH ₄	4
NO ₃	1	35

C	<20	≥ 20
	Mouron	5
Vulpin	0	36

Annexe 12. Dessin du développement du système racinaire du froment (Wageningen University & Research).

