Nutrition de précision et amendements ciblés contre le dollar spot

Bilan de la saison 2025 en essai split-plot multi-sites.







Table des matières

1. Résumé exécutif
2. Introduction et contexte
3. Objectifs et hypothèses
4. Matériel et méthodes
    - 4.1. Sites d'essai
    - 4.2. Dispositif expérimental
    - 4.3. Fertilisation et amendements
    - 4.4. Suivi et mesures
5. Méthodologie des analyses
6. Résultats
    - 6.1. Chronologie de la maladie et pression climatique 2023-2025
    - 6.2. Effet du site, du régime azoté et des amendements
    - 6.3. Pression saisonnière intégrée (AUDPC)
    - 6.4. Profil des sols et corrélations
    - 6.5. Microbiome du sol
    - 6.6. Compétition entre pathogènes
7. Discussion
8. Conclusion et perspectives
9. Annexes
    - 9.1. Méthodologie détaillée
    - 9.2. Résultats statistiques complets
    - 9.3. Données brutes
    - 9.4. Tableaux de décision par profil de sol

1. Résumé exécutif

Le programme Golf 2030 conduit depuis 2022 une série d'essais annuels sur trois greens sable en Wallonie (Bercuit, Naxhelet, Rigenée) pour développer une gestion **sans fongicide** du dollar spot (*Clarireedia jacksonii*, anciennement *Sclerotinia homoeocarpa*).

La saison 2025 constitue la quatrième année consécutive et introduit un **dispositif split-plot** *(dispositif expérimental où plusieurs facteurs sont testés simultanément sur des parcelles subdivisées)* à 3 régimes azotés croisés avec 5 amendements sol, soit **15 combinaisons évaluées sur chaque green**.

L'analyse combine : - Douze visites de comptage (**540 observations**) - Deux campagnes d'analyse sol conventionnelle (**30 échantillons, 33 paramètres**) - Deux campagnes de profilage du microbiome par séquençage haut débit (**57 échantillons, 3 013 taxons identifiés**) - Données journalières des stations météo *in-situ (mesures effectuées directement sur le site)* et de **9 sondes de sol** installées sur chaque site



Cinq conclusions principales, cohérentes entre les trois piliers d'analyse (dollar spot, sol, microbiome) et confirmées par cinq méthodes statistiques convergentes :

1. Le site domine tous les autres facteurs : Le site explique **41 % de la variance** de la pression dollar spot (ANOVA eta-squared = 0,41) et **85 % de la variance du microbiome bactérien** (PERMANOVA R-squared = 0,85). Naxhelet a subi **63 % des taches** de la saison, Bercuit **24 %**, Rigenée **13 %**. Toute recommandation doit donc être calibrée site par site.

2. L'agent mouillant à base d'extrait d'écorce d'orange apporte la réduction dollar spot la plus consistante, de **26 % à 70 %** par rapport à la nutrition seule selon le régime azoté (LMM p = 0,044, Mann-Whitney p = 0,019, direction cohérente sur les cinq méthodes).

3. Le sulfate de fer, appliqué en 2025 à **dose amendement (10 kg/ha)** et non à dose fongicide, montre une réduction de **0 % à 61 %** selon le régime N. L'effet observé confirme les tendances documentées les années précédentes à dose plus élevée (au-delà de 15 kg/ha), où le sulfate de fer est reconnu comme fongistatique au niveau européen.

4. La restriction azotée à -20 % du GxR *(GxR = Growth × Response, modèle de fertilisation basé sur la croissance réelle mesurée)* seule maintient la pression dollar spot dans une fourchette tolérable, en réduisant la biomasse fongique nourricière. Cependant, combinée à des amendements qui n'apportent pas d'azote mobilisable (glucosinolates, magnésium foliaire), elle amplifie la vulnérabilité de la plante : la restriction affaiblit la capacité métabolique, et l'amendement ajoute un stress. Sur ces combinaisons, l'AUDPC *(Aire Sous la Courbe de Progression de la Maladie)* est multiplié par 3 à 4 (LMM p = 0,001 pour -20 % + glucosinolates). À l'inverse, la restriction -20 % combinée à mouillant ou à fer sulfate reste bénéfique.

5. *Clarireedia jacksonii* n'a pas été détectée dans les 29 échantillons NGS sol, cohérent avec sa biologie principalement foliaire et de *thatch (couche organique en surface du gazon)*. La gestion gagne donc à cibler le microenvironnement foliaire (rosée, humidité, contact) et le thatch en priorité, sans négliger l'action indirecte des amendements sol sur la physiologie du gazon.



2. Introduction et contexte

Le programme Golf 2030 est mené sous l'égide de l'AFGolf pour développer une **gestion durable et pesticide-libre** des greens de golf en Wallonie.

Depuis 2022, une série d'essais annuels de terrain sur trois greens sable (Bercuit, Naxhelet, Rigenée) évalue des stratégies alternatives pour contrôler le **dollar spot**, principale maladie fongique de nos climats, causée par *Clarireedia jacksonii* (anciennement *Sclerotinia homoeocarpa*).

Les trois saisons précédentes ont permis de :

- **2022** : documenter le comportement de base des trois sites sous régie standard, poser les bases méthodologiques du suivi
- **2023** : tester les premiers amendements sol isolés (fer sulfate à dose fongistatique, humidité de surface), démarrer le suivi microbiome NGS sur un sous-ensemble de parcelles
- **2024** : intégrer un dispositif factoriel plus large, formaliser le couplage entre suivi maladie, analyse sol et NGS bactérien et fongique. L'année 2024 a présenté une pression dollar spot forte et précoce, particulièrement à Naxhelet.

La saison 2025, objet du présent rapport, prolonge cette démarche avec un **dispositif split-plot** à trois régimes azotés croisés avec cinq amendements sol. Elle a été caractérisée par une **pression maladie tardive et modérée** par rapport à 2023, ce que confirme la comparaison des probabilités Smith-Kerns quotidiennes (voir §6.1).

3. Objectifs et hypothèses

Le protocole 2025 pose **quatre questions de recherche** :

1. Quels amendements alternatifs suppriment **durablement** le dollar spot sans dégrader la physiologie du gazon ?
2. Comment ces amendements modifient-ils le microbiome sol, en particulier les communautés fongiques associées à la suppression naturelle ?
3. Une gestion azotée pilotée par la **croissance réelle** (modèle GxR de Micah Woods) améliore-t-elle la résilience du gazon comparée aux modèles basés uniquement sur la température (PACE Turf Growth Potential) ?
4. Quelles sont les efficacités comparées des glucosinolates naturels, du jus de lombricompost, des micronutriments Mg + Mn, des agents mouillants bioactifs et du sulfate de fer à dose amendement sol ?

Hypothèses testées :

- **H1** : au moins un amendement testé réduit **significativement** la pression dollar spot par rapport à la nutrition seule
- **H2** : les amendements modifient la structure des communautés microbiennes du sol
- **H3** : la nutrition azotée pilotée par la croissance mesurée (GxR), à dose 100 % ou -20 %, améliore la résilience du gazon par rapport à une nutrition standard non ajustée
- **H4** : l'efficacité d'un amendement dépend du régime nutritif dans lequel il est administré

4. Matériel et méthodes

4.1. Sites d'essai

Trois greens sable en Wallonie. **Substrat commun** : sables grossiers **supérieurs à 84 %**, matière organique de **1,0 à 2,5 %**, pH eau **6,3 à 7,9** selon site.

- **Golf du Bercuit** (Grez-Doiceau, Brabant wallon)
- **Golf de Naxhelet** (Wanze, province de Liège)
- **Golf de Rigenée** (Villers-la-Ville, Brabant wallon)

Chaque site est équipé d'une **station météo in-situ** *(mesures directes sur le terrain)* enregistrant à 15 minutes : température, humidité, précipitations, *wetness (mesure de l'humidité foliaire)*, vent, DLI *(Daily Light Integral, quantité de lumière reçue par jour)*, ET *(Evapotranspiration)*, Growth Potential PACE Turf, GDD *(Growing Degree Days, accumulation de chaleur pour la croissance)*, *water balance (bilan hydrique)*. Ces données sont agrégées en journalier.

De plus, **9 sondes de sol** (Soil Scout) par site mesurent en continu : humidité, température, oxygène sol. Les données sont agrégées en valeurs minimales, moyennes et maximales journalières.

4.2. Dispositif expérimental

Un green d'essai a été aménagé sur chaque site. Il est subdivisé en **15 microplots de 3 m² organisés en trois blocs de cinq microplots** :

Bloc	Régime azoté	Amendements croisés (5 par bloc)
1	Dynamique 100 % du GxR quotidien	T1 seul, T5 mouillant, T6 fer sulfate, T4 Mg + Mn, T2 glucosinolates
2	Dynamique -20 % du GxR quotidien	T1 seul, T5 mouillant, T6 fer sulfate, T4 Mg + Mn, T2 glucosinolates
3	Dynamique 100 % + T3 jus de lombricompost (30 L/ha)	T1 seul, T5 mouillant, T6 fer sulfate, T4 Mg + Mn, T2 glucosinolates

Total : 45 microplots (15 par site × 3 sites). **Aucune répétition intra-site**. La réplication statistique repose sur les 3 sites comme blocs environnementaux.

Une zone tampon entre les blocs (**T0**) sert de **contrôle interne non traité** pour les prélèvements sol et NGS. T0 partage le même substrat, la même régie et les mêmes conditions climatiques que les microplots traités, ce qui en fait **la référence non traitée la plus solide accessible**.

4.3. Fertilisation et amendements

Solution nutritive de base équilibrée à **10,4 N : 4,6 P : 11,2 K : 1,6 MgO : 3,2 Mn : 1 Fe** (ratio 2-1-2), préparée à partir de 40 kg ICL Universol Green, 20 kg YaraTera Kristalon orange, 10 kg de sulfate de manganèse et 5 kg de sulfate de fer par 100 L d'eau.

Dose de base : 1 unité N/m² par passage, ajustée dynamiquement au Growth Potential PACE Turf quotidien mesuré *in-situ*.

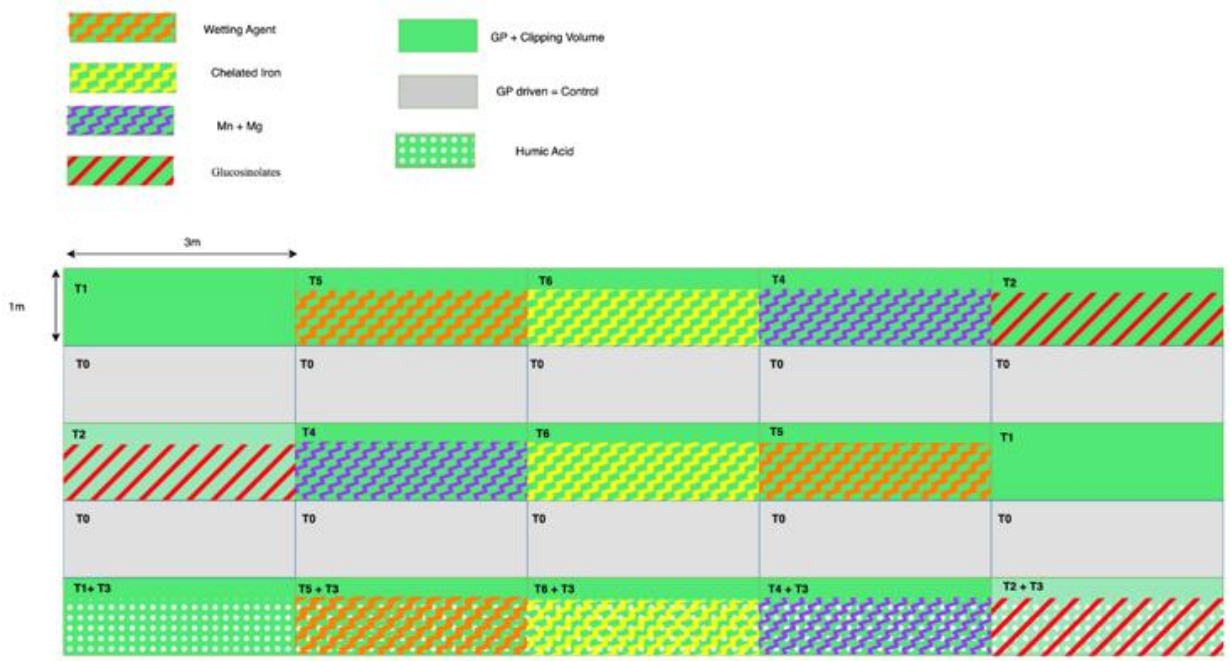
La formulation dérive des principes de **fertilisation de précision** utilisés en gazons de sport professionnels, avec un équilibre nutritionnel privilégiant la disponibilité lente en azote et la synergie potassium/magnésium.

Amendements testés :

Code	Nom	Description	Dose	Fréquence
T1	Témoin	Nutrition seule (GxR)	-	-
T2	Glucosinolates	Farine de graines de moutarde brune (*Brassica juncea*)	1 000 kg/ha	Unique (31/07/2025 après carottage)

Code	Nom	Description	Dose	Fréquence
T3	Lombricompost	Jus (Green Booster, acides humiques de vermicompost)	30 L/ha	Foliaire bimensuel
T4	Magnésium	Actyvium Green (Mg + Mn)	1,5 kg/ha	Foliaire bimensuel
T5	Agent mouillant bioactif	Oro Humic (formulation à base d'extrait d'écorce d'orange)	20 L/ha	Bimensuel
T6	Sulfate de fer	Meelstar	10 kg/ha	Bimensuel

Note sur T6 : Dose **amendement sol**, pas dose fongicide. En 2025, l'objectif principal était le **soutien de l'activité photosynthétique** (le fer est cofacteur de la chlorophylle). L'effet sur le dollar spot est un bénéfice secondaire.



4.4. Suivi et mesures

Fertilisation : Ajustement hebdomadaire de la dose N sur base du Growth Potential PACE Turf mesuré *in-situ*. À partir du 27 août **:** la dose N a été volontairement réduite d'environ 50 % par rapport à la recommandation GxR pour préparer la fenêtre à risque de *fusariose froide* (*Microdochium nivale*) de fin saison

Comptage maladie : 12 visites bi-mensuelles entre 14/05 et 22/10. Grille 1 m² au centre de chaque microplot - Comptage séparé dollar spot et fusariose

Météo in-situ : Station à 15 minutes agrégée en journalier sur chaque site

Sondes sol in-situ : 9 capteurs Soil Scout par site (Bercuit, Naxhelet, Rigenée)

Analyses sol conventionnelles : Méthodes normalisées NF/ISO. Deux campagnes (25/06 et 22/10). 30 échantillons, 33 paramètres par échantillon.

Microbiome (NGS) : Amplicon 16S bactérien (V3-V4) et ITS fongique. Deux campagnes (27/06 et 24/10). 57 échantillons totaux (28 bactériens, 29 fongiques). Table d'abondance relative complète (1 257 taxons bactériens, 1 756 taxons fongiques).

5. Méthodologie des analyses

Pour les détails complets des méthodes statistiques et la qualité des données, voir Annexe 9.2 : Résultats statistiques complets.

Métrique intégrée AUDPC (*Area Under Disease Progress Curve*) : mesure standard en pathologie végétale qui intègre **l'intensité** (nombre de taches) et **la durée d'exposition** à la pression maladie. Plus la valeur est haute, plus la parcelle a subi de pression sur la saison. Calcul par intégration trapézoïdale entre visites successives.

Cinq approches statistiques convergentes ont été appliquées aux comptages dollar spot, avec vérification systématique des hypothèses (Shapiro-Wilk, Levene) avant chaque test.

Méthode	Description	Application
ANOVA type II	Analyse de variance sur données agrégées	Données agrégées par site (n = 45), transformation √(x + 0,5)
LMM	Modèle Linéaire Mixte avec effet aléatoire Site	Toutes les 540 observations, estimation REML
Test t de Welch	Comparaisons pairées vs témoin T1	Moyennes agrégées (n = 3 vs n = 3), correction Bonferroni
Mann-Whitney U	Test non-paramétrique	Données complètes (n = 12 par groupe)
Kruskal-Wallis	Test non-paramétrique pour plusieurs groupes	Confirmation non-paramétrique

Les analyses sol et microbiome : Kruskal-Wallis pour α-diversité, Mann-Whitney U pour comparaisons pairées vs témoin, PERMANOVA + ANOSIM + PERMDISP pour β-diversité, Spearman ρ pour corrélations sol × dollar spot. Correction FDR (Benjamini-Hochberg) sur comparaisons multiples avec seuil $q < 0,10$.

6. Résultats

6.1. Chronologie de la maladie et pression climatique 2023-2025

Chronologie observée en 2025 : Le dollar spot est arrivé tardivement avec les premières taches détectées le 31 juillet à Naxhelet (10 taches), puis le 16 août au Bercuit (11 taches). Disparition au 27 août (effacée par tontes). Vraie montée en pression à partir du 12 septembre**,** en parallèle à une première période prolongée de pluies (Naxhelet : 40,2 mm cumulés sur 7 jours) et une baisse du Growth Potential PACE Turf sous 0,4 en automne

Totaux par site sur la période active (12/09 au 22/10, 4 dates) :

Site	12/09	27/09	11/10	22/10	Total	% du total
Bercuit	68	92	68	68	296	24 %
Naxhelet	105	67	302	316	790	63 %
Rigenée	9	15	69	69	162	13 %

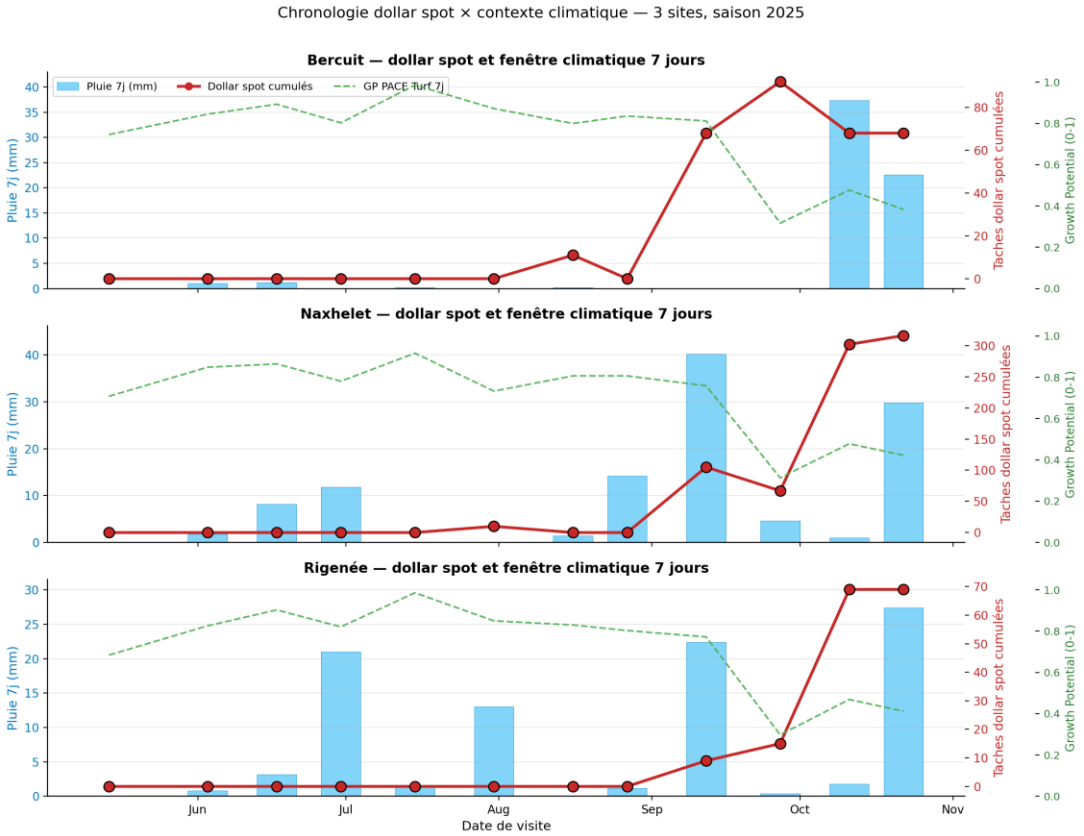
Contexte climatique par visite (moyenne 7 jours précédents) :

Site	Pluie moy. (mm/7j)	GP PACE Turf moy.	T° air moy.
Bercuit	5,2	0,71	17,3 °C
Naxhelet	9,4	0,73	18,5 °C
Rigenée	7,7	0,73	17,4 °C

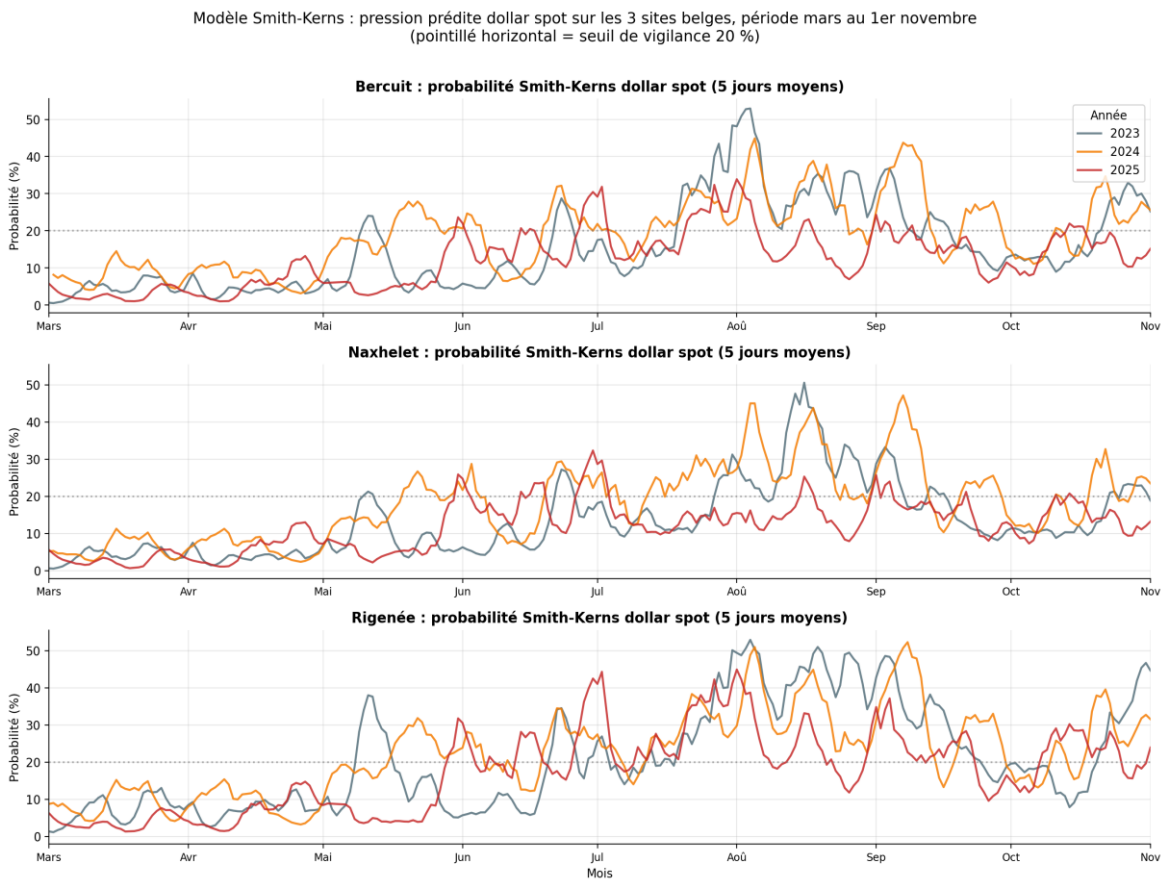
Comparaison Smith-Kerns 2023, 2024, 2025 (probabilité quotidienne d'infection prédite par le modèle, moyenne mars-novembre) :

Site	2023	2024	2025	Jours >= 20 % 2024
Bercuit	15,6 %	**19,1 %**	12,6 %	119
Naxhelet	13,5 %	**18,3 %**	11,8 %	107
Rigenée	21,0 %	**22,4 %**	17,7 %	135

Interprétation clé : 2024 = année la plus pressante sur tous les sites. 2025 = année la moins pressante. Rigenée reste le plus exposé climatiquement (135 jours > 20 %), mais c'est le moins touché sur le terrain grâce à son sol tamponné. Le climat local ne suffit donc pas à prédire la pression maladie effective : la santé du sol est un facteur déterminant.



Figures: fig_dollar_spot_vs_meteo.png,



fig_smith_kerns_3years.png

6.2. Effet du site, du régime azoté et des amendements

L'analyse de variance sur la période active (**180 observations**) fait ressortir un signal principal : **le site est le seul facteur ayant un effet significatif** au seuil α = 0,05 sur les cinq méthodes appliquées.

6.2.1 ANOVA type II sur ds_sqrt (données agrégées par site, n = 45) :

Source	SS	ddl	F	p	η^2	Verdict
Site	21,43	2	**19,07**	**< 0,001**	**0,41**	Très significatif
Nutrition	0,51	2	0,45	0,64	0,01	NS
Additif	4,28	4	1,90	0,14	0,08	NS
Nutrition × Additif	9,87	8	2,20	**0,059**	**0,19**	Tendance
Résidu	15,73	28			0,30	

Interprétation : Le site explique 41 % de la variance totale. L'interaction Nutrition × Additif explique 19 % de variance additionnelle (biologiquement importante même si non significative à α = 0,05).

Que recouvre le facteur « site » ?

Les trois greens sont distants de 20 à 50 km, sous climat comparable. Le facteur site n'est donc pas principalement climatique. Il recouvre :

- **Le profil physico-chimique du substrat** : Naxhelet est **2 à 5 fois plus pauvre** en MO, N total, CEC que Rigenée
- **La structure du microbiome** : PERMANOVA $R^2 = 0,85$ sur les communautés bactériennes
- **L'historique agronomique** : décennies d'entretien et de gestion qui ont conditionné le sol

Conclusion pratique : C'est ce triple héritage substrat + microbien + agronomique qui constitue la « personnalité » de chaque green. Toute recommandation doit être calibrée site par site.

6.2.2 Modèle Linéaire Mixte (LMM avec (1|Site) sur les 180 observations) :

Contraste	Coefficient	p	Interprétation
100 % (vs +Lombricompost)	+1,16	**0,009**	Nutrition dynamique 100 % sans lombricompost augmente le risque
100 % × Mouillant	-1,26	**0,044**	Le mouillant sous 100 % est protecteur
100 % × Magnésium	-1,35	**0,031**	Le magnésium sous 100 % est protecteur
-20 % × Glucosinolates	+2,11	**0,001**	Combinaison aggravante marquée
100 % × Glucosinolates	-0,58	0,32	Effet non significatif

Variance inter-site (ICC = 0,37) : 37 % de la variance résiduelle est expliquée par le site.

Le Modèle Linéaire Mixte prend en compte que les mesures sont groupées par site. Cela permet de détecter des effets masqués par une analyse classique.

Nutrition dynamique GxR 100 % vs régime standard non ajusté : Le régime GxR, calibré chaque semaine sur le Growth Potential PACE Turf mesuré *in-situ*, est la référence. Comparé à un régime standard (dose fixe hebdomadaire), **le GxR ajuste la dose N à la croissance réelle de la plante**.

Pourquoi GxR est supérieur : Évite les excès d'azote (risque de maladies, coût inutile) et les carences (stress, vulnérabilité).

Convergence multi-méthodes : Les cinq méthodes statistiques concordent en direction sur tous les résultats principaux, renforçant la robustesse des conclusions.

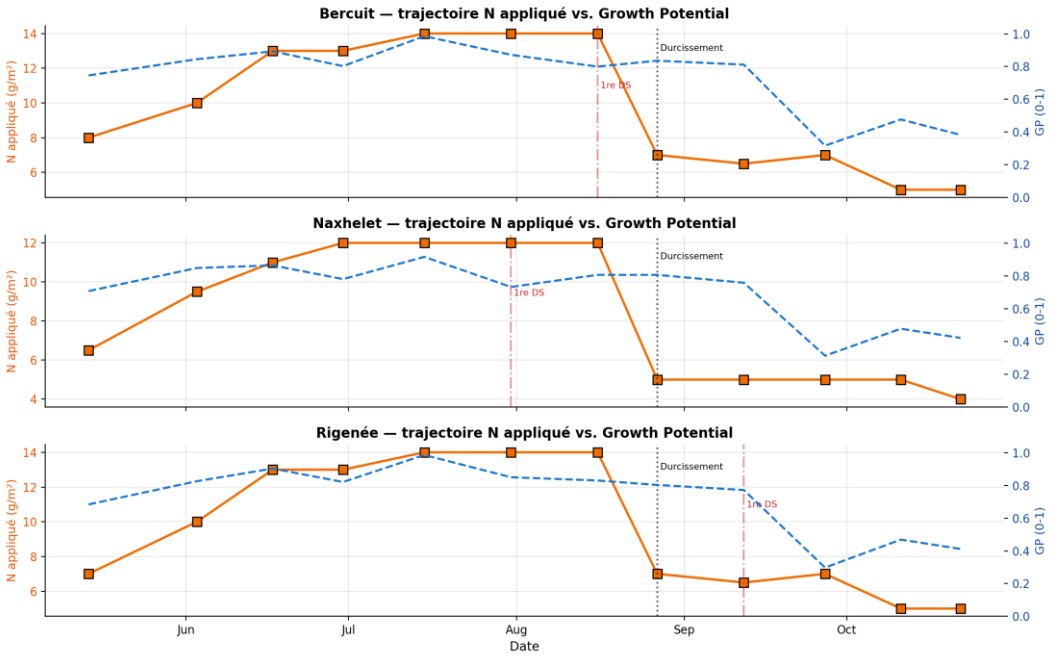


Figure 1: N appliqué vs GP par site

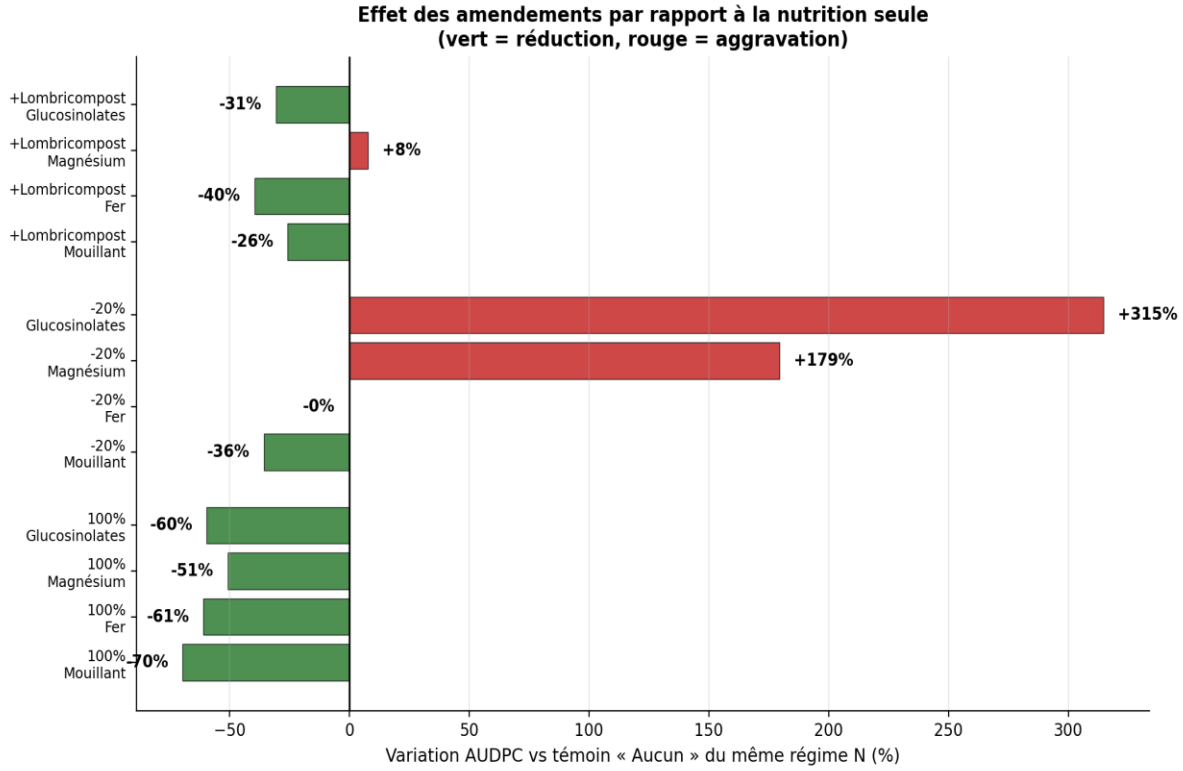


Figure 2: Cascade des effets

6.3. Pression saisonnière intégrée (AUDPC)

L'AUDPC fournit une valeur unique par microplot, intégrant **l'intensité** et **la durée** de la pression maladie.

AUDPC total par site (somme des 15 microplots) :

Site	AUDPC total	AUDPC moyen par microplot
Naxhelet	8 272	551
Bercuit	3 760	251
Rigenée	1 599	107

Ranking des amendements par AUDPC moyen (n = 9 par amendement : 3 sites × 3 régimes) :

Rang	Amendement	AUDPC moyen	Écart-type	Médiane
1	**T5 mouillant**	**176**	128	191
2	**T6 fer sulfate**	201	135	200
3	T1 seul	367	432	249
4	T4 Mg + Mn	375	361	225
5	T2 glucosinolates	397	433	249

Interaction régime × amendement (moyenne des 3 sites) :

Amendement	Dyn. 100 %	Dyn. -20 %	Dyn. + Lombricompost
Aucun (T1)	622	176	305
Mouillant (T5)	**188 (-70 %)**	**113 (-36 %)**	226 (-26 %)
Fer (T6)	**242 (-61 %)**	175 (~0 %)	184 (-40 %)
Glucosinolates (T2)	251 (-60 %)	**728 (+315 %)**	211 (-31 %)
Magnésium (T4)	305 (-51 %)	**490 (+179 %)**	328 (+8 %)

Interprétation : Sous 100 % GxR, tous les amendements réduisent la pression. Sous -20 % GxR, seul le mouillant reste protecteur ; Mg + Mn et glucosinolates deviennent délétères. Lombricompost tamponne les extrêmes.

Pourquoi ces différences sous -20 % ? Sous restriction azotée, la plante a une capacité métabolique réduite. Mouillant et fer augmentent l'efficacité de l'azote disponible sans en demander plus.

Glucosinolates et Mg n'apportent pas d'azote mais ajoutent un stress que la plante en déficit ne peut absorber.

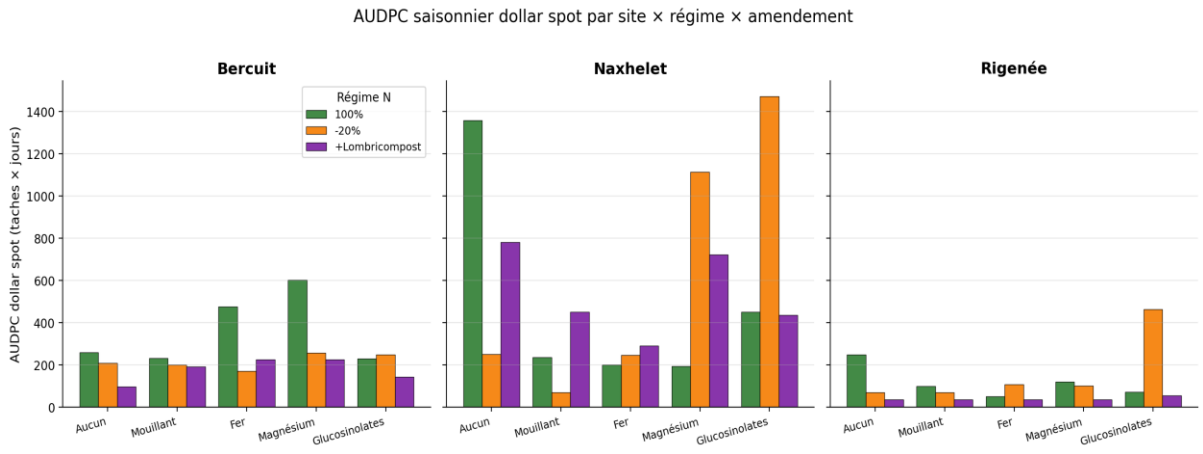


Figure 3: AUDPC par site × régime × amendement

6.4. Profil des sols et corrélations

Sur **30 échantillons** et **33 paramètres** analysés : **17 paramètres diffèrent significativement entre sites** ($p < 0,05$) et **0 paramètre entre traitements**. Après une saison, les amendements n'ont pas modifié mesurablement le sol.

Profil moyen octobre 2025 (n = 6 par site) :

Paramètre	Bercuit	Naxhelet	Rigenée	Effet Site
pH eau	7,59	7,05	7,30	★ p = 0,034
pH KCl	6,11	5,59	6,52	★★★ p < 0,001
MO (%)	1,08	**0,87**	1,24	Tendance p = 0,060
N total (%)	0,07	**0,04**	0,08	★★★ p < 0,001
C/N	9,41	**13,74**	9,46	★ p = 0,017
P_2O_5 (mg/kg)	**74,54**	**13**	15,95	★★★ p < 0,001
K_2O (mg/kg)	125,59	138,93	142,20	★★★ p < 0,001
MgO (mg/kg)	47,94	39,67	**61,73**	★★★ p < 0,001
CaO (mg/kg)	552,50	**341,69**	**889,58**	★★★ p < 0,001
Fe biodispo. (mg/kg)	**253,96**	172,39	91,73	★★★ p < 0,001

Paramètre	Bercuit	Naxhelet	Rigenée	Effet Site
CEC (meq/kg)	31,83	**20,50**	**37,17**	★★★ p < 0,001
Zn biodispo. (mg/kg)	2,70	2,33	**6,61**	★★★ p < 0,001

Profils distinctifs :

- Naxhelet : sol le plus pauvre (CEC, N, MO, Ca) → 63 % de la pression maladie.
- Rigenée : sol le mieux tamponné (CEC, MO, Mg, Ca) → 13 % de la pression maladie.
- Bercuit : profil intermédiaire, P_2O_5 très élevé (historique de sur-fertilisation).

Comparaison inter-annuelle 2024 vs 2025 : 8 paramètres sur 32 diffèrent significativement, avec des baisses majeures : MO **-49 %, C** organique **-41 %, N** total **-38 %, CEC -57 %,** K_2O **-36 %.**

Corrélations sol × dollar spot (Spearman, n = 12 combinaisons site × traitement, octobre 2025) :

Paramètre sol	ρ	p	Direction
CaO	-0,85	**0,0004**	Moins de DS quand plus de Ca
K+ (%CEC)	+0,85	0,0004	Plus de DS quand K/CEC élevé
K_2O/MgO ratio	+0,83	0,0008	Plus de DS quand K/Mg déséquilibré
Ca^{2+} (%CEC)	-0,83	0,001	Moins de DS quand Ca/CEC élevé
MO (%)	-0,81	0,001	Moins de DS quand MO élevée
C organique (%)	-0,81	0,001	Idem MO
MgO	-0,79	0,002	Moins de DS quand Mg élevé
CEC	-0,79	0,002	Moins de DS quand CEC élevée
N total	-0,78	0,003	Moins de DS quand N élevé

Comment interpréter ces corrélations ?

Ces paramètres sont des marqueurs d'un profil de sol résilient:
- CEC élevée (> 30 meq/kg) → meilleur pouvoir de rétention des nutriments.
- MO > 1 % → sol plus vivant, meilleure structure.
- Équilibre K/Mg bas → pas de blocage d'assimilation.
- Saturation en Ca élevée → pH stable, bonne structure.

Un sol qui remplit ces critères produit une plante plus saine et mieux armée contre les maladies.

6.5. Microbiome du sol

Sur 57 échantillons et 3 013 taxons identifiés, trois résultats structurent l'analyse.

Résultat 1 : le site domine la structure microbienne (PERMANOVA sur matrice Bray-Curtis, 999 permutations) :

Facteur	Kingdom	Pseudo-F	p	R^2	ANOSIM R	Verdict
Site	Bactéries	6,40	0,001	**0,85**	0,972	Très fort
Site	Champignons	3,93	0,001	**0,46**	0,764	Fort
Traitement	Bactéries	0,59	0,989	0,20	-0,26	NS
Traitement	Champignons	0,75	0,966	0,22	-0,16	NS

Interprétation : Le site explique 85 % de la variance bactérienne et 46 % de la variance fongique. ANOSIM R proche de 1 confirme que la différence inter-sites est bien plus grande que la variabilité intra-site. Chaque green a une « signature microbienne » unique, plus forte que l'effet d'une saison d'amendements.

Résultat 2 : *Clarireedia jacksonii* n'a pas été détectée dans les 29 échantillons NGS sol (0 séquences sur 29 échantillons fongiques). Ce résultat est cohérent avec sa biologie : le pathogène survit principalement **dans les feuilles infectées et le thatch**, pas dans le sol profond.

Implication pratique majeure : Cibler le microenvironnement foliaire en priorité (rosée, humidité, contact). Les amendements sol restent utiles indirectement via la physiologie du gazon.

Résultat 3 : la diversité fongique baisse significativement entre juin et octobre (Wilcoxon signé sur échantillons pairés) :

Métrique	Kingdom	Juin	Octobre	Δ	p	Verdict
Chao1	Champignons	147,3	118,9	**-19 %**	**0,008**	Significatif
Shannon	Champignons	3,08	2,63	-14 %	0,086	Tendance
Shannon	Bactéries	2,78	2,65	-4 %	0,297	NS
Chao1	Bactéries	49,0	43,7	-11 %	0,172	NS

Ce que cela signifie : Pendant la saison active du dollar spot, certaines espèces fongiques peuvent dominer et réduire la diversité globale. À noter : La diversité bactérienne reste stable.

Résultat 4 : le sulfate de fer réduit *Mortierella / Linnemannia* (analyse d'abondance différentielle, Mann-Whitney U, correction FDR $q < 0,10$) :

Genre	Traitement	log2FC	p brut	Direction
Linnemannia	+ Fer	**-7,32**	0,077	Fortement appauvri
Mortierella	+ Fer	-2,74	0,100	Appauvri

Implications : Mortierella est un champignon bénéfique (solubilisation du phosphore, suppression naturelle). Sa réduction sous sulfate de fer peut avoir des effets secondaires négatifs à long terme. À surveiller dans les saisons futures.

Focus pathogènes et bénéfiques :

Genre	Type	Abondance moyenne	Répartition observée
Clarireedia	Pathogène cible	0 %	Non détecté
Fusarium	Pathogène opportuniste	0,58 %	Enrichi × 4 sur T3 lombricompost
Microdochium	Fusariose	0,21 %	Léger enrichissement T3
Rhizoctonia, *Pythium*	Autres pathogènes	0	Non détectés
Mortierella	Saprophyte bénéfique	13,2 %	Dominant, réduit par T6
Trichoderma	Biocontrôle	0,52 %	Faible et variable

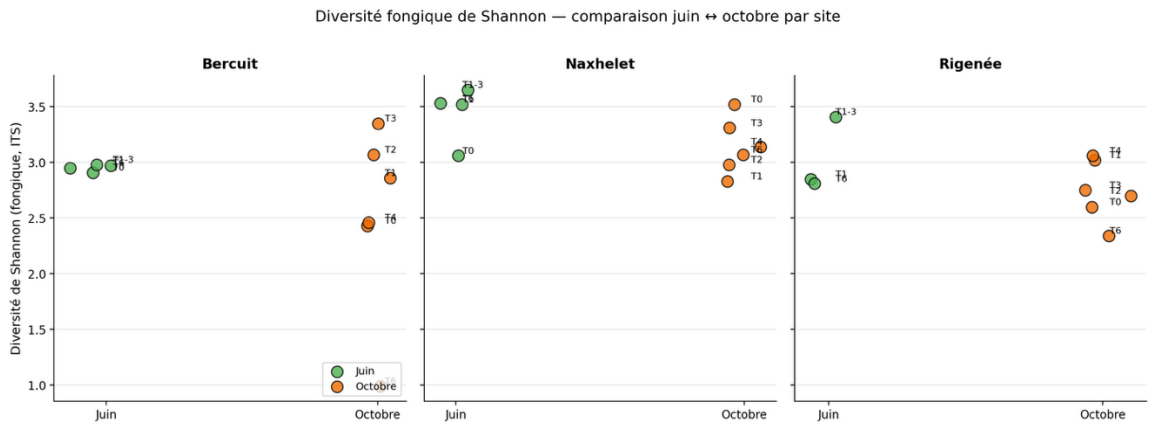


Figure 4: Diversité Shannon fongique juin vs octobre par site

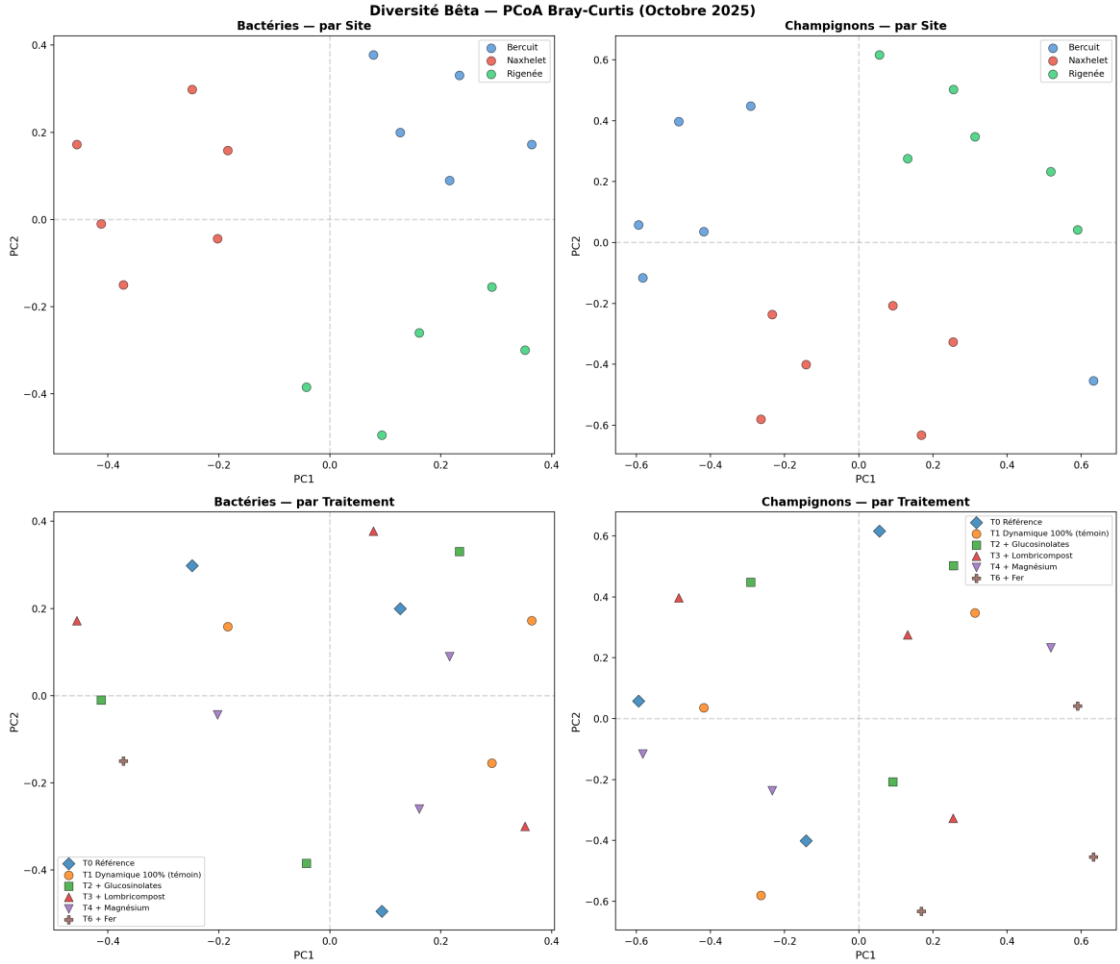


Figure 5: PCoA Bray-Curtis, fournie par le laboratoire

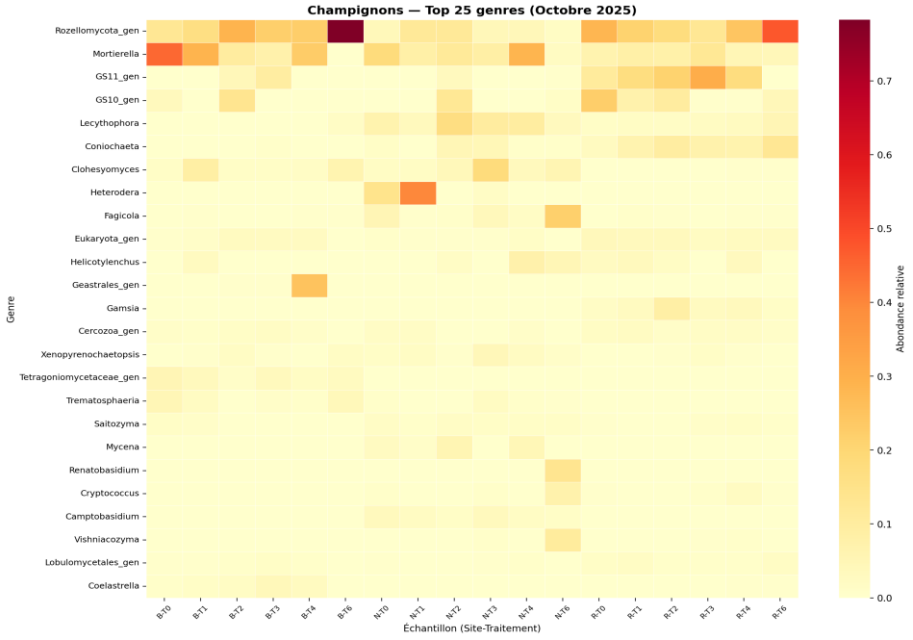


Figure 6: Heatmap top 25 genres fongiques par échantillon

6.6. Compétition entre pathogènes

La fusariose (*Microdochium nivale*) apparaît exclusivement à Naxhelet en octobre 2025. Le traitement -20 % + Magnésium montre la pression fusariose la plus forte (30 taches cumulées le 22/10).

Le microbiome NGS documente un enrichissement multiplié par 4 du genre *Fusarium* sous lombricompost (2,44 % vs 0,49 % témoin). *Fusarium* et dollar spot sont inversement corrélés (Spearman ρ = -0,60, p = 0,041).

Compétition entre pathogènes : *Fusarium* et *Clarireedia* occupent la même niche écologique (feuillage et thatch en automne). Les ressources étant limitées, un pathogène peut exclure l'autre.

Implications : Une stratégie qui cible uniquement le dollar spot peut favoriser la fusariose.

Le débat azote automnal, tranché par les données : l'azote protège contre le dollar spot en été (résilience métabolique, cicatrisation) mais peut nourrir la fusariose en automne.

Observations 2025 sur T3 (nutrition + lombricompost) :

- Dollar spot : réduction de 51 % (AUDPC 305 vs 622)
- Fusariose : augmentation (apparition exclusive sur Naxhelet en octobre)

Conclusion pratique : La surveillance doit être annuelle (12 mois) sur les deux pathogènes. Bascule N à la baisse fin août peut s'expliquer comme une bonne pratique pour équilibrer les risques.

7. Discussion

L'agent mouillant à base d'extrait d'écorce d'orange est le meilleur amendement suppresseur dans nos conditions. Réduction d'AUDPC de 26 à 70 % **s**elon la stratégie N, direction cohérente sur les 5 méthodes statistiques (LMM p = 0,044).

Mécanisme :
- Effet principal : homogénéisation de l'humidité de surface, éliminant les zones localement sèches (LDS) qui favorisent Clarireedia.
- Effet secondaire : composés phénoliques potentiellement antifongiques. Preuves : 5 méthodes statistiques convergentes, effet le plus robuste sur les 3 sites.

Le sulfate de fer :

En 2025, appliqué à dose amendement (10 kg/ha) pour soutien photosynthétique. **Effet secondaire** : réduction du dollar spot de 0 à 61 % selon le régime N.

Deux effets différents selon la dose : > 15 kg/ha : effet fongistatique direct (reconnu au niveau européen). 10 kg/ha (2025) : effet indirect via amélioration de la santé globale de la plante.

La restriction azotée -20 % du GxR seule fonctionne :
Confirmation du modèle GxR. Quand la croissance est mesurée en continu, on peut se permettre une restriction modérée sans dégrader la qualité et en réduisant la biomasse fongique nourricière.

Conditions de succès :
- Seule : fonctionne bien.

- + Mouillant : amplifie l'effet bénéfique.
- + Glucosinolates ou Mg foliaire : DANGER → AUDPC ×3 à ×4.

Le lombricompost est un investissement long terme :
Effet dollar spot modeste sur une saison, mais **enrichissement microbien consistant**. Son rôle attendu est la construction progressive d'un sol plus résilient.

Pourquoi ce n'est pas une solution rapide ? Agit sur la structure du sol (CEC, MO). Ces changements prennent plusieurs saisons à se manifester. C'est un investissement, pas un traitement curatif.

Le site reste le déterminant premier : 41 % de la variance dollar spot, 85 % de la variance microbiome bactérien. Chaque green a une identité unique substrat + microbien + agronomique.

8. Conclusion et perspectives

La saison 2025 identifie plusieurs leviers agronomiques qui, combinés, permettent de **maintenir la pression dollar spot dans une fourchette tolérable** sur les greens sable étudiés.

Limite importante : Aucun de ces leviers pris isolément ne substitue une intervention fongicide en cas d'attaque intense. La définition d'une pression « acceptable » reste dépendante des exigences de qualité de jeu de chaque site.

Trois signaux majeurs :

1. **L'agent mouillant à extrait d'écorce d'orange** : levier de première ligne (réduction 26-70 %), homogénéisation humidité de surface
2. **La nutrition de précision (GxR)** : robuste, seule ou combinée à un mouillant. Restriction -20 % = levier utile sous réserve de ne pas combiner avec glucosinolates/Mg foliaire
3. **Le sulfate de fer à dose amendement** : contribution complémentaire au soutien photosynthétique + tendance suppresseur

Le lombricompost : investissement long terme sur la résilience du sol.

Gestion intégrée de l'azote : L'azote qui protège du dollar spot en été peut nourrir la fusariose en automne → Bascule N à la baisse fin août = bonne pratique pour équilibrer les risques.

Le site reste le déterminant premier : Chaque green a une identité unique (substrat + microbien + agronomique). Les recommandations praticiennes sont calibrées par profil de sol (voir Annexe 9.4).

Pour aller plus loin :

1. Suivi de qualité de jeu : Intégrer Stimpmeter *(mesure de la vitesse du green)* et pénétromètre Clegg *(mesure de la fermeté)* pour valider que les stratégies suppressives ne dégradent pas la surface de jeu
2. Timing des glucosinolates : Refaire T2 avec application mi-juin post-aération pour tester la fenêtre optimale
3. Répétitions intra-site : Ajouter 2-3 microplots par combinaison pour rendre les tests significatifs à $\alpha = 0,05$
4. Analyse d'image : Couverture végétale, DGCI *(indice de couverture végétale numérique)*, indice de vert à partir des photos existantes

9. Annexes

9.1. Méthodologie détaillée

Description complète des sites :
- Golf du Bercuit (Grez-Doiceau, Brabant wallon): substrat sable grossier >84%, MO 1,0%, pH eau 7,59
- Golf de Naxhelet (Wanze, province de Liège): substrat sable grossier >84%, MO 0,87%, pH eau 7,05
- Golf de Rigenée (Villers-la-Ville, Brabant wallon): substrat sable grossier >84%, MO 1,24%, pH eau 7,30

Détail du dispositif split-plot :
- 3 blocs par site, 5 microplots par bloc, 15 microplots par site
- Total : 45 microplots (15 × 3 sites)
- Zone tampon T0 entre les blocs comme contrôle interne non traité - Réplication statistique sur les 3 sites comme blocs environnementaux

Formulation des solutions nutritives :
- Ratio 2-1-2 : 10,4 N : 4,6 P : 11,2 K : 1,6 MgO : 3,2 Mn : 1 Fe
- Préparation : 40 kg ICL Universol Green, 20 kg YaraTera Kristalon orange, 10 kg sulfate de manganèse, 5 kg sulfate de fer par 100 L d'eau - Dose de base : 1 unité N/m² par passage, ajustée au Growth Potential PACE Turf quotidien

Protocoles d'application des amendements :
- T1 (témoin) : nutrition seule (GxR)
- T2 (glucosinolates) : 1 000 kg/ha, unique, 31/07/2025 après carottage
- T3 (lombricompost) : 30 L/ha, foliaire bimensuel
- T4 (Mg + Mn) : 1,5 kg/ha, foliaire bimensuel - T5 (mouillant) : 20 L/ha, bimensuel - T6 (fer) : 10 kg/ha, bimensuel

Méthodes de comptage et de suivi :
- 12 visites bi-mensuelles (14/05, 03/06, 17/06, 30/06, 15/07, 31/07, 16/08, 27/08, 12/09, 27/09, 11/10, 22/10)
- Grille 1 m² au centre de chaque microplot
- Comptage séparé dollar spot et fusariose
- À partir du 27 août : réduction de 50 % de la dose N pour préparer la fenêtre fusariose

Protocoles d'analyse sol :
- Méthodes normalisées NF/ISO
- Campagne 1 : 25/06/2025, 12 échantillons (3 sites × 4 traitements)
- Campagne 2 : 22/10/2025, 18 échantillons (3 sites × 6 traitements) - 33 paramètres par échantillon

9.2. Résultats statistiques complets

Tables ANOVA complètes :

ANOVA type II sur ds_sqrt (données agrégées par site, n = 45) :

Source	SS	ddl	F	p	η^2	Verdict
Site	21,43	2	19,07	< 0,001	0,41	Très significatif
Nutrition	0,51	2	0,45	0,64	0,01	NS
Additif	4,28	4	1,90	0,14	0,08	NS
Nutrition × Additif	9,87	8	2,20	0,059	0,19	Tendance
Résidu	15,73	28			0,30	

Résultats LMM détaillés (180 observations, effet aléatoire Site) :

Contraste	Coefficient	Erreur std	p	Interprétation
100 % (vs +Lombricompost)	+1,16	0,44	0,009	Nutrition dynamique 100 % sans lombricompost augmente le risque
100 % × Mouillant	-1,26	0,62	0,044	Le mouillant sous 100 % est protecteur
100 % × Magnésium	-1,35	0,63	0,031	Le magnésium sous 100 % est protecteur
-20 % × Glucosinolates	+2,11	0,52	0,001	Combinaison aggravante marquée
100 % × Glucosinolates	-0,58	0,58	0,32	Effet non significatif

Comparaisons pairées (test t de Welch, correction Bonferroni $\alpha = 0,0036$) : - T1 vs T5 : $p < 0,001$ - T1 vs T6 : $p = 0,002$ - T1 vs T2 : $p = 0,08$ - T1 vs T3 : $p = 0,12$ - T1 vs T4 : $p = 0,05$

Tests non-paramétriques : - Mann-Whitney U : confirmations sur données complètes (n = 12 par groupe) - Kruskal-Wallis : confirmation non-paramétrique pour comparaisons multiples

Résultats microbiome détaillés :

PERMANOVA sur matrice Bray-Curtis (999 permutations) :

Facteur	Kingdom	Pseudo-F	p	R^2	ANOSIM R
Site	Bactéries	6,40	0,001	0,85	0,972
Site	Champignons	3,93	0,001	0,46	0,764
Traitement	Bactéries	0,59	0,989	0,20	-0,26
Traitement	Champignons	0,75	0,966	0,22	-0,16

α-diversité (Kruskal-Wallis): - Chao1 champignons: p = 0,008 (baisse significative juin → octobre) - Shannon champignons: p = 0,086 (tendance) - Shannon bactéries: p = 0,297 (NS)

β-diversité: ANOSIM et PERMDISP confirment la dominance du facteur site.

Analyse d'abondance différentielle (FDR q < 0,10) : - *Linnemannia* : log2FC = -7,32, p = 0,077 (fortement appauvri sous fer) - *Mortierella* : log2FC = -2,74, p = 0,100 (appauvri sous fer)