
Rapport synthétique du projet GAIN (Phase 2) :

Gestion des Adventices par Innovations de la Nutrition azotée

1. Contexte et objectifs

Dans un contexte où près des deux tiers de l'azote apporté par les engrais sont perdus dans l'environnement, entraînant de graves impacts écologiques, et où la dépendance aux herbicides demeure une problématique majeure, l'objectif général du projet GAIN est de proposer une solution innovante permettant d'optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'azote tout en intégrant une gestion durable des adventices.

Cette gestion repose sur le concept GAIN qui combine différentes stratégies permettant au froment d'avoir un avantage compétitif sur les plantes adventices en améliorant de manière sélective l'accès aux ressources azotées du sol pour leur croissance.

Le premier objectif (WP1) a eu pour ambition d'identifier la flore adventice en Wallonie et de déterminer les facteurs permettant de limiter leur développement. De plus, il a consisté à tester en conditions contrôlées le concept GAIN, en combinant les résultats de la phase 1 du projet, à savoir : les géotypes de froment ayant une préférence pour l'ammonium, les adventices, et l'utilisation d'engrais contenant de l'ammonium stabilisé.

Le deuxième objectif (WP2) a testé au champ les combinaisons prometteuses de variétés de froment et d'engrais et a aussi évalué l'impact environnemental de cette stratégie.

Le troisième objectif (WP3) a poursuivi la caractérisation moléculaire et génétique de la préférence chez le froment pour une source azotée à base d'ammonium, tout en identifiant parmi les variétés modernes cultivées en Wallonie celles qui possèdent le trait « ammonium ».

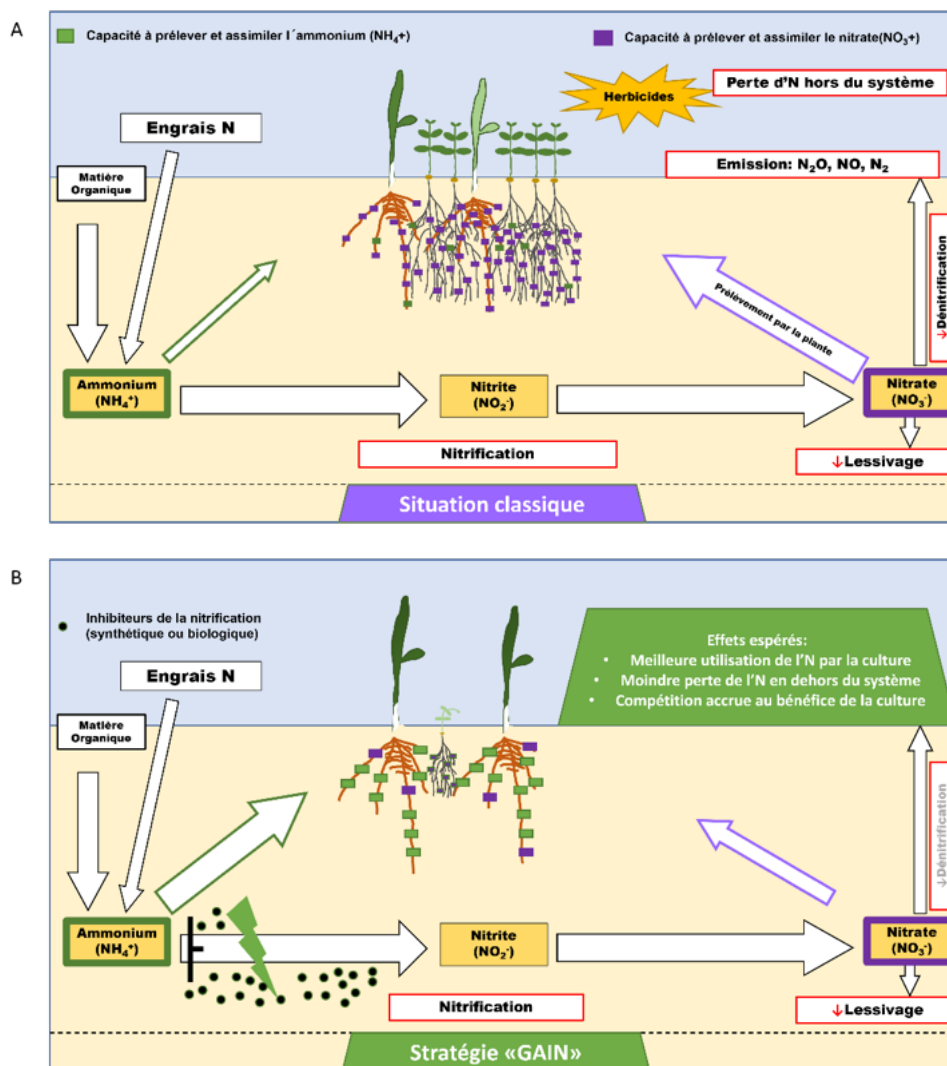


Figure 1 : A, Situation classique dans laquelle près des deux tiers de l'azote apporté par les engrais sont perdus dans l'environnement, entraînant de graves impacts écologiques. Dans ce système, la dépendance aux herbicides persiste. B, Stratégie «GAIN» consistant à optimiser l'utilisation de l'azote des engrais grâce à la préférence du froment pour l'ammonium stabilisé, tout en réduisant la pression des adventices.

2. Activités de recherche

WP1 : Quels leviers pour limiter la flore adventice ?

❖ Pratiques culturales et variables physico-chimiques

Réalisées sur deux saisons, les enquêtes et observations de terrain ont montré que la manière dont l'agriculteur travaille son sol influence significativement la pression exercée par la flore adventice. Les espèces les plus représentées lors de cet échantillonnage avant le labour sont : le vulpin des champs, la camomille, le mouron des oiseaux et la véronique de Perse.

Parmi les pratiques culturales, quatre jouent un rôle clé sur la densité générale des adventices :

- (i) Le travail du sol à long terme: la densité des adventices est la plus élevée en techniques culturales simplifiées (TCS), suivie du labour, puis du semis direct.
- (ii) La rotation culturale: une rotation comprenant un nombre réduit de cultures de printemps entraîne une augmentation de la densité des adventices.
- (iii) L'utilisation du glyphosate au semis contribue à réduire la densité des adventices.

(iv) La présence d'un couvert à l'interculture précédant le semis de froment permet également de limiter leur prolifération.

En revanche, les propriétés physico-chimiques du sol ne semblent pas influencer la densité globale des adventices, bien qu'elles puissent impacter certaines espèces spécifiques, comme la teneur en potassium du sol sur le vulpin.

❖ La compétition pour l'azote

Nous avons mené une étude sur la compétition pour l'azote entre le froment et le mouron des oiseaux en milieu contrôlé. Nos résultats indiquent que la croissance du mouron des oiseaux est affectée lorsqu'il est en compétition avec le froment. L'issue de cette compétition dépend principalement de deux facteurs : la source d'azote utilisée (type d'engrais) et la variété de froment choisie. Ainsi, la variété Cellule, qui préfère l'ammonium comme source d'azote et pousse sous un régime de fertilisation ammonium, diminue la biomasse du mouron des oiseaux lorsqu'ils sont en coculture. En revanche, cet effet n'est pas observé lorsque le mouron est en en coculture avec la variété KWS Smart, qui privilégie l'ammonium-nitrate comme source d'azote. Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour la gestion des adventices.

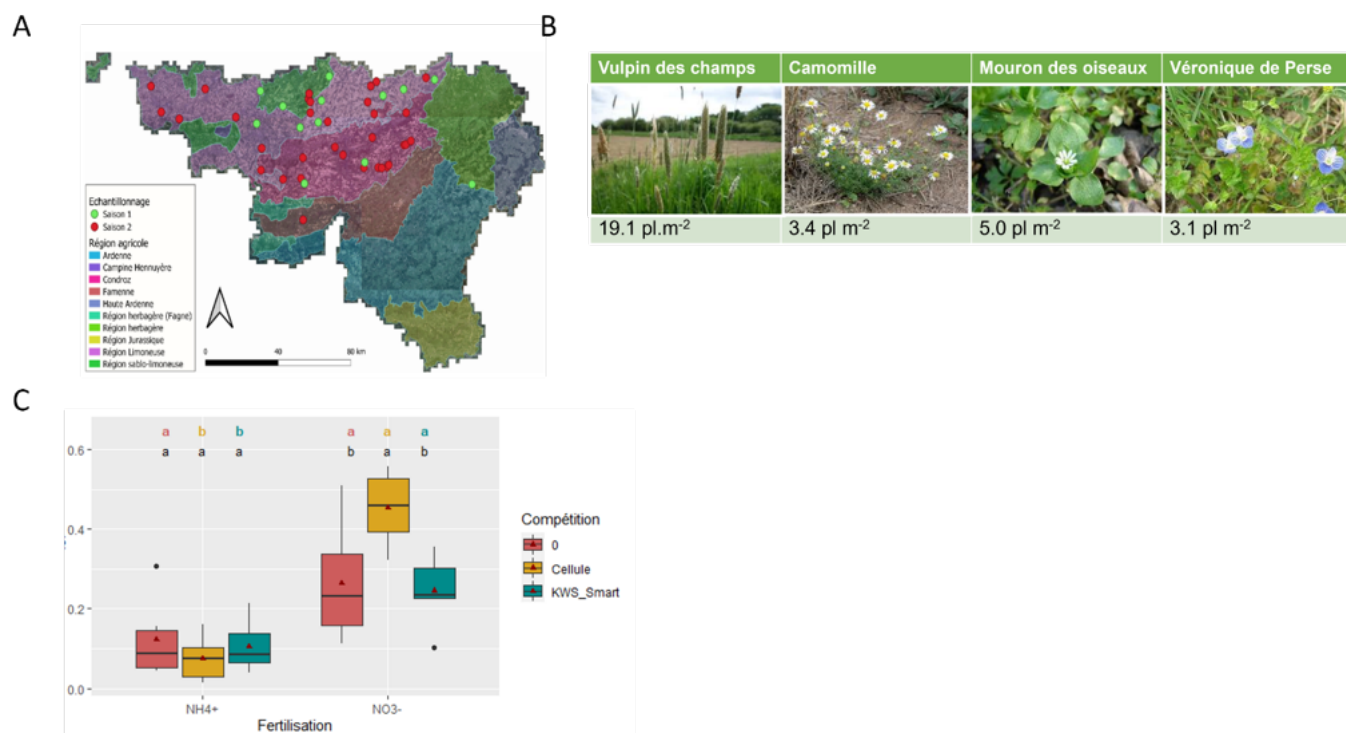


Figure 2 : La flore adventices en Wallonie et stratégie de gestion du mouron sur la compétition pour l'azote. A, Carte des 46 parcelles en bio et en conventionnel échantillonnées en Wallonie. B, Moyennes des 4 adventices les plus répandues lors des observations avant désherbage. C, Biomasse foliaire du mouron (masse sèche en g): en culture pure (rouge) ou en coculture avec différentes variétés de froment (jaune et vert) avec différentes formes d'azote (ammonium ou nitrate).

WP2 : Mise en œuvre de la stratégie GAIN au champ

La stratégie GAIN a été testée sur le terrain pendant trois saisons culturales, de 2021 à 2024. Afin d'obtenir une évaluation complète à la fois en termes de rendement et d'impact environnemental, les paramètres de rendement ont été mesurés à chaque saison, et les effets sur l'environnement ont été analysés.

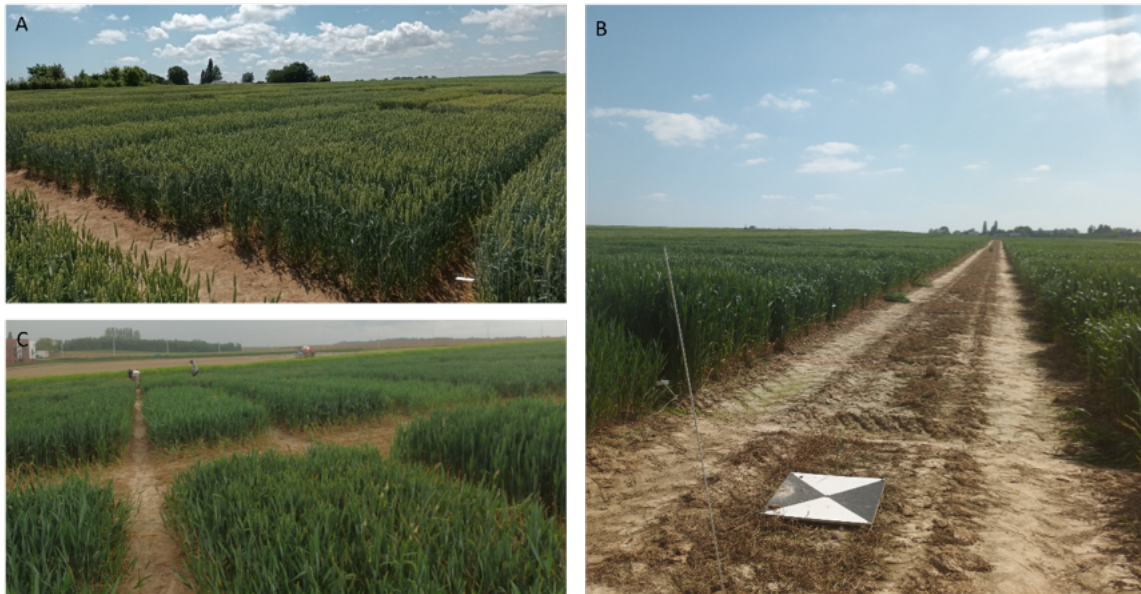


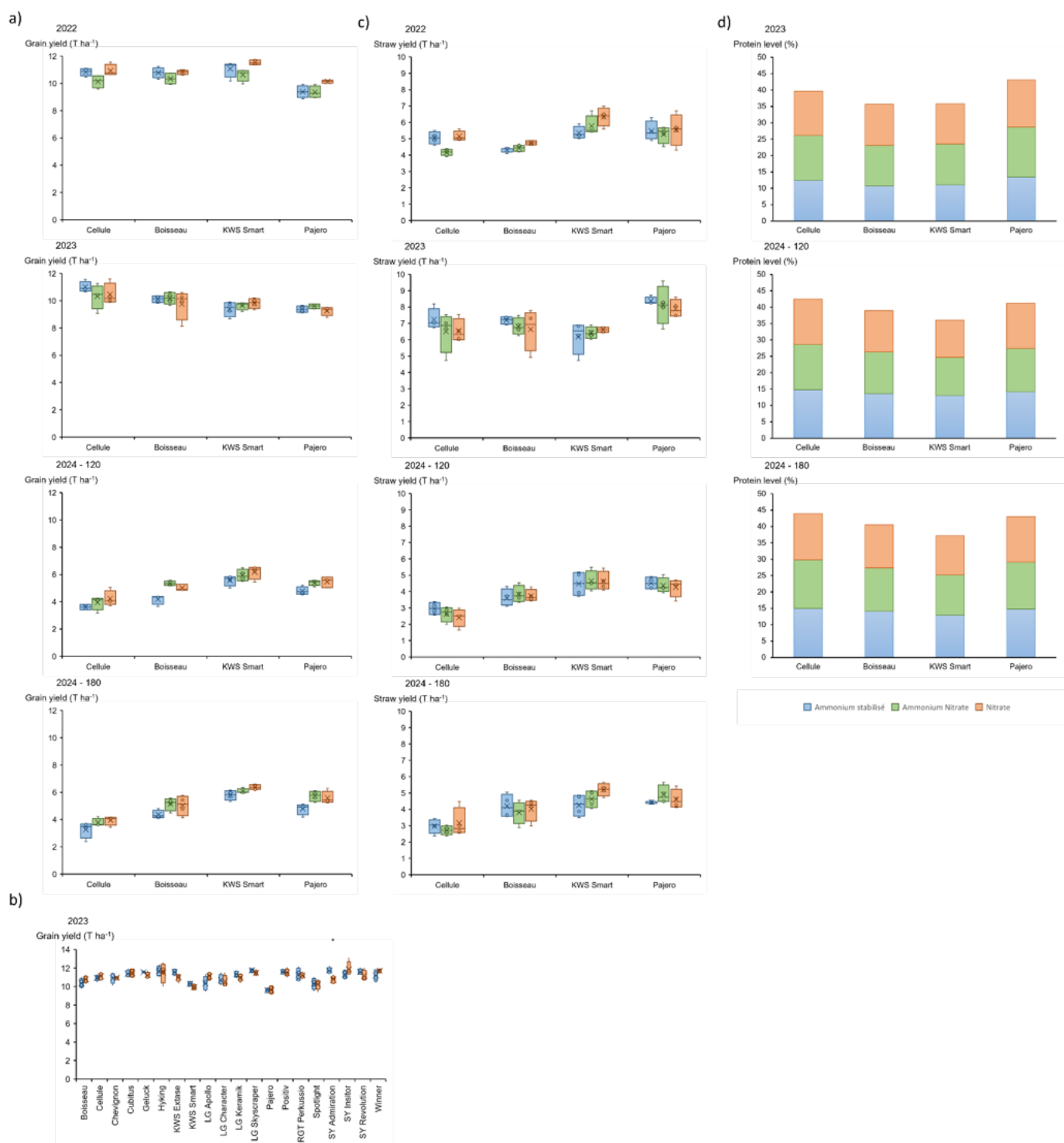
Figure 3 : Photographies des essais GAIN. A, parcelle Moulin (Grand-Leez) en juin 2022. B, parcelle Zémont (Gembloux) en mai 2023. C, parcelle Ernage (Gembloux) en mai 2024.

❖ Effets de la stratégie sur les composantes du rendement

Au cours des trois années, des variétés performantes sur ammonium, Cellule et Boisseau, ont été testé sur une fertilisation en ammonium stabilisé (AS) et ont été comparé à des fertilisations en ammonium-nitrate (AN) et nitrate (NC), ainsi que par rapport à des variétés performantes sur ammonium-nitrate, KWS Smart et Pajero. Nos résultats indiquent que la performance de la stratégie GAIN dépend des conditions climatiques. En effet, des rendements en grains supérieurs au regard des variétés ont été obtenus lors de l'année intermédiaire sur le plan du climat (2023) et identiques au regard des fertilisations. De manière intéressante, lors de cette même année, une variété issue du catalogue Belge a montré des rendements en grains supérieurs sur une fertilisation AS en comparaison à une fertilisation NC. Lors de l'année chaude et sèche (2022), les rendements en grain sont identiques au sein des variétés performantes uniquement; équivalents en paille toutes variétés confondues. Lors de l'année humide et froide (2024), les rendements en grain sont inférieurs pour la stratégie GAIN mais équivalents en paille et le taux de protéine est supérieur.

Rapport synthétique: GAIN (D65-1416)

Gestion des Adventices par Innovations de la Nutrition azotée



❖ Effets de la stratégie sur les paramètres environnementaux

L'étude s'est concentrée sur la mesure du taux de nitrate dans le sol au cours des trois années ainsi que sur l'impact de la stratégie GAIN sur les champignons du sol et associés aux racines durant l'année intermédiaire (2023). Lors de l'année froide et humide (2024), le taux de protoxyde d'azote a également été mesuré. Nos résultats indiquent que, quel que soit le climat, la stratégie GAIN limite le

Rapport synthétique: GAIN (D65-1416)

Gestion des Adventices par Innovations de la Nutrition azotée

lessivage des nitrates par rapport aux autres fertilisations. De plus, en 2024, nous avons observé un niveau équivalent de nitrate entre les apports de 120 et 180 unités d'azote, suggérant une possibilité de réduction des apports sans impact négatif sur la disponibilité en azote. Concernant la diversité et la richesse des communautés fongiques, aucune différence significative n'a été relevée entre les fertilisations. Cependant, lors de la floraison du froment, la fertilisation à l'ammonium stabilisé semble favoriser la diversité et la richesse de ces communautés au niveau racinaire. Enfin, les mesures de protoxyde d'azote en 2024 montrent que la stratégie GAIN réduit significativement les émissions de ce gaz à effet de serre. L'ensemble de ces éléments suggère que la stratégie GAIN contribue à limiter l'impact environnemental des engrais azotés.

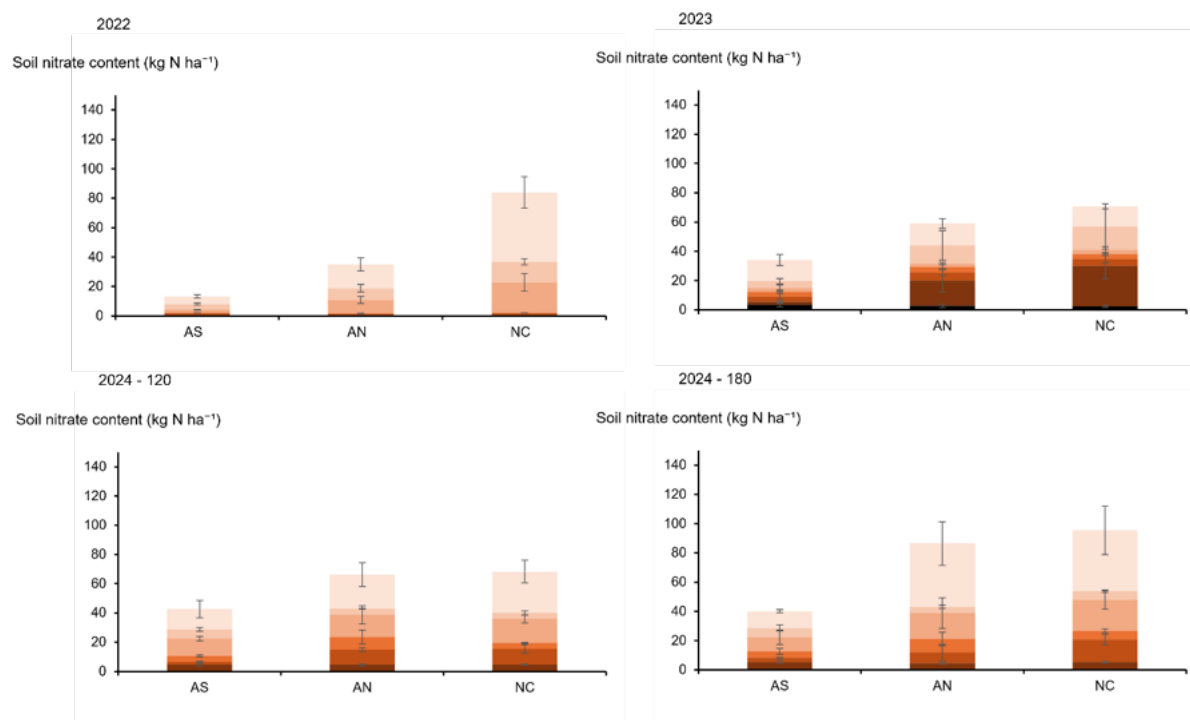


Figure 5 : Taux de nitrate cumulé (kg.N.ha^{-1}) mesuré au cours des 3 années d'essais. A, en 2022 avec un apport de 180 unités d'azote. B, en 2022 avec un apport de 120 unités d'azote. En 2024 avec un apport de C, 120 unités et D, 180 unités d'azote. AS : Ammonium stabilisé ; AN : Ammonium-nitrate ; NC : Nitrate.

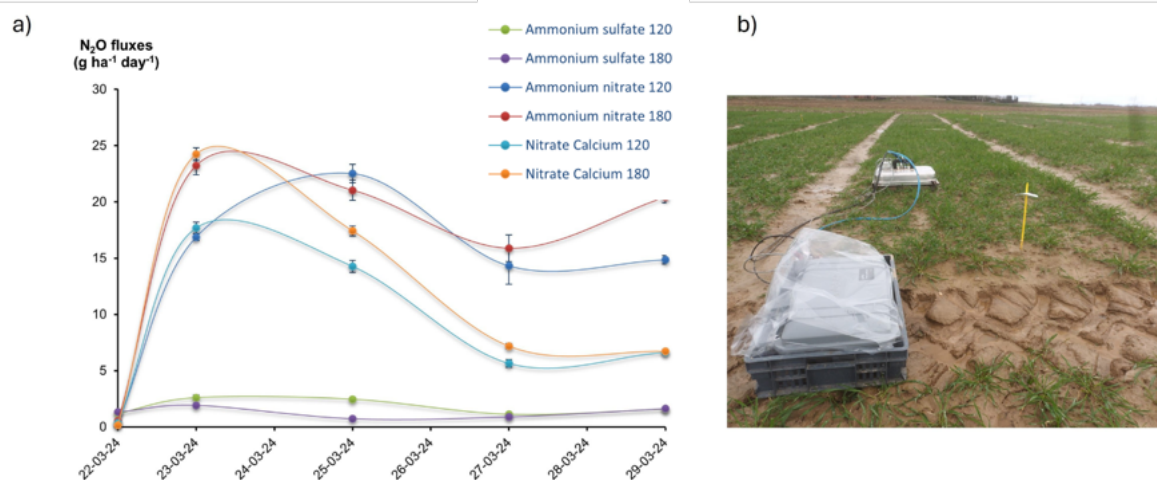


Figure 6 : Mesure du taux de protoxyde d'azote au cours de l'essai en 2024. A, Taux de protoxyde d'azote ($\text{g.ha}^{-1}.\text{jour}^{-1}$) sur une semaine. B, Photographie du dispositif de mesure en champ.

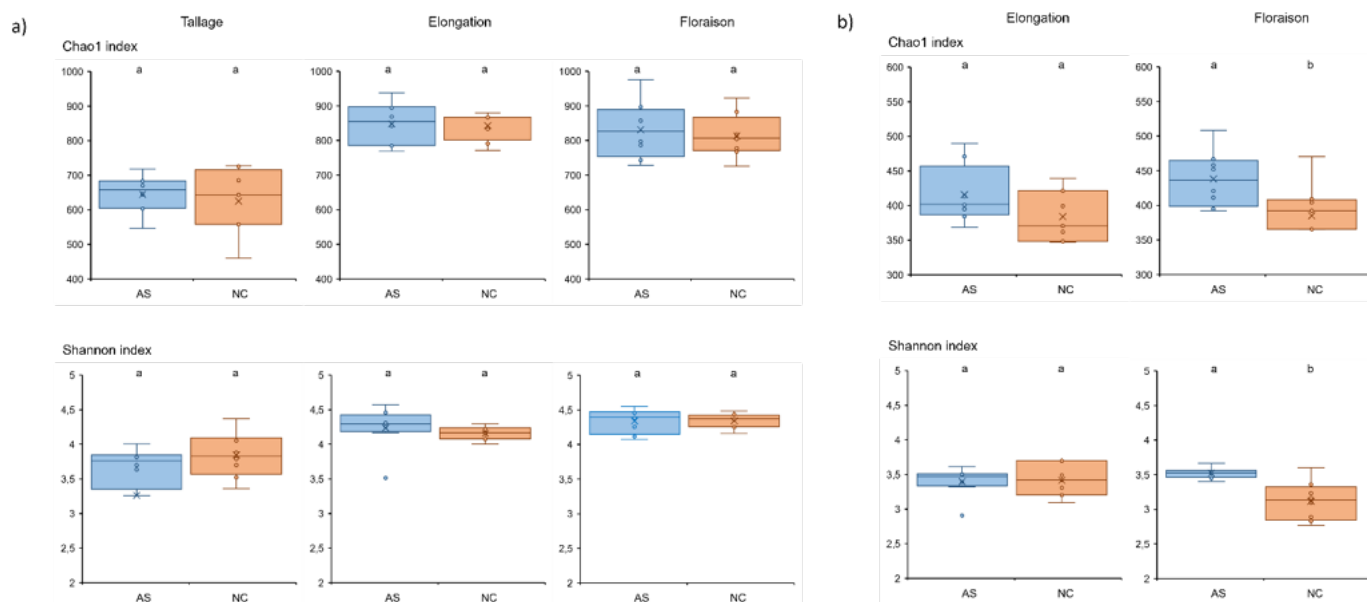


Figure 7 : Diversité (Chao1 index) et richesse (Shannon index) des communautés fongiques du sol et associées aux racines, à différentes étapes de la croissance du froment au cours de la saison intermédiaire (2023). A, Communautés fongiques du sol. B, Communautés fongiques associées aux racines. AS : Ammonium stabilisé ; NC : Nitrate.

WP3 : Identification de variétés et bases génétiques du trait EUA

Le trait EUA (Efficacité d'Utilisation de l'Ammonium) se caractérise par une meilleure croissance du froment sur ammonium que sur d'autres sources d'azote, telles que l'ammonium-nitrate ou le nitrate. Lors de la phase 1 du projet GAIN, quelques génotypes présentant ce trait ont été identifiés. Ce travail a été poursuivi lors de la phase 2, avec cette fois une évaluation ciblée sur des variétés élites du catalogue belge. Les résultats indiquent que seules quelques variétés se révèlent performantes pour le trait EUA. La méthode d'évaluation en hydroponie, utilisée dans cette étude, s'est avérée être un outil rapide et peu coûteux, permettant un premier screening avant une validation en champ.

Par ailleurs, une partie essentielle du WP3 a consisté à disséquer les bases génétiques du trait EUA chez le froment. L'approche transcriptomique adoptée a permis de mettre en évidence :

- (i) les mécanismes moléculaires impliqués dans la réponse adaptative au stress ammonium,
- (ii) les gènes associés à la voie de l'ammonium et des voies hormonales, contribuant à la tolérance,
- (iii) les facteurs de transcription régulant cette réponse adaptative.

Ces avancées ouvrent la voie à l'identification de marqueurs moléculaires pour l'amélioration des variétés de blé sur le trait EUA, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour une meilleure efficacité de l'azote en agriculture.

Rapport synthétique: GAIN (D65-1416)

Gestion des Adventices par Innovations de la Nutrition azotée

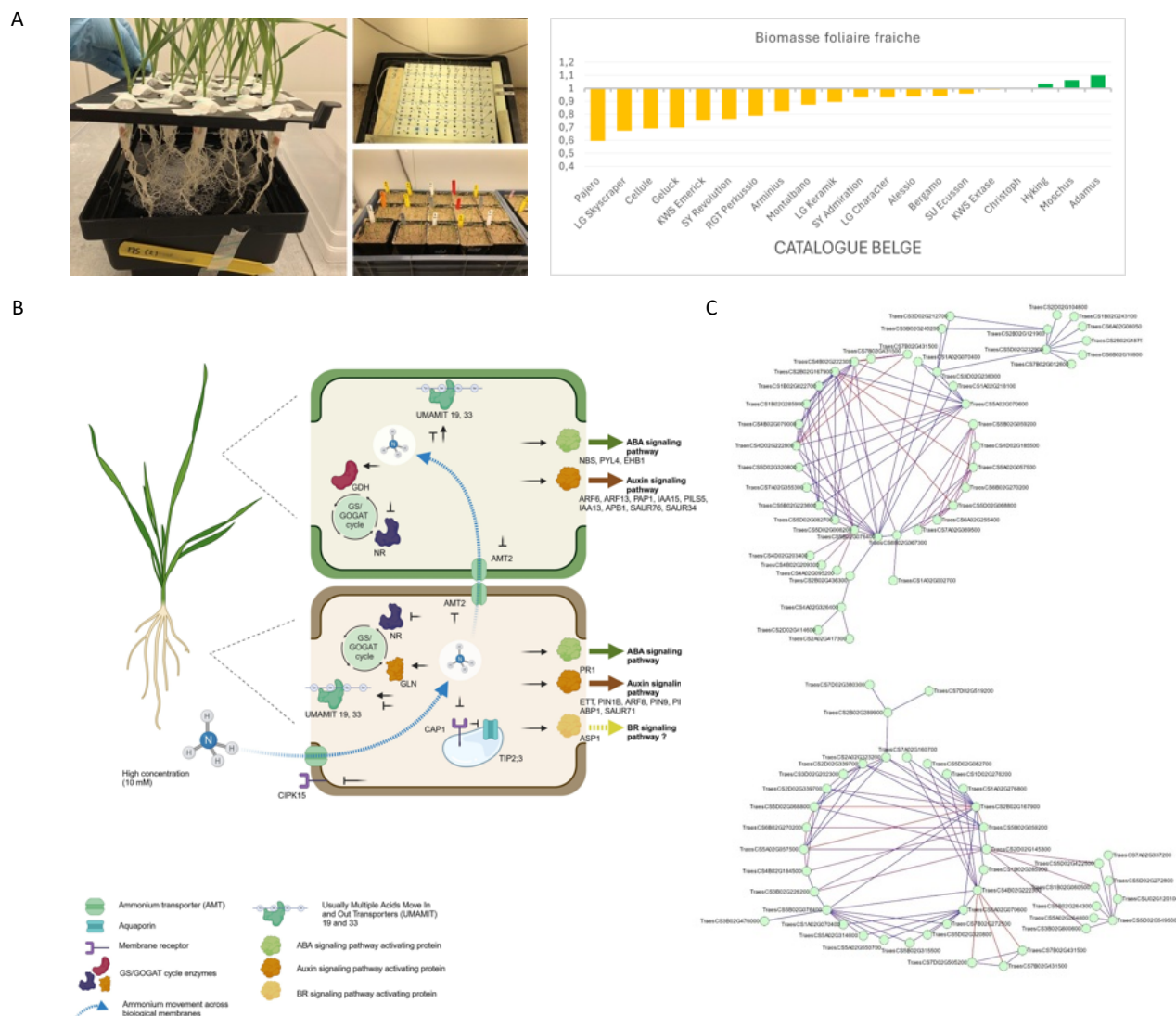


Figure 7 : A, Variétés de froments présents sur le catalogue Belge évaluées sur le trait EUA en hydroponie. B, Mécanismes cellulaires contribuant à la tolérance à l'ammonium par de la voie de l'ammonium et les voies hormonales. C, Ensemble des facteurs de transcriptions régulant la réponse adaptative ainsi que leur interactions, au niveau foliaire (haut) et racinaire (bas).

3. Valorisation du projet GAIN

Publications :

- Malice E, Blum A, Leemans M, Brostaux, Vanderschuren H, Henriët F, Thonar C: **Soil properties and farming practices impact weed flora in winter wheat crops in Wallonia**. Article soumis au journal "Agronomy for Sustainable Development".
- Blum A, Jáuregui I, Muhovski Y, Vanderschuren H: **Transcriptomic Profiling Identifies Determinant Regulation for Ammonium Tolerance in Wheat**. Article soumis au journal " Plant, Cell & Environment ".
- Blum A, Leemans M, Muhovski Y, Henriët F, Thonar C, Vanderschuren H : **Multi-Year Evaluation of Stabilized Ammonium Fertilization Strategy Yield Performance of Bread Wheat Varieties and**

Environmental Footprint Assessment. Article soumis au journal “Agronomy for Sustainable Development”.

- Les nitrates dans les sols belges : **Et si les plantes avaient un rôle plus grand à jouer ?** https://www.gembloux.uliege.be/cms/c_10820934/fr/les-nitrates-dans-les-sols-belges-et-si-les-plantes-avaient-un-role-plus-grand-a-jouer
- Getting to the root of soil nitrogen (Ilan Le Guillou): <https://www.chemistryworld.com/features/getting-to-the-root-of-soil-nitrogen/4013343.article>
- Jáuregui, I., Vega-Mas, I., Delaplace, P., Vanderschuren, H. and Thonar, C. (2023). **An optimized hydroponic pipeline for large-scale identification of wheat genotypes with resilient biological nitrification.** New Phytol. <https://doi.org/10.1111/nph.18807>

Publications en cours de rédaction :

- **Synthetic and biological nitrification inhibitors to efficiently restrain nitrifiers and N₂O emission from organic fertilizers.** Projet d'article à soumettre dans le journal « Soil Biology and Biochemistry »

Symposium :

- Gestions innovantes de l'azote et des adventices – **Jeudi 23 janvier 2025 (Gembloux Agro-Bio Tech)**



4. Perspectives et futures recherches

Au-delà des pratiques agronomiques, la génétique et le type d'azote constituent des leviers prometteurs pour limiter le développement des adventices. L'utilisation d'ammonium stabilisé en combinaison avec des variétés préférant cette forme d'azote ne compromet pas les performances agronomiques. Cette approche pourrait ainsi être déployée à une plus grande échelle. La caractérisation du trait EUA dans les collections végétales de froment apparaît comme une piste essentielle pour optimiser l'utilisation et l'efficacité des engrais à base d'ammonium stabilisé. Par ailleurs, l'ammonium stabilisé représente un atout majeur pour réduire l'impact environnemental des fertilisants. La stabilisation des engrais afin de limiter la nitrification offre un fort potentiel pour

Rapport synthétique: GAIN (D65-1416)

Gestion des Adventices par Innovations de la Nutrition azotée

atténuer les effets négatifs de la fertilisation. Une avancée clé dans ce domaine serait l'identification de molécules stabilisantes compatibles avec l'agriculture biologique.

Actuellement, des projets européens coordonnés par l'ULB et l'ULiège GxABT explorent l'utilisation de plantes telles que le sorgho, le plantain et certaines brassicacées, qui ont démontré leur capacité à réduire la nitrification via leur système racinaire et leurs organes foliaires. Jusqu'à présent, l'amélioration des cultures s'est principalement appuyée sur des stratégies de fertilisation favorisant l'absorption et l'assimilation des nitrates. Il devient donc stratégique de caractériser la diversité génétique des plantes capables d'absorber l'ammonium afin d'évaluer le potentiel d'une nutrition axée sur cette source d'azote, notamment pour des cultures comme la betterave, le maïs, l'orge ou la pomme de terre.

Personnes de contact pour le projet GAIN :

Hervé Vanderschuren : herve.vanderschuren@uliege.be

Cécile Thonar: cecile.thonar@uliege.be / cecile.thonar@ulb.be

François Henriët: f.henriet@cra.wallonie.be

Adrien Blum : adrien.blum@uliege.be