
Étude de la flore adventice dans le cadre des rotations innovantes de l'essai EcoFoodSy

Auteur : da Costa Pereira Paixao, Célia

Promoteur(s) : De Clerck, Caroline; Monty, Arnaud

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21397>

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.

**ÉTUDE DE LA FLORE ADVENTICE DANS LE CADRE
DES ROTATIONS INNOVANTES DE L'ESSAI
ECOFOODSYSTEM**

CÉLIA DA COSTA PEREIRA PAIXÃO

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024

CO-PROMOTEURS: ARNAUD MONTY & CAROLINE DE CLERCK

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 académiqueⁱ de Gembloux Agro-Bio Tech. Le présent document n'engage que son auteur.

ⁱ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par les promoteurs-rices membres du personnel enseignant de GxABT.

**ÉTUDE DE LA FLORE ADVENTICE DANS LE CADRE
DES ROTATIONS INNOVANTES DE L'ESSAI
ECOFOODSYSTEM**

CÉLIA DA COSTA PEREIRA PAIXÃO

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024

CO-PROMOTEURS: ARNAUD MONTY & CAROLINE DE CLERCK

Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon co-promoteur, M. Monty, pour sa supervision, sa rigueur scientifique et ses remarques judicieuses et ma co-promotrice, Mme De Clerck, pour son accompagnement, ses conseils avisés et sa disponibilité toujours bienveillante.

Je remercie également Nina Leclef, chargée de l'encadrement au long de ce travail.

Je tiens aussi à remercier Christophe Lacroix pour avoir partagé ses connaissances sur les adventices, le personnel de la ferme expérimentale, surtout Jean-François pour son aide lors des relevés au champ et l'équipe de statistiques pour son attention et ses recommandations précieuses.

Merci à l'ensemble des personnes rencontrées au cours de mes années d'études qui ont enrichi mes connaissances et ont fait de moi la personne que je suis devenue.

Merci à mon groupe de soutien à toute épreuve, notamment, Christine, Liuba, Perrine, Lucas et Matthew, à mes fidèles relecteurs, Armand-Pierre et Marianne et à ma famille qui m'a encouragée depuis l'étranger.

Pour terminer, un merci tout particulier à ma maman pour sa présence indéfectible en toutes circonstances et pour sa confiance inébranlable en moi.

Résumé

Dans le contexte actuel mondial d'accroissement démographique, de changements climatiques et de stabilisation des surfaces agricoles, de nouveaux systèmes de culture plus durables sont envisagés afin de permettre une alimentation équilibrée de la population mondiale selon les recommandations de la Commission EAT-Lancet.

Pour contribuer à répondre à cette préoccupation sociétale, un essai de longue durée à l'aide de rotations innovantes et agroécologiques a été implémenté à Gembloux pour analyser, à travers plusieurs indicateurs, la durabilité et la résilience de ces systèmes de culture.

Dans le cadre de la conception et du suivi de ces nouveaux modèles cultureux, l'étude des adventices constitue une contribution importante. En effet, si les adventices peuvent endommager les cultures et conduire à une perte de rendement, elles représentent également une composante essentielle des agroécosystèmes et fournissent des services écosystémiques. Ce mémoire a pour objectifs d'évaluer la diversité spécifique et l'abondance de la flore adventice au sein des rotations innovantes en 2024 et de comparer ces données avec les données existantes pour 2022. L'évaluation et la comparaison portent sur des relevés obtenus au niveau de la flore potentielle et au niveau de la flore réalisée et recourt à l'analyse de différents indices de biodiversité. Pour la flore potentielle, les informations proviennent d'échantillons prélevés dans les sols de chaque parcelle de l'essai et mis en culture au laboratoire et, pour la flore réalisée, de comptages effectués sur le terrain.

Au terme de ce travail il apparaîtrait, en 2024, une influence des effets des précédents cultureux et des méthodes de désherbage sur les indices de biodiversité et une augmentation générale de la densité d'adventices par rapport à 2022. La rotation ICLS constitue une exception à cette tendance observée pour la flore potentielle et réalisée. L'implantation de la prairie et de l'inter-culture pâturées semble remplir son rôle pour limiter l'augmentation de la densité d'adventices et pourrait ainsi constituer un outil approprié pour la gestion de la flore adventice dans le cadre de ces systèmes de culture.

Mots-clé : adventice, agroécologie, EcoFoodSystem, rotation, biodiversité, prairie temporaire, interculture

Abstract

In the current global context of population growth, climate change and stabilization of agricultural land, new, more sustainable cropping systems are being considered to ensure a balanced diet for the world's population, as recommended by the EAT-Lancet Commission.

To help address this societal concern, a long-term trial using innovative agroecological rotations has been implemented at Gembloux to analyze, through several indicators, the sustainability and resilience of these cropping systems.

As part of the design and monitoring of these new cropping models, the study of weeds plays an important contribution. Indeed, while weeds can damage crops and lead to yield loss, they also represent an essential component of agroecosystems and provide ecosystem services. The aim of this dissertation is to assess the specific diversity and abundance of weed flora in innovative rotations in 2024, and to compare these data with existing data for 2022. The assessment and comparison are based on surveys of potential and expressed flora, using the analysis of various biodiversity indices. For the potential flora, the information comes from samples taken from the soil of each trial plot and cultured in the laboratory, and for the expressed flora, from counts carried out in the field.

At the end of this work, it would appear that, in 2024, the effects of previous cropping and weeding methods have an influence on biodiversity indices and a general increase in weed density compared with 2022. The ICLS rotation is an exception to this trend for potential and realized flora. The establishment of grazed grassland and intercrops seems to be fulfilling its role in limiting the increase in weed density and could thus be an appropriate tool for managing weed flora in these cropping systems.

Keywords: weed, agroecology, EcoFoodSystem, rotation, biodiversity, temporality grassland, intercrop

Étude de la flore adventice dans le cadre des rotations innovantes de l'essai EcoFoodSystem

Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Contexte	2
2.1.	Adventices.....	2
2.1.1.	Définition.....	2
2.1.2.	Classification.....	2
2.1.3.	Nuisibilité et services écosystémiques	3
2.1.4.	Caractéristiques biologiques	5
2.1.5.	Modes de gestion	5
2.1.6.	Flore potentielle et réalisée	8
2.2.	EcoFoodSystem	9
2.2.1.	Recommandations EAT-Lancet.....	9
2.2.2.	Essai EcoFoodSystem.....	9
3.	Objectifs	9
4.	Matériel et méthodes.....	10
4.1.	Rotations.....	10
4.2.	Dispositif expérimental	11
4.3.	Étude de la flore potentielle	12
4.3.1.	Prélèvement des échantillons	12
4.3.2.	Mise en culture.....	13
4.3.3.	Suivi en laboratoire	14
4.4.	Suivi de la flore réalisée	14
4.4.1.	Mise en place des quadrats.....	14
4.4.2.	Premier comptage	14
4.4.3.	Deuxième comptage	15
4.5.	Diversité des communautés.....	15
4.5.1.	Indice de richesse spécifique.....	15
4.5.2.	Indices de diversité spécifique	16
4.6.	Analyses statistiques	17
5.	Résultats	18
5.1.	Flore potentielle.....	18
5.1.1.	Temporalité 1	18
5.1.1.1.	Structure des communautés.....	18
5.1.1.2.	Évolution des indices de biodiversité.....	19

5.1.2.	Temporalité 2	22
5.1.2.1.	Structure des communautés.....	22
5.1.2.2.	Évolution des indices de biodiversité.....	22
5.2.	Flore réalisée.....	25
5.2.1.	1 ^{er} comptage.....	25
5.2.1.1.	Structure des communautés.....	25
5.2.1.2.	Évolution des indices de biodiversité.....	26
5.2.2.	2 ^{ème} comptage	29
5.2.2.1.	Structure des communautés.....	29
5.2.2.2.	Évolution des indices de biodiversité.....	30
5.2.3.	Biomasse	34
5.2.3.1.	Structure des communautés.....	34
5.2.3.2.	Évolution des indices de biodiversité.....	34
6.	Discussion.....	37
6.1.	Structure des communautés d'adventices.....	37
6.2.	Indices de biodiversité	37
6.2.1.	Flore potentielle	37
6.2.2.	Flore réalisée	39
7.	Conclusion et perspectives.....	41
8.	Contribution personnelle de l'étudiante	43
9.	Bibliographie	44
10.	Annexes	54

Table des figures

Figure 1. Tableau récapitulatif des différents types de nuisibilité des adventices (D'après Caussanel, 1989; Chicouène, 2010; Chauvel et al., 2018).	4
Figure 2. Rotation BAU et BAU_HF (A), ICLS (B) et Vegan (C) de l'essai EcoFoodSystem. Les numéros dans les rotations correspondent aux années.....	11
Figure 3. Diagramme ombrothermique concernant les températures et précipitations moyennes de Gembloux pour les mois de janvier à juin de la période entre 1991-2020 (bleu foncé et rouge continu) et de l'année 2024 (bleu hachuré et rouge discontinu) ("IRM - Climat dans votre commune," March-16-2024; "Agromet.be," June-30-2024).....	11
Figure 4. Localisation et organisation du dispositif expérimental.	12
Figure 5. Schéma d'une parcelle expérimentale.	12
Figure 6. Photos des étapes de la mise en culture des échantillons de sol. A : Tubes de PVC et billes d'argex, B : toile de jute, C : terreau universel et D : échantillon de sol.	13
Figure 7. Schéma d'un bac pour le suivi de la flore potentielle.....	13
Figure 8. Photo d'un quadrat utilisé pour le relevé des adventices aux champs et pour les prélèvements de sol en vue de l'étude de la flore potentielle en laboratoire.....	15
Figure 9. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) en temporalité 1 pour la flore potentielle.....	18
Figure 10. Graphique présentant la densité relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation en temporalité 1 pour la flore potentielle.....	19
Figure 11. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et de la rotation (à droite) sur la densité totale d'adventices en temporalité 1 pour la flore potentielle. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.....	20
Figure 12. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et de la rotation (à droite) sur la richesse spécifique en temporalité 1 pour la flore potentielle. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.	21
Figure 13. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur l'indice de Shannon en temporalité 1 pour la flore potentielle. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.	21
Figure 14. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) en temporalité 2 pour la flore potentielle.....	22
Figure 15. Graphique présentant la densité relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation en temporalité 2 pour la flore potentielle.....	23
Figure 16. Graphique représentant l'influence de l'année sur les différentes rotations pour la densité totale d'adventices (à gauche) et pour la richesse spécifique (à droite) en temporalité 2 pour la flore potentielle.	24
Figure 17. Graphique représentant l'influence de l'année sur les différentes rotations pour l'indice de Shannon en temporalité 2 pour la flore potentielle.....	24
Figure 18. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et de la rotation (à droite) sur l'indice de Pielou en temporalité 2 pour la flore potentielle. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.	25
Figure 19. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) au 1er comptage pour la flore réalisée en temporalité 1....	26
Figure 20. Graphique présentant la densité relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation au 1 ^{er} comptage de la flore réalisée en temporalité 1.....	27
Figure 21. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur la densité totale d'adventices au 1 ^{er} comptage de la flore réalisée en temporalité 1. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans....	27

Figure 22. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur la richesse spécifique au 1er comptage de la flore réalisée en temporalité 1. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.	28
Figure 23. Influence de l'année sur l'indice de Shannon au 1er comptage de la flore réalisée en temporalité 1.	28
Figure 24. Graphique représentant l'influence de l'année sur l'indice de Simpson (à gauche) et de Pielou (à droite) au 1er comptage de la flore réalisée en temporalité 1.	29
Figure 25. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) au 2ème comptage pour la flore réalisée en temporalité 1.	30
Figure 26. Graphique présentant la densité relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation au 2 ^{ème} comptage de la flore réalisée en temporalité 1.	31
Figure 27. Graphique représentant l'influence de l'année sur les différentes rotations pour la densité (à gauche) et la richesse spécifique (à droite) au 2ème comptage de la flore réalisée en temporalité 1.	32
Figure 28. Graphique représentant l'influence de l'année sur les différentes rotations pour l'indice de Shannon au 2ème comptage de la flore réalisée en temporalité 1.	32
Figure 29. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur l'indice de Pielou au 2ème comptage de la flore réalisée en temporalité 1. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.	33
Figure 30. Illustrations de la présence d'adventices dans les parcelles à la floraison du froment en temporalité 1. De gauche à droite et de haut en bas : bloc 2 rotation BAU_HF, bloc 1 ligne de séparation entre les rotations BAU (à gauche) et BAU_HF (à droite), bloc 3 rotation Vegan, bloc 3 rotation ICLS, bloc 3 rotation ICLS, bloc 4 rotation Vegan.	33
Figure 31. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) lors de l'étude de la biomasse de la flore réalisée en temporalité 1.	34
Figure 32. Graphique présentant la biomasse relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation lors de l'étude de la biomasse en temporalité 1.	35
Figure 33. Graphique représentant l'influence de l'année et des rotations sur la biomasse totale d'adventices pour la flore réalisée en temporalité 1.	36
Figure 34. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur l'indice de Pielou pour l'étude de biomasse de la flore réalisée en temporalité 1. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.	36

Table des tableaux

Tableau 1. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité en temporalité 1 pour la flore potentielle. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.	19
Tableau 2. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité en temporalité 2 pour la flore potentielle. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.	22
Tableau 3. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité au 1 ^{er} comptage pour la flore réalisée en temporalité 1. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.	26
Tableau 4. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité au 2 ^{ème} comptage pour la flore réalisée en temporalité 1. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.	30
Tableau 5. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité au 2 ^{ème} comptage pour la biomasse en temporalité 1. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.	34
Tableau 6. Tableau indiquant les valeurs des corrélations entre les biomasses de froment et d'adventices totale pour les différentes rotations de 2024 en temporalité 1. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.	37

Table des annexes

Annexe 1. Schéma des blocs du dispositif expérimental de l'essai EcoFoodSystem.....	54
Annexe 2. Composition des bandes fleuries en bordure des parcelles expérimentales.....	55
Annexe 3. Tableau récapitulatif des modèles, transformation et distributions des variables considérées dans l'analyse statistique des données.	56
Annexe 4. Moyennes marginales et erreurs standard des indices de biodiversité de la flore potentielle.	57
Annexe 5. Moyennes marginales et erreurs standard des indices de biodiversité de la flore réalisée au 1 ^{er} comptage en temporalité 1.	59
Annexe 6. Moyennes marginales et erreurs standard des indices de biodiversité de la flore réalisée au 2 ^{ème} comptage en temporalité 1.	60
Annexe 7. Moyennes marginales et erreurs standard des indices de biodiversité de la flore réalisée au 2 ^{ème} comptage lors de l'étude de la biomasse en temporalité 1.....	61
Annexe 8. Liste des codes EPPO, noms latins et noms vernaculaires des espèces considérées dans le cadre de ce travail.	62
Annexe 9. Tableau récapitulatif des opérations culturales relatives aux cultures de l'essai.	64

Liste des abréviations

ANOVA : Analyse de la variance

BAU : Business As Usual

FAO : Organisation des Nations des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

ICLS : Integrated Crop-Livestock System

NMDS : Positionnement multidimensionnel non métrique

PERMANOVA : Analyse de la variance par permutation

TAD : Taux annuel de décroissance

1. Introduction

Selon les dernières estimations des Nations Unies, la population mondiale atteindra 9,7 milliards d'habitants à l'horizon 2050, dont 68% vivront dans les zones urbaines (United Nations, 2019, 2023). Cet accroissement inégalement réparti de la population lié à une modification du mode de production, de distribution et de consommation des produits agricoles, à une mondialisation de l'économie et à la problématique des changements climatiques génère un défi en termes de lutte contre la faim et d'implémentation de nouveaux systèmes agricoles et alimentaires (FAO, 2023; FAO et al., 2023; INRAE, 2023).

En 2022, l'Organisation des Nations des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) estime que 735 millions de personnes se trouvaient en situation de sous-alimentation¹ et qu'à l'opposé, 2,5 milliards étaient obèses ou en surpoids. Pour faire face à cette situation, les Nations Unies ont adopté, parmi les 17 objectifs mondiaux de développement durable, l'objectif 2 visant à éradiquer la faim, assurer la sécurité alimentaire², améliorer la nutrition et promouvoir une agriculture durable (FAO et al., 2023).

L'agriculture mondiale figure au centre de cette préoccupation et est donc amenée à fournir un niveau suffisant de production pour faire face à la demande croissante, à réduire ses impacts sur l'environnement et à accompagner les mutations des régimes alimentaires tout en adaptant ses pratiques aux changements climatiques (FAO et al., 2023). Dans ce contexte, de nouveaux systèmes de culture plus durables, entraînant moins d'impacts négatifs sur la santé, l'environnement et la biodiversité sont envisagés parmi lesquels l'agroécologie (Leippert et al., 2020; Liliane et al., 2020; Tibi et al., 2020). L'agroécologie est à la fois une science, un ensemble de pratiques et un mouvement social qui se base sur 10 principes³, qui vise à promouvoir une transition vers des systèmes alimentaires et agricoles plus durables et à atteindre l'objectif "faim zéro" (Wezel et al., 2009, 2020).

Puisqu'il est prévu que les surfaces agricoles mondiales restent stables d'ici 2050, l'obtention d'un rendement satisfaisant des cultures demeure un impératif incontournable pour nourrir la population planétaire (Tibi et al., 2020). Parmi les facteurs qui occasionnent une perte de rendement, les bioagresseurs et, en particulier, les adventices, jouent un rôle prépondérant. En effet, les organismes nuisibles endommagent chaque année jusqu'à 40% de la production agricole mondiale et les adventices sont responsables de 34 % de cette diminution de productivité (Oerke, 2006; Savary et al., 2019).

Dès lors, dans le cadre de la conception et de l'étude de nouveaux systèmes de culture à la fois productifs, durables et respectueux de l'environnement, la gestion des adventices représente une contribution significative. Ce travail s'inscrit dans l'ensemble de cette recherche et vise à appréhender la problématique des adventices dans les agroécosystèmes.

¹ Sous-alimentation : apport énergétique alimentaire insuffisant pour mener une vie active et saine (FAO et al., 2023).

² Sécurité alimentaire : possibilité physique, sociale et économique de se procurer une nourriture suffisante, saine et nutritive lui permettant de satisfaire ses besoins et préférences alimentaires pour mener une vie saine et active (FAO, 1997).

³ Diversité, co-création et partage de connaissance, synergies, efficacité, recyclage, résilience, valeurs humaines et sociales, culture et traditions alimentaires, gouvernance responsable et économies circulaires et solidaires (FAO, 2019).

2. Contexte

Pour établir le cadre de cette étude, il convient d'aborder, d'une part, les spécificités des adventices et, d'autre part, le rapport de la Commission EAT-Lancet et le projet à la base de l'expérimentation.

2.1. Adventices

2.1.1. Définition

Le terme adventice comporte plusieurs définitions selon le contexte étudié et les plantes impliquées (Monaco et al., 2002). Pour le Larousse, une adventice représente une plante qui pousse spontanément dans une culture et dont la présence porte un préjudice plus ou moins sévère à celle-ci (Larousse, March-21-2024). D'après Monaco et al. (2002), l'adventice constitue une plante indésirable selon les critères humains en raison de son lieu d'implantation. Par adventice, l'European Weed Research Society définit, en 2008, « toute plante ou végétation interférant avec les objectifs ou exigences humaines » (Zimdahl, 2018). Selon Godinho (1984), l'adventice croît spontanément dans les écosystèmes modifiés et gérés par l'homme. La définition de la notion d'adventice a également connu une évolution au cours du temps. Ainsi, la Weed Science Society of America actualise sa définition en 2016 pour intégrer le caractère nuisible et aboutit à définir l'adventice comme « une plante qui occasionne des dommages économiques ou écologiques, cause des problèmes pour la santé humaine ou animale ou est indésirable à l'endroit où elle se développe » (Zimdahl, 2018). Toutes ces définitions relèvent la dimension anthropocentrique et subjective de la notion d'adventice. En effet, l'humain détermine pour chaque situation, en fonction du lieu, du moment, des répercussions sur les cultures, la santé humaine et animale et des critères esthétiques, la plante ou les plantes qu'il considère comme adventices. Dès lors, dans un agroécosystème⁴, les adventices représentent l'ensemble des espèces végétales différentes de ou des espèces cultivées. La flore adventice est définie par l'ensemble des espèces adventices vivant à un moment donné au sein d'un écosystème déterminé notamment d'un agroécosystème (Masson et al., 2021; "Définitions : flore - Dictionnaire de français Larousse," April-1-2024).

Il est à souligner que le terme courant de « mauvaises herbes » comporte de nos jours, une connotation négative qui entre en conflit avec les services écosystémiques⁵ que rendent ces plantes dans l'ensemble des écosystèmes (Chauvel et al., 2018). Le dénominateur « plantes adventices » est aujourd'hui préférentiellement utilisé.

2.1.2. Classification

Une première classification des adventices, comme de tous les êtres vivants, peut se fonder sur les liens phylogénétiques qui font appel aux ressemblances héritées d'ancêtres communs (Zimdahl, 2018; Loyeau, 2019). Ainsi, sur cette base, les adventices des agroécosystèmes figurent dans le règne des Métaphytes qui se subdivise en trois embranchements principaux à savoir les Bryophytes, les Ptéridophytes et les Spermatophytes comprenant les sous-embranchements des Gymnospermes et des Angiospermes (Hennig, 1999; Soltis et al., 2021). Si cette classification présente l'intérêt de retracer l'histoire évolutive du vivant, elle manque de praticité pour l'étude et l'élimination des adventices puisque 75% des adventices causant le plus de dégâts appartiennent au groupe des Angiospermes (Holm, 1978, Monaco et al., 2002). Cependant, au sein de ce dernier taxon, la

⁴ Agroécosystème : écosystème cultivé dont ses fonctions écosystémiques sont valorisées par l'Homme sous forme de biens agricoles et de services. (Neyton et al., 2018).

⁵ Service écosytémique: bénéfiques que les êtres humains retirent des écosystèmes (MEA 2005 in Méral et al., 2016).

distinction entre les classes des Monocotylédones et Dicotylédones s'avère utile car elle conditionne partiellement le choix de l'éventuel herbicide de synthèse à utiliser. En effet, l'efficacité des herbicides dépend notamment des différences morphologiques au niveau racinaire, foliaire et vasculaire de ces deux classes (Scalla, 1991).

A côté de cette classification naturelle, d'autres regroupements existent selon des critères tels que l'habitat, le cycle de vie et la période de germination de l'adventice (Monaco et al., 2002; Mamarot et al., 2014; Zimdahl, 2018). L'habitat se réfère au cadre dans lequel l'adventice se développe à savoir les prairies, les cultures, les forêts, les zones urbaines et les milieux aquatiques. Dans ce travail, l'étude des adventices se limite au contexte des terres arables. En ce qui concerne le cycle de vie, les adventices peuvent être classées en pérennes ou vivaces, bisannuelles ou annuelles. Les vivaces présentent une durée de vie supérieure à deux ans, se multiplient année après année et grandissent à partir du même système racinaire. Pour l'adventice bisannuelle, il s'écoule entre un et deux ans entre sa germination et sa fructification tandis que pour l'annuelle, cette période se réduit à une année au maximum. D'autre part, certaines espèces d'adventices germent préférentiellement au printemps, en été, en automne ou au contraire tout au long de l'année. Des études ont démontré que les adventices produisent un impact différent sur les rendements des cultures selon leur période d'émergence (Oliver, 1988; Zwerger et al., 2002, Masson et al., 2021). La connaissance de la période de germination des adventices contribue pour l'agriculteur·trice averti au choix de la date de semis des cultures et à l'établissement des rotations afin de réduire les besoins de désherbage.

2.1.3. Nuisibilité et services écosystémiques

Les adventices sont considérées comme des bioagresseurs des cultures au même titre que les ravageurs (insectes, nématodes, rongeurs...) et les agents pathogènes (bactéries, virus, champignons) (Monaco et al., 2002). Parmi les bioagresseurs des milieux agricoles, les adventices sont considérées comme les plus nuisibles (Oerke, 2006; Cordeau et al., 2018). Leur nuisibilité, variable selon l'espèce, concerne la culture et les activités agricoles (Masson et al., 2021). Elle se manifeste à différents niveaux selon Caussanel (1989) (Figure 1). La nuisibilité des adventices est dite primaire, directe ou indirecte, lorsqu'elle occasionne respectivement une perte de quantité ou de qualité de la récolte (Caussanel, 1989, Cordeau et al., 2018). La première qui engendre des pertes de rendements de la culture se rapporte, d'une part, à la compétition des plantes adventices pour le prélèvement des ressources telles que l'eau, la lumière et les éléments nutritifs et, d'autre part, aux phénomènes d'allélopathie⁶ qui peuvent affaiblir le développement de la culture implantée (Caussanel, 1989; Valantin-Morison et al., 2008; Zimdahl, 2018). Dans les cultures de froment, au niveau mondial, pour les années 2001 à 2003, les pertes potentielles⁷ de rendement moyennes estimées s'élèvent à 23% et les pertes réelles⁸ sont de l'ordre de 7% en raison des opérations de désherbage (Oerke, 2006). La nuisibilité primaire indirecte concerne, d'une part, l'altération de l'état de la récolte, de la qualité des produits récoltés et de la valeur esthétique de la parcelle et, d'autre part, l'augmentation du coût et du temps des travaux culturaux et, également, la santé humaine (Caussanel, 1989; Chicouène, 2010; Chauvel et al., 2018). Cette nuisibilité est également causée par les adventices qui peuvent constituer des hôtes ou des vecteurs d'autres bioagresseurs tels des insectes, des champignons, des bactéries, des virus, des nématodes ou des plantes parasites (Mantle et al., 1977; Laviña et al., 1996; Wisler et

⁶ Allélopathie : tout effet direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante sur une autre à travers la production de composés chimiques, issus du métabolisme secondaire, libérés dans l'environnement de la rhizosphère (Weston et al., 2003)

⁷ Pertes potentielles de rendement : pertes dues aux adventices en l'absence de protection physique, biologique ou chimique des cultures par rapport aux rendements obtenus avec une même intensité de production dans un scénario sans pertes (Oerke, 2006).

⁸ Pertes réelles de rendement : pertes constatées aux cultures malgré la pratique de méthodes de protection des cultures (Oerke, 2006).

al., 2005; Chicouène, 2010; Scott et al., 2022; AbdelRazek et al., 2023). Ainsi, la présence de graines d'adventices dans les produits récoltés, en diminuant la qualité ou en augmentant les coûts de la récolte, peut contribuer à une réduction de revenu pour l'agriculteur·trice (Caussanel, 1989; Chauvel et al., 2018). En ce qui concerne la santé humaine, la présence dans la récolte de certaines graines d'adventices ou d'agents pathogènes présente une toxicité comme dans le cas du datura stramoine (*Datura stramonium* L.) (Jennings, 1935, Chauvel et al., 2018) et l'ergot de seigle (*Claviceps purpurea* (Fries) Tulasne) dans les céréales. La nuisibilité secondaire se traduit par une réalimentation du stock semencier et des organes de propagation de la parcelle à partir des plantes adventices (Chauvel et al., 2018). Les graines et les organes de multiplication végétative constituent une réserve potentielle d'infestation pour les cultures suivantes de la rotation et pour les parcelles adjacentes et environnantes (Barralis et al., 1996; Buhler et al., 1997).

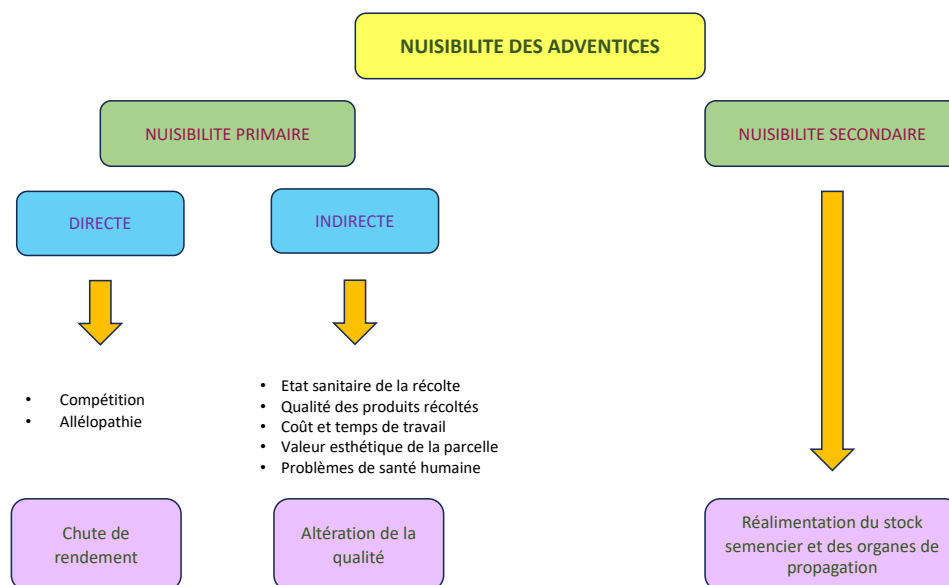


Figure 1. Tableau récapitulatif des différents types de nuisibilité des adventices (D'après Caussanel, 1989; Chicouène, 2010; Chauvel et al., 2018).

Par contre, bien que les adventices constituent des contraintes majeures pour la production agricole, elles représentent des composantes importantes de l'agroécosystème qui peuvent notamment, contribuer à l'amélioration de la production des cultures (Marshall et al., 2003; Bretagnolle et al., 2015). En effet, la diversité et l'abondance des adventices favorisent la production de nectar et de pollen pour les insectes pollinisateurs, constituent des refuges pour les auxiliaires de culture comme les carabes (Marshall et al., 2003; Boutin et al., 2012) et, en assurant la couverture des sols cultivés, limitent les risques d'érosion et de lixiviation de l'azote en particulier pendant les périodes de jachère (Battany et al., 2000; Bretagnolle et al., 2015; Moreau et al., 2020, Cordeau et al., 2018). D'un point de vue écologique, cette flore produit des feuilles et des semences qui sont à la base de réseaux trophiques et constituent des ressources pour les vers de terre, insectes, oiseaux et certains mammifères (Bohan et al., 2011; Petit et al., 2011; Gaba et al., 2020). Ces interactions trophiques peuvent entraîner des effets indirects bénéfiques pour les plantes cultivées et conduire, par exemple, en nourrissant les vers de terre, à une structure du sol améliorée qui fournit un habitat aux microorganismes associés aux graines et favorise leur activité antifongique (Petit et al., 2011). Enfin, la présence d'adventices peut bénéficier au grand public en assurant le maintien et la survie de la flore sauvage et en améliorant la valeur socioculturelle des paysages (Bretagnolle et al., 2015).

La considération des potentiels effets nuisibles et services écosystémiques des plantes adventices montre qu'il importe d'identifier et d'adopter des méthodes de gestion des territoires qui permettent

à la fois d'assurer une production agricole et un niveau de biodiversité⁹ suffisants pour garantir le fonctionnement écologique des agroécosystèmes (Petit et al., 2011). L'implantation, la composition et l'évolution d'une communauté d'adventices résultent de l'interaction de facteurs climatiques, pédologiques, biotiques et historiques, notamment la concurrence entre espèces cultivées et adventices, adventices entre elles et des pratiques culturales (Caussanel, 1989; Andreasen et al., 1991; Dale et al., 1992; Fried et al., 2008; Valantin-Morison et al., 2008).

2.1.4. Caractéristiques biologiques

Pour lutter contre les adventices, il y a lieu de tenir compte des caractéristiques biologiques de ces plantes. En effet, le trait le plus marquant qui unit les adventices n'est pas de nature taxonomique ou morphologique mais en relation avec leur capacité à grandir et à se développer dans des environnements perturbés par les activités anthropiques (Zimdahl, 2018). Ainsi, 68% des 200 espèces d'adventices les plus nuisibles partagent certaines caractéristiques biologiques communes telles qu'une émergence rapide, des conditions de germination peu spécifiques, une croissance rapide, un cycle court, une synchronie de développement avec la plante cultivée, une possibilité de reproduction végétative, une production importante de graines amplement disséminées et un taux annuel de décroissance (TAD) peu élevé (Holm, 1978, Zimdahl, 2018). Le TAD correspond à la proportion de graines qui perdent leur faculté germinative au terme d'un an (ARVALIS et al., 2015). Il est exprimé en pourcentage du stock initial de semences (AlterAgro, 2014). Un TAD proche de 100% signifie que près de la totalité des graines disparaîtront, l'année suivante, de la flore adventice potentielle (ARVALIS et al., 2015). Quant au mode de reproduction, l'existence d'une reproduction végétative pour certaines adventices vivaces s'accompagne d'un potentiel de colonisation élevé qui complique les opérations de désherbage.

Pour la reproduction sexuée, le nombre de graines produites par individu influence le niveau d'infestation des parcelles. La profondeur de germination des graines, les périodes de germination, de floraison et de grenaison sont également des caractéristiques à prendre en compte pour le choix du moment et des techniques de désherbage.

Parmi les adventices, il est dénombré de nombreuses espèces annuelles, thérophytes qui présentent la caractéristique de passer la saison défavorable à l'état de graines. Cette synchronie de cycle par rapport à la majorité des plantes cultivées, annuelles elles-aussi, explique la prolifération de ces adventices dans les cultures (Reibel et al., 2020).

2.1.5. Modes de gestion

La décision de contrôler les adventices doit être raisonnée tant au niveau d'une parcelle cultivée, qu'au niveau d'une culture de l'assolement, d'une exploitation agricole et plus globalement d'une région avec des caractéristiques propres en tenant compte, pour chacun de ces niveaux, des prévisions biologiques et économiques ainsi que des conditions climatiques (Cramer, 1967; Auld et al., 1987).

En tant qu'outils d'aide à la décision pour le traitement des adventices, des seuils de nuisibilité biologique et économique ont été instaurés. Le premier concerne la nuisibilité primaire directe et fournit une valeur indicatrice de l'importance des adventices. En pratique, ce seuil correspond au nombre d'adventices d'une espèce par unité de surface causant une perte de 5% de rendement (Rodriguez, 2005). Le seuil de nuisibilité économique évalue le prix de revient des opérations de désherbage et des dépenses nécessaires pour supprimer la nuisibilité indirecte des adventices ainsi

⁹ Biodiversité : ensemble des êtres vivants, des écosystèmes dans lesquels ils vivent ainsi que des interactions des espèces entre elles et avec leurs milieux (Nations Unies, 1992).

que la valeur de la récolte et représente donc, pour chaque espèce, le niveau d'infestation à partir duquel une opération de désherbage devient rentable (Rodriguez, 2005). Ces seuils, établis de manière empirique et qui utilisent comme variable la densité d'adventices n'expliquent qu'une partie de la variabilité des rendements car ils correspondent à des conditions particulières, propres à chaque combinaison adventice-culture et à des contextes pédo-climatiques donnés, qui ne sont pas conformes à la réalité des parcelles agricoles pouvant abriter des stades de développement multiples de diverses espèces d'adventices (Oliver, 1988; O'Donovan, 2005; Masson et al., 2021). Pour appréhender la variabilité des rendements, des variables autres que la densité d'adventices ont été identifiées (Florez et al., 1999; Masson et al., 2021). Le meilleur indicateur mis en lumière pour saisir la notion de nuisibilité primaire directe se réfère au rapport entre la biomasse des adventices et celle de la culture. A lui seul, il permet l'explication de 31% de la variabilité des pertes de rendement des céréales (Milberg et al., 2004; Masson et al., 2021).

Dans nos pays industrialisés, depuis la moitié du XX^{ème} siècle, l'intensification de l'agriculture s'est accompagnée d'une large utilisation des engrais, des produits de traitement des plantes et des animaux d'élevage et de la mise en place de labours profonds et répétés (Mazoyer et al., 2002). Elle a également produit des bouleversements sociétaux tels que la diminution de la population agricole et la concentration des exploitations agricoles¹⁰. La modification des pratiques culturales et des itinéraires techniques agricoles ont conduit à des altérations de la composition et de la structure des agroécosystèmes avec des conséquences sur leur fonctionnement (Benton et al., 2003; Baessler et al., 2006; Chauvel et al., 2018). Ce changement a entraîné des inconvénients d'ordre pédologiques, écologiques et sanitaires tels la diminution de la qualité des sols, la pollution des eaux de surface et souterraines, les risques pour la santé humaine et la réduction de la biodiversité (Mazoyer et al., 2002; INSERM, 2021; Pelosi et al., 2021). Dans le cas des grandes cultures, l'emploi accru de produits phytopharmaceutiques apparaît comme un des facteurs de déclin de la richesse spécifique et de l'abondance de nombreux organismes (Benton et al., 2003; Le Roux et al., 2008). En ce qui concerne la flore adventice, si l'utilisation d'herbicides a facilité le travail des agriculteurs·trices en éliminant la nécessité d'un désherbage manuel et a permis de minimiser les pertes de rendement, il a également mené à des modifications de populations et à la création de phénomènes de résistance au sein de cette flore (Petit et al., 2015; Cordeau, 2022). Ces derniers mécanismes résultent de l'évolution adaptative des populations d'adventices suite à la pression de sélection causée par les herbicides (Jasieniuk et al., 1996; Neve et al., 2009; Délye et al., 2013).

La prise de conscience des conséquences environnementales et sanitaires négatives du recours systématique aux herbicides et de la pratique intensive du labour a motivé la considération d'autres stratégies, plus durables, pour la gestion des adventices au niveau de l'agroécosystème. Celles-ci, plutôt que de viser l'éradication des adventices, contribuent à la régulation de leurs populations afin de préserver la biodiversité tout en fournissant un rendement souhaité (Lechenet et al., 2017; Catarino et al., 2019; MacLaren et al., 2020; Berquer et al., 2023).

Des études ont montré que la gestion agroécologique de la flore adventice basée sur de nouveaux systèmes de culture a permis, simultanément, de gérer la pression des adventices, de maintenir un caractère productif aux cultures, d'offrir un bénéfice environnemental au niveau des services écosystémiques ou de conservation de la biodiversité et de réduire l'utilisation d'herbicides (Colbach et al., 2008; Valantin-Morison et al., 2008; Petit et al., 2013). Les pratiques agroécologiques s'appuient sur les interactions biologiques et les synergies bénéfiques des agroécosystèmes pour minimiser les impacts négatifs des intrants externes (Altieri, 1995; Wezel et al., 2014, 2020; Belmain et al., 2022).

¹⁰ Entre 1990 et 2020, la Wallonie a perdu la moitié de sa main-d'œuvre agricole, le nombre d'exploitations agricoles est passé de 29180 à 12710 pendant cette période et la superficie moyenne par exploitation en Belgique a été multipliée par 2,5 depuis 1990 jusqu'en 2022 (SPW, 2022, 2023a, 2023b).

La mise en place d'une rotation longue et diversifiée et l'introduction de cultures associées combinées à des pratiques culturales adéquates relatives à la date de semis, au travail du sol, au désherbage et à la fertilisation permettent de réduire la densité et la production de biomasse d'adventice ainsi que la spécialisation de cette flore (Liebman et al., 1993). De plus, il a été démontré qu'à densité égale, une grande diversité d'adventices s'accompagnait d'une plus faible perte de rendement en raison d'une exploitation plus diversifiée des ressources par rapport à la plante cultivée (Ferrero et al., 2017; Adeux et al., 2019).

Pour perturber biologiquement le cycle des adventices, les propriétés allélopathiques de certains couverts végétaux peuvent être exploitées. Ces couverts à potentiel allélopathique sont établis avant le semis d'une culture et, ensuite, leur destruction et l'incorporation de leurs résidus dans les couches superficielles du sol juste avant le semis de la culture permet d'inhiber le développement des adventices. Ainsi, des expériences menées sur le terrain ont mis en évidence l'effet inhibiteur d'un couvert végétal d'avoine, installé en interculture, sur la croissance des adventices dans la culture suivante (Ferrero et al., 2017; Adeux et al., 2019).

Parmi les pratiques agroécologiques, l'intégration d'une gestion appropriée du pâturage du bétail dans la rotation fournit une méthode efficace pour faire face aux problèmes liés aux adventices (Frost et al., 2003; Munier-Jolain et al., 2012; MacLaren et al., 2019, 2020). Une approche intégrée intéressante peut être réalisée en combinant le pâturage des ruminants, en particulier celui des moutons, avec d'autres stratégies de contrôle des adventices (Frost et al., 2003).

Dans tous les systèmes de culture, les processus mobilisables pour maîtriser la flore adventice sont les stratégies de prévention, de contrôle et en dernier recours d'éradication (Boutagayout et al., 2023). La prévention consiste à adopter des mesures prophylactiques dont l'objectif vise à limiter l'extension de la flore adventice existante et à limiter l'introduction de nouvelles espèces d'adventices dans la parcelle (Anderson, 2007). Dans ce cadre, il y a lieu d'éviter la contamination des graines de culture avec celles des adventices et d'utiliser des machines non contaminées (Christoffoleti et al., 2007; Bajwa, 2014).

Le contrôle s'appuie sur les mécanismes de compétition en faveur de la culture semée et de perturbation du cycle des adventices de manière mécanique ou biologique pour empêcher une croissance optimale et l'atteinte du stade de grenaison sans réduire la croissance de la plante cultivée (Valantin-Morison et al., 2008). Dans ce contexte, il y a lieu de considérer la période d'émergence des adventices par rapport au stade de développement de la culture. Pour limiter le développement des adventices, les semis peuvent être avancés ou retardés tout en sachant, qu'en général, les adventices les plus nuisibles sont celles qui germent au même moment que le couvert cultivé (Moreau et al., 2022). Dans les cultures céréalières, pour limiter le potentiel d'émergence des adventices, le retard de la date de semis s'est avéré efficace pour la gestion des adventices graminées (vulpin, ray-grass), avec plus de 80% d'efficacité par rapport à une date de semis conventionnelle (IWM PRAISE, n.d.). Pour entraver la croissance des adventices et contribuer à la diminution du stock semencier, le labour constitue un levier efficace en enfouissant les graines d'adventices dans le sol (Radosevich et al., 2007; Cordeau et al., 2017). L'efficacité du labour diminue à mesure que le TAD des espèces d'adventices augmente. En effet, le premier labour enfouit les graines trop profondément dans le sol pour permettre leur germination tandis que le second provoque, avec l'inversion de la matrice du sol, la remontée des graines à la surface et place, ainsi, les espèces à TAD faible dans des conditions favorables à leur développement (Métais et al., 2018). Le faux semis est également utilisé comme technique mécanique de contrôle efficace des adventices. Il consiste à préparer, suffisamment de jours avant le semis de la culture, un sol adéquat pour faire germer et émerger les graines

d'adventices, qui seront ensuite détruites juste avant l'implantation de la plante cultivée (Rasmussen, 2004).

Des opérations de désherbage mécanique à l'aide d'outils tels que la herse-étrille, la bineuse, la houe-rotative permettent, en combinant un ou plusieurs passages d'un ou plusieurs outils, la destruction de l'adventice au cours de son cycle (Lacroix et al., n.d.).

En dernier recours, l'agriculteur-trice dispose de solutions chimiques opérant avec des modes d'actions différents et réduisant, de cette manière, les risques d'apparition d'espèces résistantes.

2.1.6. Flore potentielle et réalisée

La flore adventice potentielle est définie comme l'ensemble des organes de multiplication conservés dans le sol à l'état de repos végétatif et pouvant potentiellement donner naissance à une adventice viable à la levée (Caussanel, 1989). Ces organes concernent donc les semences et les organes de multiplication végétative. Le stock semencier, quant à lui, représente uniquement l'ensemble des semences d'adventices viables persistant pendant plusieurs années dans le sol, leur germination étant inhibée par des processus de dormance ou un environnement défavorable (Chauvel et al., 2018). L'évolution dans le temps de ces réservoirs est dynamique puisque certaines semences ou organes de reproduction sortent de la réserve en germant, en étant soumises à la prédation ou en dépérissant tandis que d'autres y entrent au terme du processus de reproduction de la plante (Buhler et al., 1997). L'estimation spécifique et quantitative du potentiel d'adventices permet d'appréhender la compréhension de la dynamique des populations d'adventices, de caractériser leurs communautés et de prévoir les risques d'envahissement des cultures (Carretero, 1977; Barralis et al., 1996; Lal et al., 2016). Elle fournit également une vue rétrospective de la gestion du sol et des cultures des années précédentes (Auffret et al., 2011). La quantité de semences par espèce ainsi que le nombre d'espèces varie de façon considérable en fonction des parcelles et au sein d'une même parcelle selon les pratiques de gestion agricoles (Buhler et al., 1997). La connaissance des adventices présentes dans une parcelle, des caractéristiques spécifiques et de l'itinéraire agricole de cette parcelle permet d'augmenter l'efficacité des pratiques de régulations biologiques (Mahe et al., 2019).

La flore adventice réalisée correspond à l'ensemble des adventices effectivement levées pendant le cycle de la culture (Caussanel, 1989). La végétation adventice présente au cours du cycle cultural ne représente qu'une faible proportion de la flore potentielle (Caussanel, 1989). En effet, les taux de levées dépendent de l'espèce, du type de culture et de la profondeur d'enfouissement réalisée par le travail du sol (Chauvel et al., 2018). Ils correspondent en moyenne à 10% du stock semencier (Barralis et al., 1988). La dynamique des levées est influencée par les conditions climatiques, physiques du sol et principalement par les pratiques culturales (Lonchamp et al., 1984; Debaeke, 1988; Leblanc et al., 2005; Fried et al., 2008; Mahe et al., 2019a). Parmi ces dernières, le travail du sol, la date de semis, le précédent cultural et le type de culture sont les plus importantes.

L'étude des relations entre la flore potentielle et la flore réalisée au champ a pour objectif de faciliter la prévision d'infestation d'une culture, la mise en place de stratégies raisonnées de désherbage et, à plus long terme, le suivi de l'évolution de la flore adventice en fonction des opérations culturales implémentées (Barralis et al., 1996; Chauvel et al., 2018).

2.2. EcoFoodSystem

2.2.1. Recommandations EAT-Lancet

Dans son rapport¹¹, la Commission EAT-Lancet de la revue scientifique The Lancet recommande une transformation des régimes alimentaires pour optimiser la santé humaine et assurer la durabilité de l'environnement à l'aide de systèmes de production scientifiquement et technologiquement adaptés (Willett et al., 2019a). La transition vers de nouveaux régimes alimentaires s'inscrit dans le cadre des objectifs de développement durable des Nations Unies et de l'accord de Paris pour le climat (Willett et al., 2019). Pour la population mondiale, le régime alimentaire préconisé vise l'apport de 2500 kcal/jour à travers la consommation d'aliments bénéfiques pour la santé contenant moins de viande et davantage de végétaux et dont la production respecte les 9 limites planétaires. Afin d'atteindre ses objectifs, la Commission EAT-Lancet a établi un plan d'action global comportant cinq stratégies qui incluent un engagement international et national, une réorientation vers une production agricole intensive de haute qualité, une gouvernance coordonnée pour la préservation de la biodiversité et une réduction des pertes et des déchets alimentaires (Willett et al., 2019).

2.2.2. Essai EcoFoodSystem

EcoFoodSystem est un essai système de longue durée mis en place à Gembloux Agro-Bio Tech en 2020 et qui a pour objectif d'analyser et de quantifier, à travers plusieurs indicateurs, l'effet de différents types de rotations innovantes sur la globalité d'un système de cultures dans le contexte des recommandations de EAT-Lancet (Willett et al., 2019). Une expérimentation système est caractérisée par des traitements expérimentaux qui sont constitués par des itinéraires techniques ou des systèmes de cultures combinant différentes techniques élémentaires choisies de manière cohérentes entre elles. Par son approche multifactorielle, l'essai système débouche, d'une part, sur une évaluation du système testé et, d'autre part, sur la génération de connaissances relatives à un mode de production nouveau (Havard et al., 2017). Dans le cadre d'EcoFoodSystem, les différents indicateurs évalués jusqu'à présent sur les types de rotations sont les bioagresseurs, les insectes pollinisateurs et auxiliaires des cultures, la microbiologie du sol, l'évolution des résidus de pesticides et nitrates dans les eaux souterraines et le rendement des cultures.

Les systèmes de culture sont définis par "un ensemble de modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique" (Sebillotte, 1990). Dans EcoFoodSystem, les systèmes de culture sont caractérisés par la nature des cultures, leur ordre de succession et par l'itinéraire technique appliqué à chaque culture.

3. Objectifs

Ce mémoire a pour but d'apporter une contribution au projet EcoFoodSystem en ce qui concerne l'étude de la flore adventice dans le cadre de rotations innovantes.

Dans cette perspective, le premier objectif est d'analyser l'évolution de la flore adventice en relation avec la succession culturale des rotations en comparant la diversité spécifique des adventices et le niveau d'infestation des cultures entre 2024 et 2022 à l'aide respectivement des relevés effectués dans ce travail de fin d'études et dans celui de Martin Van den Abeele (Van Den Abeele, 2022). La comparaison porte sur les données obtenues au niveau de la flore potentielle au laboratoire et au niveau de la flore réalisée sur le terrain et recourt à l'analyse d'indices de biodiversité. Un second

¹¹ Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems

objectif consiste à évaluer la diversité spécifique et l'abondance de la flore adventice potentielle par rapport aux observations menées au champ afin de décrire les communautés d'adventices et de prévoir les risques d'envahissement futurs des cultures. Enfin, un dernier objectif est d'établir un lien entre l'intensité d'infestation des parcelles par les adventices et les quantités de biomasses récoltées pour les cultures de l'année en cours.

4. Matériel et méthodes

4.1. Rotations

EcoFoodSystem vise, à travers la mise en place de rotations innovantes, à étudier la durabilité et la résilience des systèmes agricoles afin de répondre aux recommandations de la Commission EAT-Lancet pour assurer les besoins alimentaires de la population. L'essai s'intéresse également aux possibilités de relocalisation des systèmes alimentaires en minimisant les surplus (exportations possibles) et les déficits (importations nécessaires) des productions destinées à l'alimentation humaine et animale issues des rotations.

Les quatre rotations expérimentées décrites ci-dessous sont établies pour une durée de 8 ans, répétées minimum deux fois au cours de l'essai qui couvrira, donc, au moins, une période de 16 ans. Celles-ci ont été conçues de manière à être optimisées en minimisant les excès (exportations) et les déficits (importations) par rapport à la diète EAT-Lancet avec ou sans produits animaux.

- **Rotation 1 - BAU (Business As Usual)**
Rotation de référence conformément à la surface agricole utile (SAU) de la région, recourant aux herbicides de synthèse selon les bonnes pratiques agricoles et qui intègre les animaux à travers les apports de fumier et les exportations de co-produits agricoles (Figure 2 A). Dans cette rotation, l'application d'herbicides chimiques de synthèse est autorisée.
- **Rotation 2 - BAU_HF (Business As Usual Herbicide Free)**
Rotation identique à la rotation BAU mais dans laquelle aucun pesticide chimique de synthèse n'est appliqué. Le désherbage est effectué de manière mécanique (Figure 2 A).
- **Rotation 3 - ICLS (Integrated Crop-Livestock System)**
Rotation de type agroécologique intégrant cultures et élevage au sein de laquelle le bétail, dans ce cas les ovins, pâture les prairies temporaires à la bonne saison et les intercultures. Les moutons servent, ainsi, de moyen de gestion des adventices, de fertilisation et permettent la valorisation des co-produits. Cette rotation est gérée sans aucun pesticide chimique de synthèse et désherbée mécaniquement (Figure 2 B).
- **Rotation 4 - Vegan**
Rotation correspondant au régime végétarien dans laquelle le bétail est absent, dont la production agricole est destinée exclusivement à l'alimentation humaine et qui ne bénéficie pas de fertilisation par le fumier. Le désherbage est mécanique et il n'y a pas de recours aux pesticides chimiques de synthèse (Figure 2 B).

La Figure 2 illustre les rotations testées sur 8 ans avec les cultures et intercultures qui les composent. L'essai, débuté en 2020-2021, étudie chaque année les rotations à deux temporalités différentes. La première temporalité correspond aux cultures mises en place en année 1 et la seconde à celles établies en années 5. En 2020-2021, les cultures des années 1 (betterave, caméline et maïs) et 5 (colza) ont été implantées. Ensuite, ont été établies, en 2021-2022, celles des années 2 (froment d'hiver) et 6

(froment-pois et froment d’hiver) et, en 2022-2023, celles des années 3 (pomme de terre, féverole) et 7 (maïs, pois et prairie temporaire). Pendant la période 2023-2024, l’essai considère en temporalité 1 (année 4) les cultures de froment d’hiver et en temporalité 2 (année 8), les cultures de froment d’hiver, d’avoine et des prairies temporaires pâturées par des moutons. Préalablement à l’établissement initial de l’essai, toutes les surfaces ont été cultivées avec du froment d’hiver dans un but d’homogénéisation. De plus, pour servir de référence interne, le froment d’hiver revient de façon régulière, environ tous les deux ans, simultanément, dans presque toutes les rotations.

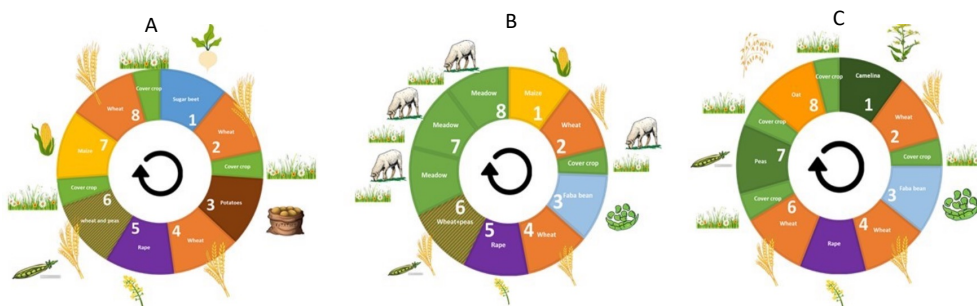


Figure 2. Rotation BAU et BAU_HF (A), ICLS (B) et Vegan (C) de l’essai EcoFoodSystem. Les numéros dans les rotations correspondent aux années.

4.2. Dispositif expérimental

Les parcelles de l’essai disposées sur une surface de 30 hectares se situent en région agricole de Hesbaye à Gembloux (50°33'37.3"N 4°41'36.6"E) plus précisément rue du Bordia. La carte numérique des sols de Wallonie classe les sols des parcelles cultivées comme limoneux à drainage naturel favorable (Géoportail de la Wallonie, March-17-2024). Gembloux est soumis à un climat de type tempéré océanique (“Le climat en Belgique,” May-14-2024). Depuis 1833, en 2024, l’hiver a représenté le troisième le plus humide et le printemps le plus humide jamais enregistrés. Les précipitations cumulées pour ces deux saisons (593,9 mm), constituent un record absolu (Figure 3). Le printemps 2024 a également été plus sombre que la moyenne (IRM, 2024).

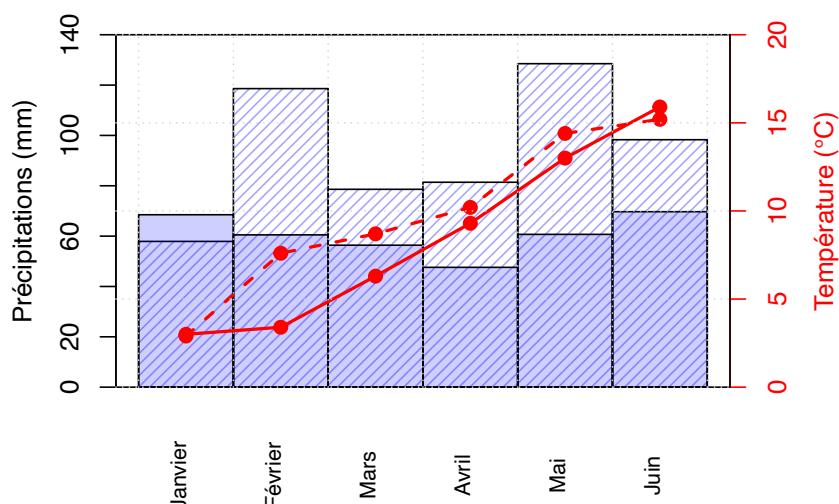


Figure 3. Diagramme ombrothermique concernant les températures et précipitations moyennes de Gembloux pour les mois de janvier à juin de la période entre 1991-2020 (bleu foncé et rouge continu) et de l’année 2024 (bleu hachuré et rouge discontinu) (“IRM - Climat dans votre commune,” March-16-2024; “Agromet.be,” June-30-2024).

Les parcelles de l’essai sont aléatoirement réparties en 4 blocs de 84 m x 144 m chacun au sein desquels le sol est considéré comme homogène (Figure 4 et annexe 1). La largeur de chaque bloc est

bordée d'une bande fleurie dont la composition figure à l'annexe 2. A l'intérieur des blocs sont délimitées 8 parcelles brutes chacune mesurant 84 m x 18 m et comprenant une parcelle nette de 42m x 15m, dans laquelle les opérations culturales sont considérées comme homogènes. De plus, chaque parcelle est divisée dans le sens de la longueur pour délimiter deux zones différenciées. La première admet des tests destructifs nécessaires à l'identification et au dénombrement de la flore adventice réalisée et la seconde n'autorise aucune manipulation destructive afin d'évaluer précisément le rendement (Figure 5). Chaque bloc contient donc une parcelle des quatre rotations en temporalité 1 et une autre des mêmes rotations en temporalité 2.

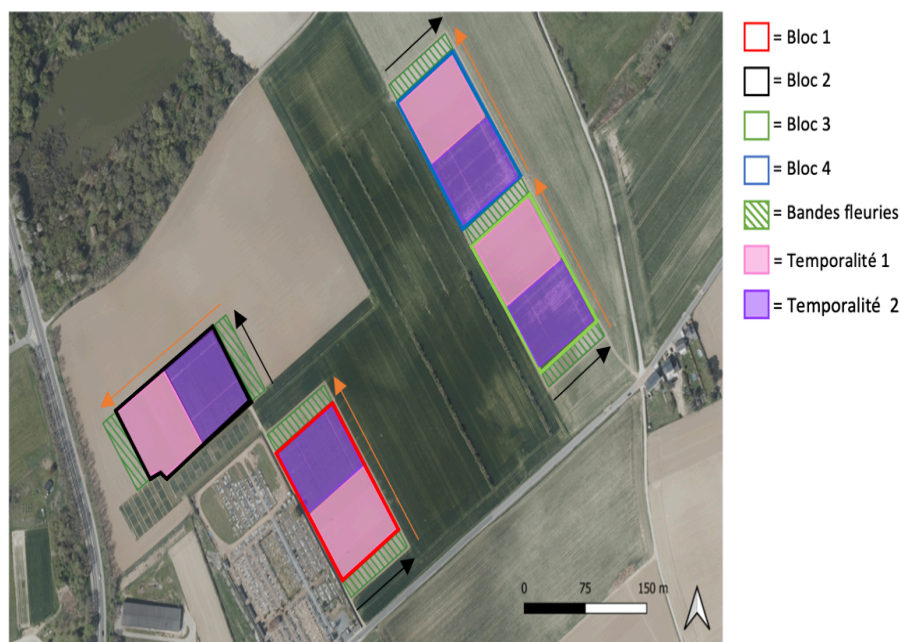


Figure 4. Localisation et organisation du dispositif expérimental.

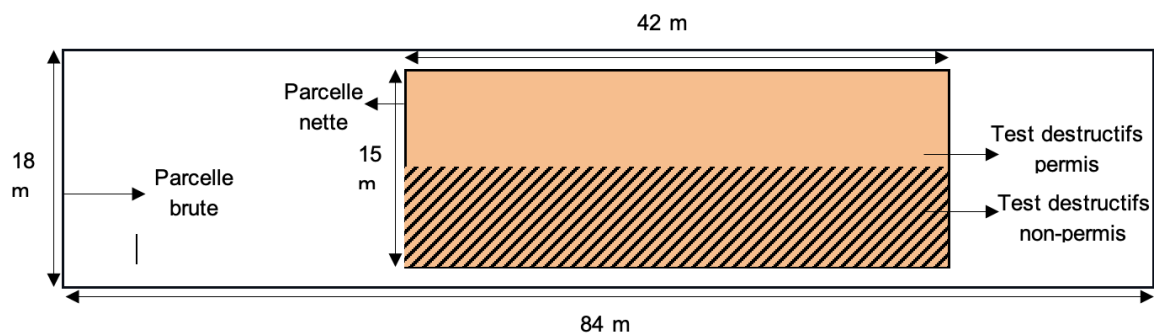


Figure 5. Schéma d'une parcelle expérimentale.

4.3. Étude de la flore potentielle

4.3.1. Prélèvement des échantillons

En accord avec le protocole établi dans le cadre d'EcoFoodSystem, l'échantillonnage systématique de sol a été effectué les 23/01/2024 et 24/01/2024. Dans chaque parcelle, dans la partie admettant des tests destructifs, cinq quadrats de 0,5 x 0,5 m² ont été définis selon un parcours en "W" avec une distance horizontale régulière entre les quadrats. Les centres de ces quadrats ont été localisés précisément par un GPS REACH RS+ au cours de la première année de l'expérimentation et adoptent

la même position tout au long de l'essai. A chaque coin des quadrats, une carotte de sol a été extraite à l'aide d'une tarière de 2 cm de diamètre et de 25 cm de long. Les quatre prélèvements provenant d'un quadrat ont été considérés comme un seul échantillon. Au total, 160 échantillons ont été stockés en chambre froide de 4°C pendant 33 jours pour favoriser la levée de dormance par vernalisation des semences.

4.3.2. Mise en culture

Les échantillons, après un passage au tamis de maille de 0,5 cm de diamètre, ont été placés dans des bacs non perforés de 25x37x6 cm préalablement pourvus d'un lit de billes d'argex de 2,5 cm d'épaisseur, ensuite d'une toile de jute coupée à dimension et pour finir d'une couche de terreau universel de 1 cm d'épaisseur. A deux coins de chaque bac, formant une diagonale, un tube vertical de PVC de 4,5 cm ou 7 cm de long et de 3,2 de diamètre relie la surface et le fond du bac et permet, ainsi, un arrosage par le bas (Figure 6 et Figure 7). Ces différentes opérations ont été réalisées du 16/02 au 22/02/2024 et l'expérimentation, qui s'est tenue du 04/03/2024 au 14/06/2024, a débuté avec un arrosage par le bas et par le haut au brumisateuse des échantillons placés dans les bacs disposés aléatoirement dans le laboratoire. Afin de vérifier l'absence de semences de plantules dans le terreau employé, deux bacs témoins sans échantillon de terre extérieure ont été ajoutés.

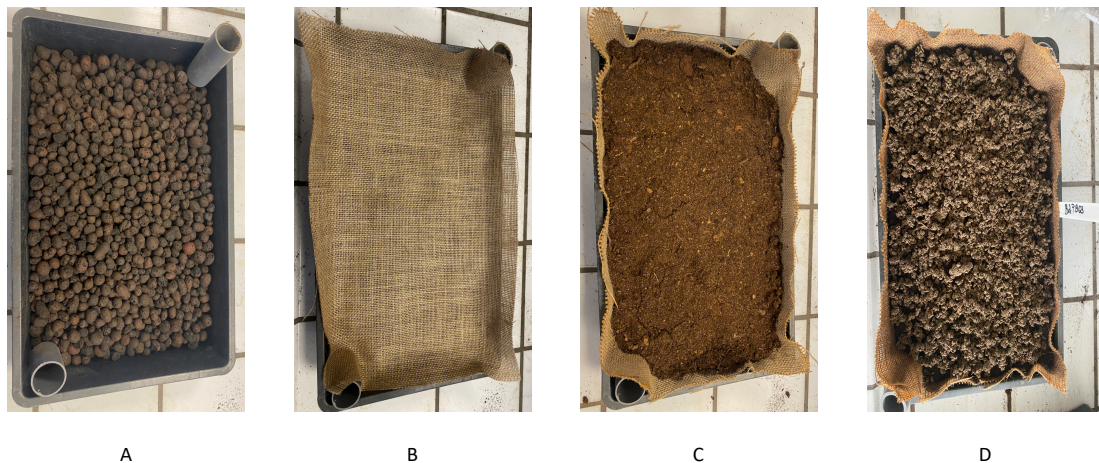


Figure 6. Photos des étapes de la mise en culture des échantillons de sol. A : Tubes de PVC et billes d'argex, B : toile de jute, C : terreau universel et D : échantillon de sol.

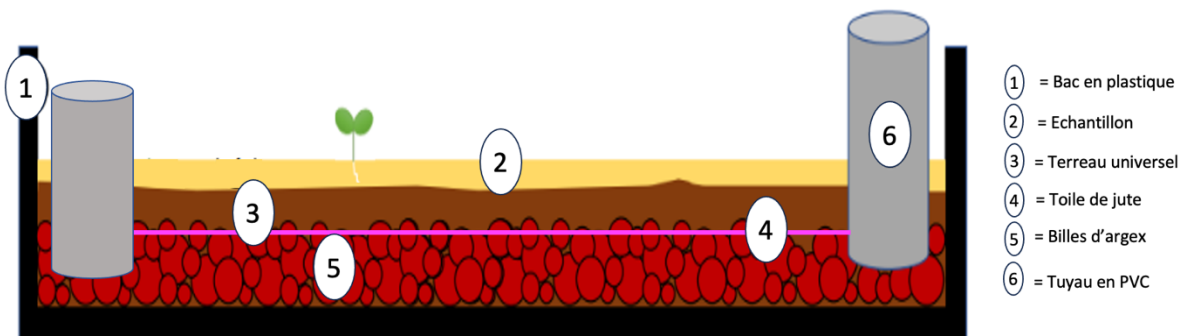


Figure 7. Schéma d'un bac pour le suivi de la flore potentielle.

4.3.3. Suivi en laboratoire

Le suivi de la flore potentielle a été réalisé dans un des laboratoires de l'unité Biodiversité, Ecosystème et Paysage de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. Dans ce local à température ambiante, l'éclairage artificiel a été assuré cinq jours par semaine de 8h à 17h. Pour permettre le développement des organes reproductifs, un arrosage hebdomadaire de 200 ml d'eau de ville dans chaque tube de PVC de chaque bac a été garanti. De plus, afin de maintenir le terreau humide, un arrosage par brumisation a été effectué deux ou trois par semaine à intervalles réguliers. Le laboratoire présente une hétérogénéité au niveau de la lumière naturelle et artificielle. Pour pallier cet inconvénient, une réorganisation aléatoire des bacs a été opérée tous les 15 jours. Dans le but de stimuler la germination, un stress hydrique a été provoqué par l'arrêt de l'arrosage durant la semaine du 15/04 au 22/04/2024. Durant cette même période, le 17/04/2024, les échantillons de terre ont été émiétés manuellement pour faciliter la germination des semences.

Pour estimer la flore adventice potentielle, cette expérimentation recourt à la mise en germination des échantillons plutôt qu'à la détermination des espèces via l'observation directe des semences à l'aide d'un microscope binoculaire. Bien que la méthode d'extraction physique des graines offre plus de précision pour quantifier la richesse spécifique, la diversité et la densité des espèces d'adventices en détectant les graines viables et dormantes, la méthode indirecte choisie présente l'avantage d'être moins chronophage pour un nombre important d'échantillons et plus pratique pour comparer les traitements sur un essai de longue durée (Gonzalez et al., 2012; Reinhardt et al., 2018). En outre, la méthode d'émergence permet la détection d'une plus grande proportion d'espèces d'adventices à petites graines tandis que la méthode d'extraction détecte préférentiellement les espèces à graines plus volumineuses comme celles des arbres (Gonzalez et al., 2012).

Une fois par semaine, dans chaque bac, les adventices suffisamment développées pour permettre une identification, sont comptabilisées, retirées et encodées. Les plantules non identifiables sont transplantées dans un pot individuel en attendant l'apparition de caractères morphologiques discriminants et afin qu'elles n'entrent pas en concurrence pour les ressources avec les autres adventices du bac.

4.4. Suivi de la flore réalisée

4.4.1. Mise en place des quadrats

Sur chaque parcelle, dans la partie autorisant des tests destructifs, cinq quadrats de 0,5 x 0,5 m² ont été placés dans un rayon de 3m autour du point central d'échantillonnage pour la flore potentielle déterminé par le GPS. Les piquets servant à définir les quadrats ont été positionnés tant que possible sur les lignes de semis de manière à ne pas gêner les opérations de désherbage. Les quadrats comprennent quatre lignes de culture de céréales (Figure 8).

4.4.2. Premier comptage

Un premier comptage sur le terrain a été effectué avant la première opération de désherbage les 06/03, 07/03, 08/03 et 09/03/2024 lorsque le froment d'hiver se trouvait au stade 14 de l'échelle BBCH des céréales. Il a concerné toutes les parcelles de l'essai à l'exception des parcelles de la rotation Vegan en temporalité 2 destinées à la culture d'avoine. En effet, le semis de cette spéculature n'était pas encore réalisé à cette date. A l'intérieur de l'aire délimitée par chaque quadrat, les adventices présentes ont été identifiées, comptabilisées et encodées. En ce qui concerne l'avoine, le relevé a été réalisé le 28/5/24 au stade 21 de l'échelle BBCH.



Figure 8. Photo d'un quadrat utilisé pour le relevé des adventices aux champs et pour les prélèvements de sol en vue de l'étude de la flore potentielle en laboratoire.

4.4.3. Deuxième comptage

Selon la même méthode, le deuxième relevé au champ pour le froment d'hiver a été opéré du 14/06 au 28/06/2024, au stade BBCH 61 correspondant à la floraison. Après leur identification, leur dénombrement et leur encodage, les adventices ont été coupées à la base de la tige et mises dans des sachets par quadrat et par espèce. Une manipulation identique ainsi qu'une récolte a concerné les adventices des prairies temporaires. Pour le froment d'hiver, le nombre de tiges et d'épis par quadrat ont également fait l'objet d'un comptage et d'une récolte. Les biomasses récoltées ont ensuite été placées à l'étuve à 60°C pendant minimum 72h et les biomasses sèches résultantes ont été pesées à l'aide d'une balance de type Ohaus AdventurerPro précise à 0,01g.

4.5. Diversité des communautés

L'évaluation de la diversité alpha des communautés d'adventices a été réalisée par la détermination de la richesse spécifique et de la diversité spécifique à l'aide respectivement des indices non paramétriques de richesse spécifique (S) et des indices de Shannon (H), de Simpson (SI) et de Pielou (E). Pour compléter cette analyse, la densité spécifique et totale d'adventices ont également été établies. La diversité alpha d'un ensemble de populations se réfère à une échelle locale, à un habitat spécifique (Gardener, 2014).

4.5.1. Indice de richesse spécifique

La richesse spécifique (S) se rapporte au nombre d'espèces différentes se trouvant dans un milieu donné (Moore, 2001). L'échantillonnage, qui permet son estimation, peut introduire des biais, ne permettre qu'un recensement partiel des espèces faiblement représentées et conduire, ainsi, à une sous-évaluation de la richesse spécifique (Gwinn et al., 2016; Roswell et al., 2021).

4.5.2. Indices de diversité spécifique

- Indice de Shannon-Weaver (H)

Cet indice non paramétrique se base sur la richesse spécifique et sur l'abondance relative de chaque espèce dans l'échantillon (Shannon, 1948). Sa formule est la suivante :

$$H = 1 - \sum_{i=1}^S (p_i * \ln p_i)$$

Équation 1.

Avec S correspondant au nombre total d'espèces et p_i à la proportion relative des individus de l'espèce i dans l'échantillon. L'indice varie de 0 à $\ln S$; une valeur de H élevée indiquant une grande diversité spécifique dans la communauté.

Cet indice global accorde davantage d'importance aux espèces rares par rapport aux espèces abondantes mais ne favorise pas la comparaison entre des sites de différentes communautés (Konopiński, 2020).

- Indice de Simpson (SI)

L'indice non paramétrique de Simpson mesure la probabilité que deux individus tirés au hasard dans l'échantillon appartiennent à la même espèce (Simpson, 1949). En pratique, l'indice complémentaire (1-SI), allant de 0 à 1, est utilisé pour qu'une valeur élevée de l'indice soit associée à une grande diversité comme pour l'indice de Shannon-Weaver. Son équation est la suivante :

$$SI = \sum_{i=1}^S p_i^2$$

Équation 2.

Avec S correspondant au nombre total d'espèces et p_i à la proportion relative des individus de l'espèce i dans l'échantillon.

Cet indice, le moins biaisé parmi ces trois indices de diversité spécifique selon Mouillot et Lepêtre (1999), donne davantage de poids aux espèces abondantes qu'aux espèces rares et voit, donc, sa valeur peu influencée par la présence de ces dernières dans la communauté. Ainsi, il se prête mieux que l'indice de Shannon-Weaver à des comparaisons entre différents habitats ou écosystèmes (Konopiński, 2020).

- Indice de Pielou (E)

L'indice d'équitabilité de Pielou, souvent utilisé en association avec l'indice de Shannon, permet de mesurer l'uniformité de la répartition des individus entre les différentes espèces, de traduire degré de diversité d'une communauté et de comparer des dominances d'espèces entre communautés (Pielou, 1969; Ricotta et al., 2003). Il se calcule comme suit :

$$E = \frac{H}{\ln S}$$

Équation 3.

Avec H se référant à l'indice de Shannon et S à la richesse spécifique. Cet indice est compris entre 0 et 1, 1 caractérisant une parfaite équirépartition de l'abondance des individus entre les espèces (Pielou, 1969).

Il convient de remarquer que l'indice de Shannon et l'indice de Simpson sous-estiment la diversité spécifique et que l'indice de Pielou surestime l'équitabilité des espèces puisque la richesse spécifique est sujette à une sous-estimation (Mouillot et al., 1999).

4.6. Analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à aide du programme RStudio, version 2023.12, et des packages « ggplot2, vegan, lme4, pscl, car, emmeans, MASS, multcomp, multcompView, DHARMA, FactoMineR, glmmTMB, lmerTest, dplyr ».

Dans ces statistiques, le facteur bloc a été considéré comme aléatoire. En effet, les blocs ont été mis en place de façon à contrôler l'hétérogénéité de la surface totale de l'essai EcoFoodSystem. L'année et le type de rotation ont constitué des facteurs fixes.

Au niveau de la prise en compte de la notion de temporalité, les temporalités 1 et 2 ont été traitées séparément puisque ce travail s'inscrit dans la quatrième année de l'essai et que, dès lors, la rotation n'est pas encore complète. Dans l'optique d'une comparaison pluriannuelle, partie de ce travail, et puisque la flore potentielle permet d'étudier l'impact du précédent cultural sur l'évolution des communautés d'adventices, les deux temporalités ont fait l'objet d'une analyse pour la flore potentielle. Cependant, seule la temporalité 1 a été prise en compte dans l'analyse de la flore réalisée en raison de la différence de la nature des cultures dans les rotations de l'année 2022 et 2024.

Dans le but de comparer les années 2022 et 2024 selon leurs communautés d'adventices et afin de caractériser ces communautés, un échelonnage multidimensionnel non métrique (NMDS) a été opéré sur l'ensemble des données. Pour établir une éventuelle influence de l'année, du type de rotation et des blocs sur la structure des communautés d'adventices, une PERMANOVA a été utilisée.

Les données des comptages et concernant les biomasses à la base des analyses des indices de biodiversité ont été transposées en modèle linéaire à effet mixte (LMER) ou en modèle généralisé à effet mixte (GLMM) selon l'existence d'une distribution normale ou non des observations. La dispersion des résidus et la variance du modèle LMER ont permis la vérification de la normalité de la distribution. En présence d'une distribution non normale, une transformation racine carrée ou logarithmique a été testée et, en cas de poursuite de non normalité, un GLMM a été appliqué en considérant les données conformes à une distribution binomiale négative ou à une distribution β . Le modèle et les transformations nécessaires pour chaque variable figurent à l'annexe 3. Ensuite, une ANOVA a été réalisée pour les différents modèles. Face à une interaction significative ($p\text{-val} < 0,05$) entre les facteurs fixes, année et rotation, une décomposition des données selon le type de rotation a été effectuée afin de pouvoir étudier l'évolution des indices de biodiversité entre 2022 et 2024. Lorsqu'il n'apparaît pas d'interaction entre les facteurs fixes et qu'il existe une différence significative pour l'un ou les deux de ces facteurs, une comparaison post-hoc basée sur les moyennes marginales estimées a été réalisée à l'aide du package emmeans. Ce dernier permet d'effectuer des comparaisons par paires et de déterminer les différences significatives entre les niveaux de facteurs.

L'évaluation de la nuisibilité des adventices sur la culture a été réalisée à l'aide des prélèvements effectués à floraison du froment, pour chaque rotation, via une corrélation entre la biomasse totale des adventices et la biomasse de la culture.

5. Résultats

Dans cette partie, seuls sont présentés les résultats présentant des différences significatives entre les modalités des facteurs étudiés. L'ensemble des résultats figure aux annexes 4,5,6 et 7. Les codes EPPO correspondant aux espèces considérées dans ce mémoire sont repris à l'annexe 8.

5.1. Flore potentielle

5.1.1. Temporalité 1

5.1.1.1. Structure des communautés

La Figure 9 représente le résultat de l'analyse NMDS (stress=0,1737) caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 et en 2024 selon les rotations et les blocs en temporalité 1. L'analyse PERMANOVA réalisée permet de constater que les blocs, l'année et les rotations influencent significativement la structure des communautés d'adventices (respectivement p-val=0,001 ; 0,001; 0,001). Ainsi, l'observation montre, dans l'ensemble, une plus grande hétérogénéité de la structure des communautés en 2024 par rapport à 2022 surtout en ce qui concerne la rotation BAU. La rotation Vegan constitue une exception et manifeste une plus petite hétérogénéité en 2024 qu'en 2022. Au niveau des espèces, certaines permettent la distinction des différentes communautés entre les rotations telles l'arroche hastée (ATXHA), le laitron des champs (SONAR) et le panic pied-de-coq (ECHCG).



Figure 9. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) en temporalité 1 pour la flore potentielle.

5.1.1.2. Évolution des indices de biodiversité

La Figure 10 renseigne la densité relative moyenne d'adventices par espèce en fonction de l'année et des rotations en temporalité 1 pour la flore potentielle. Les espèces présentant une densité relative moyenne inférieure à 5% sont regroupées dans la catégorie « Autres ». Ainsi, le chénopode (CHEAL) apparaît dans toutes les rotations et constitue l'espèce dont la proportion a le plus augmenté entre 2022 et 2024. Entre ces années, la proportion de matricaire camomille (MATCH) reste identique ou diminue.

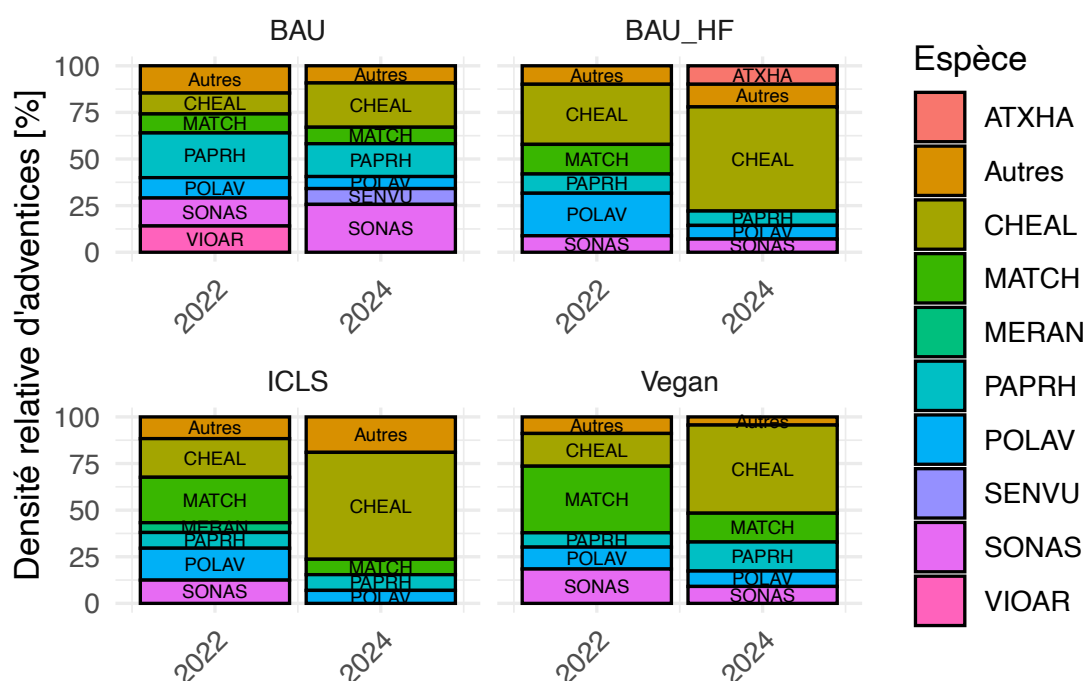


Figure 10. Graphique présentant la densité relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation en temporalité 1 pour la flore potentielle.

Le Tableau 1 synthétise les résultats des analyses ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité. Il révèle que, tant les rotations et les années influencent individuellement significativement la densité totale d'adventices, la richesse spécifique et l'indice de Shannon.

Tableau 1. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité en temporalité 1 pour la flore potentielle. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur < 0,05 ; ** : p-valeur < 0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.

Facteur	Densité	Richesse	Shannon	Simpson	Pielou
Rotation	***	***	***	/	/
Année	***	***	*	/	/
Rotation*Année	/	/	/	/	/

La Figure 11 montre une augmentation significative ($p\text{-val}=2,2 \cdot 10^{-6}$) de la densité totale moyenne d'adventices entre l'année 2022 et 2024. En ce qui concerne la densité totale moyenne d'adventices, la rotation BAU présente la valeur la plus faible, la rotation ICLS une valeur intermédiaire, non significativement différente des valeurs des rotations BAU_HF et Vegan et la rotation Vegan affiche une valeur plus élevée que celle de la rotation BAU_HF ($p\text{-val}=3,344 \cdot 10^{-10}$).

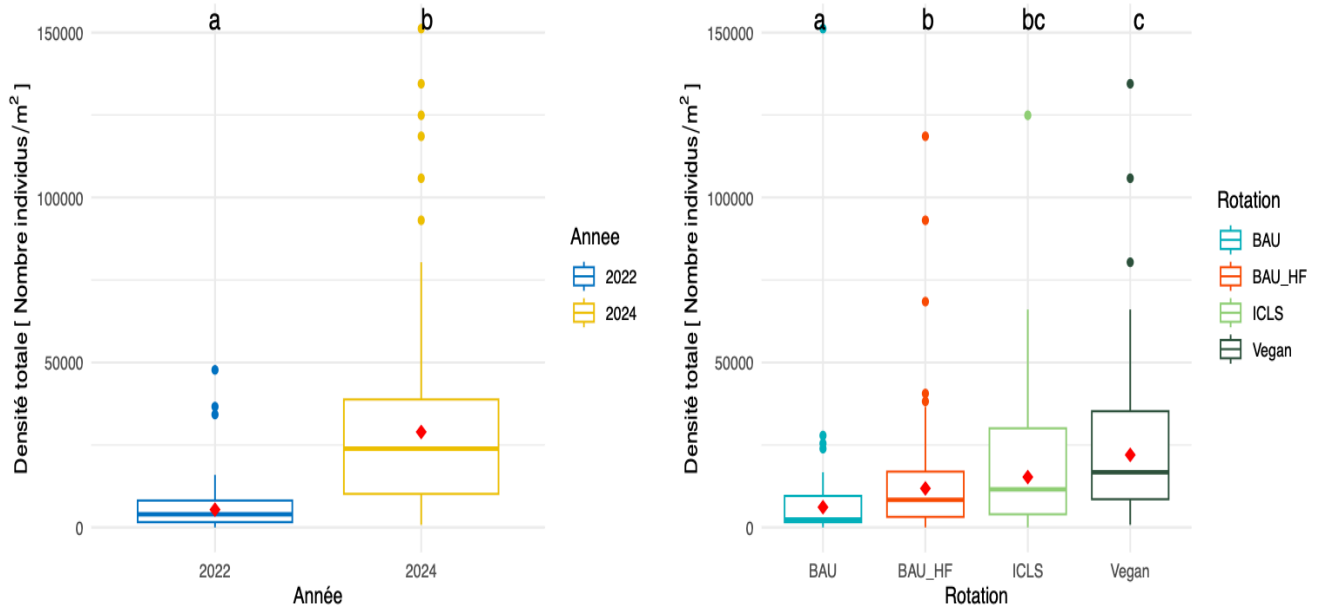


Figure 11. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et de la rotation (à droite) sur la densité totale d'adventices en temporalité 1 pour la flore potentielle. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.

La Figure 12 met en évidence l'augmentation significative de la richesse spécifique moyenne entre l'année 2022 et 2024 ($p\text{-val}=3,474 \cdot 10^{-6}$) et les niveaux de richesse spécifique moyenne selon les rotations. Ainsi, au niveau du nombre d'espèces présentes, la rotation BAU apparaît avec un nombre différent, plus petit, de celui des rotations ICLS et Vegan, la rotation BAU_HF avec un nombre inférieur à celui de la rotation Vegan et, enfin, les rotations BAU_HF et ICLS avec un nombre intermédiaire, non significativement différent de ceux des rotations BAU et Vegan ($p\text{-val}= 1,022 \cdot 10^{-10}$).

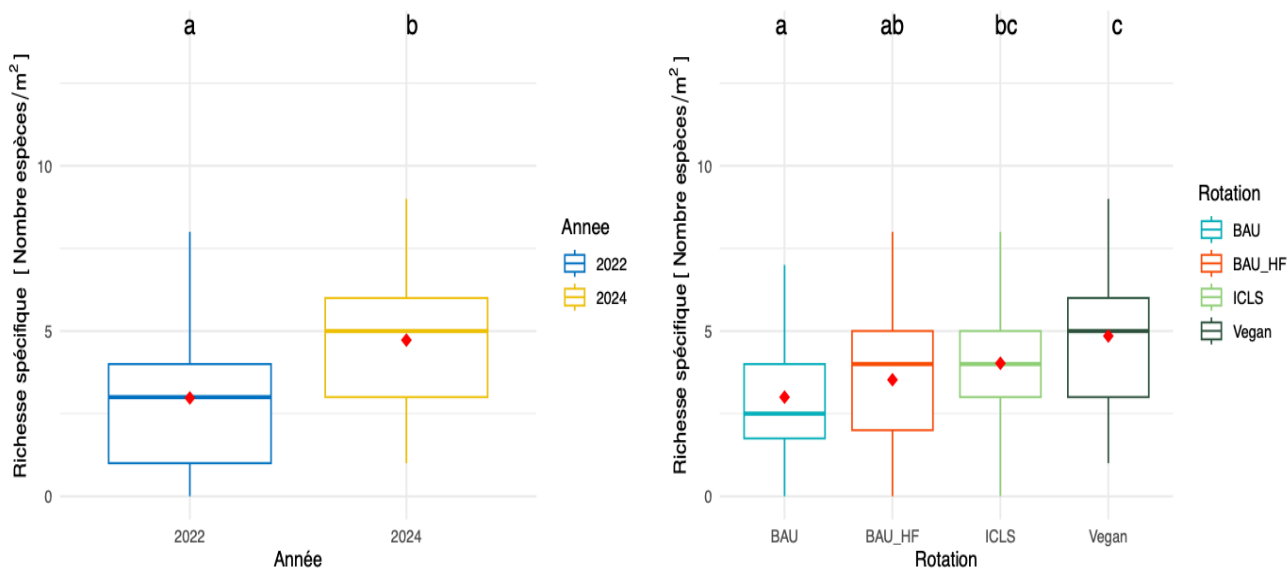


Figure 12. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et de la rotation (à droite) sur la richesse spécifique en temporalité 1 pour la flore potentielle. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.

La Figure 13 expose une augmentation significative de l'indice de biodiversité de Shannon moyen entre l'année 2022 et 2024 ($p\text{-val}=0,01081$). Au niveau des rotations, la valeur de l'indice de Shannon moyen se distingue pour les rotations BAU et BAU_HF par rapport à celui de la rotation Vegan. La rotation ICLS présente une valeur intermédiaire, non significativement différente des valeurs des rotations BAU, BAU_HF, et Vegan ($p\text{-val}=0,0001509$).

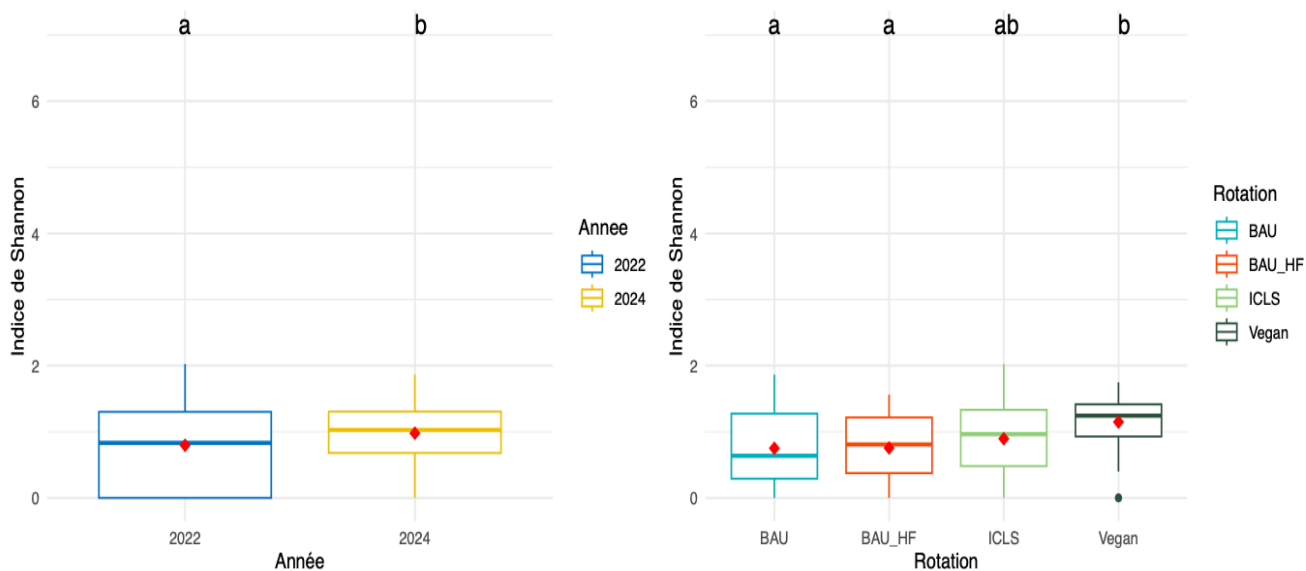


Figure 13. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur l'indice de Shannon en temporalité 1 pour la flore potentielle. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.

5.1.2. Temporalité 2

5.1.2.1. Structure des communautés

La Figure 14 présente le résultat de l'analyse NMDS (stress=0,2097) caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 et 2024 selon les rotations et les blocs en temporalité 2. Elle montre une plus grande différenciation de la structure des communautés d'adventices selon les rotations en 2024 par rapport à 2022. L'analyse PERMANOVA réalisée permet de conclure que les blocs, l'année et les rotations influencent significativement la structure des communautés d'adventices (respectivement p-val=0,001; 0,001 ;0,001). Les espèces qui permettent de différencier les différentes communautés selon les rotations sont notamment le rumex crépu (RUMCR), le colza (BRSNN), le chrysanthème des moissons (CHYSE), la véronique des champs (VERAR) et l'arroche hastée (ATXHA).

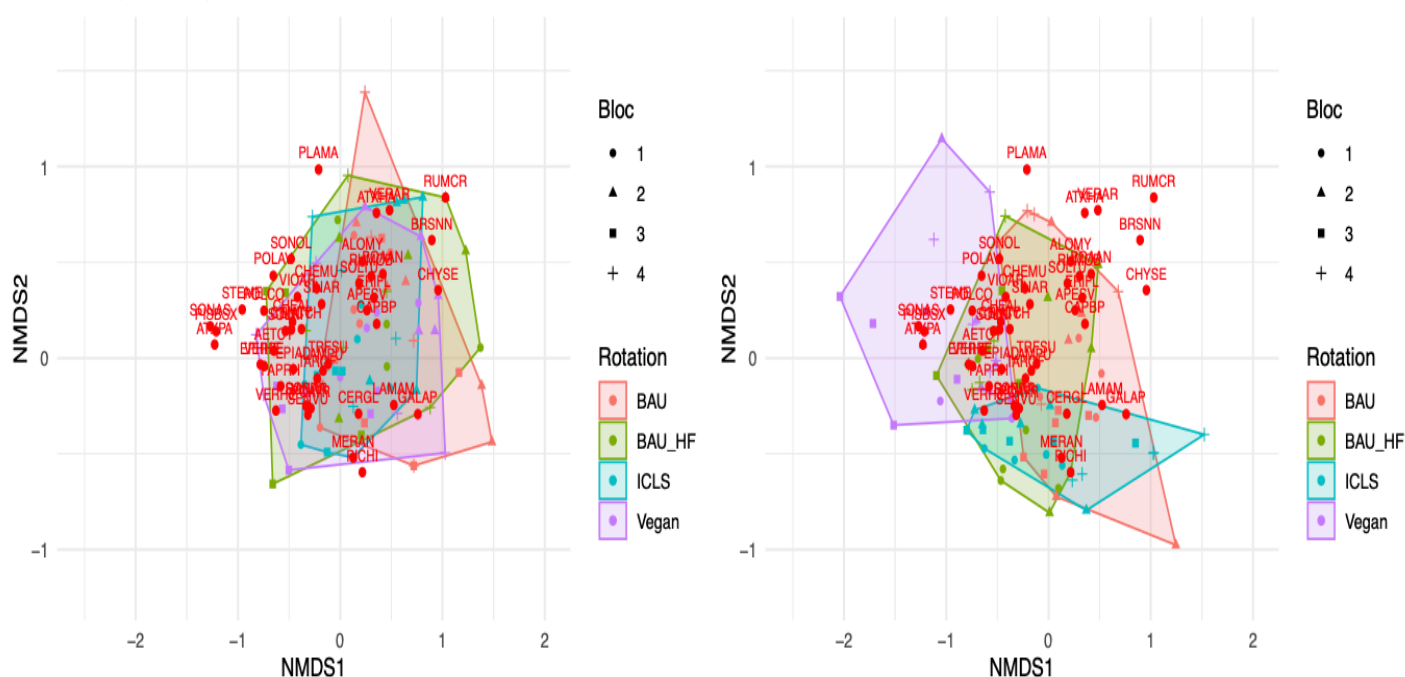


Figure 14. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) en temporalité 2 pour la flore potentielle.

5.1.2.2. Évolution des indices de biodiversité

Le Tableau 2 récapitule le résultat des analyses ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité. Il révèle que les rotations et les années influencent conjointement significativement la densité totale d'adventices, la richesse spécifique et l'indice de Shannon. L'indice de Pielou est, pour sa part, influencé par la rotation et l'année de manière séparée.

Tableau 2. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité en temporalité 2 pour la flore potentielle. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.

Facteur	Densité	Richesse	Shannon	Simpson	Pielou
Rotation	***	***	**	/	***
Année	***	/	/	/	***
Rotation*Année	***	***	*	/	/

La Figure 15 renseigne la densité relative moyenne d'adventices par espèce en fonction de l'année et des rotations en temporalité 2 pour la flore potentielle. Les espèces présentant une densité relative moyenne inférieure à 5% sont regroupées dans la catégorie « Autres ». L'espèce la plus représentée dans toutes les rotations est le coquelicot (PAPRH) et sa proportion augmente entre les années 2022 et 2024. Dans la rotation Vegan, entre les années 2022 et 2024, l'augmentation du laiteron rude (SONAS) apparaît la plus marquée.

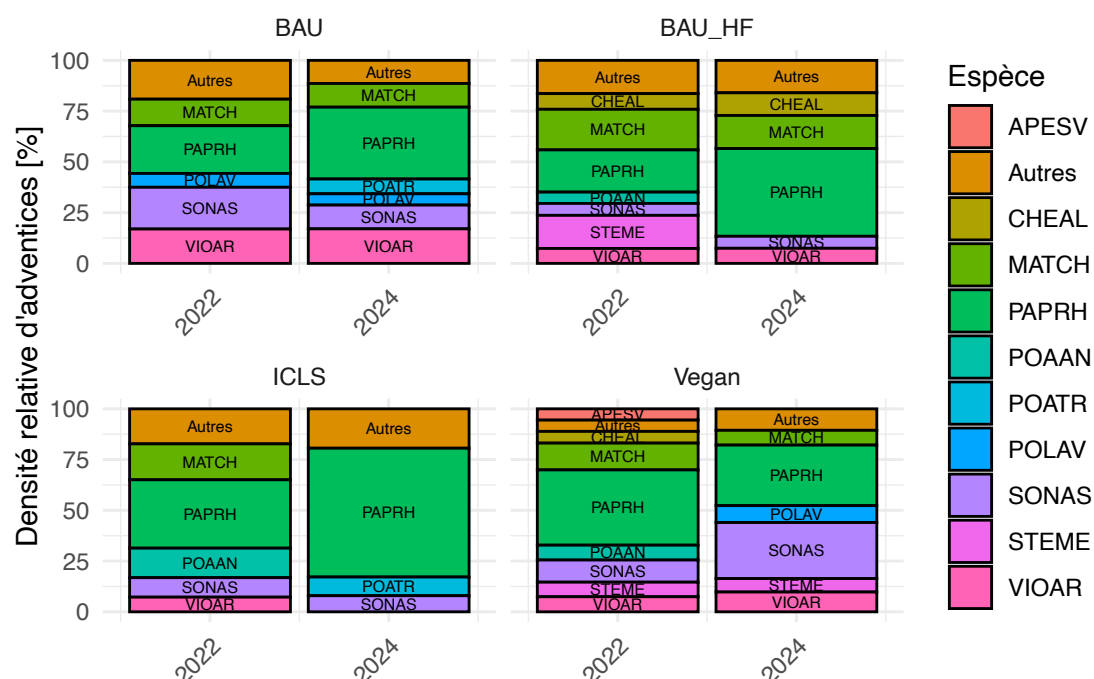


Figure 15. Graphique présentant la densité relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation en temporalité 2 pour la flore potentielle.

La Figure 16 indique l'influence de l'année sur les différentes rotations au niveau de la densité totale moyenne d'adventices ($p\text{-val}=2,546 \cdot 10^{-7}$). Il permet de constater l'augmentation significative de la densité totale moyenne d'adventices pour les rotations BAU ($p\text{-val}=0,03455$), BAU_HF ($p\text{-val}=0,0005796$) et Vegan ($p\text{-val}=1,009 \cdot 10^{-7}$) entre 2022 et 2024. Pour la rotation ICLS, il n'y a pas de différence significative pour la densité totale d'adventices entre les deux années. Ce graphique montre également l'influence de l'année sur les quatre rotations en ce qui concerne la richesse spécifique moyenne ($p\text{-val}=0,0003984$). Ainsi, la rotation Vegan voit sa richesse spécifique moyenne augmenter entre 2022 et 2024 ($p\text{-val}=4,297 \cdot 10^{-5}$) tandis que la rotation ICLS accuse une diminution de cette valeur entre les deux années ($p\text{-val}=0,007337$). Les rotations BAU et BAU_HF ne manifestent pas d'augmentation significative.

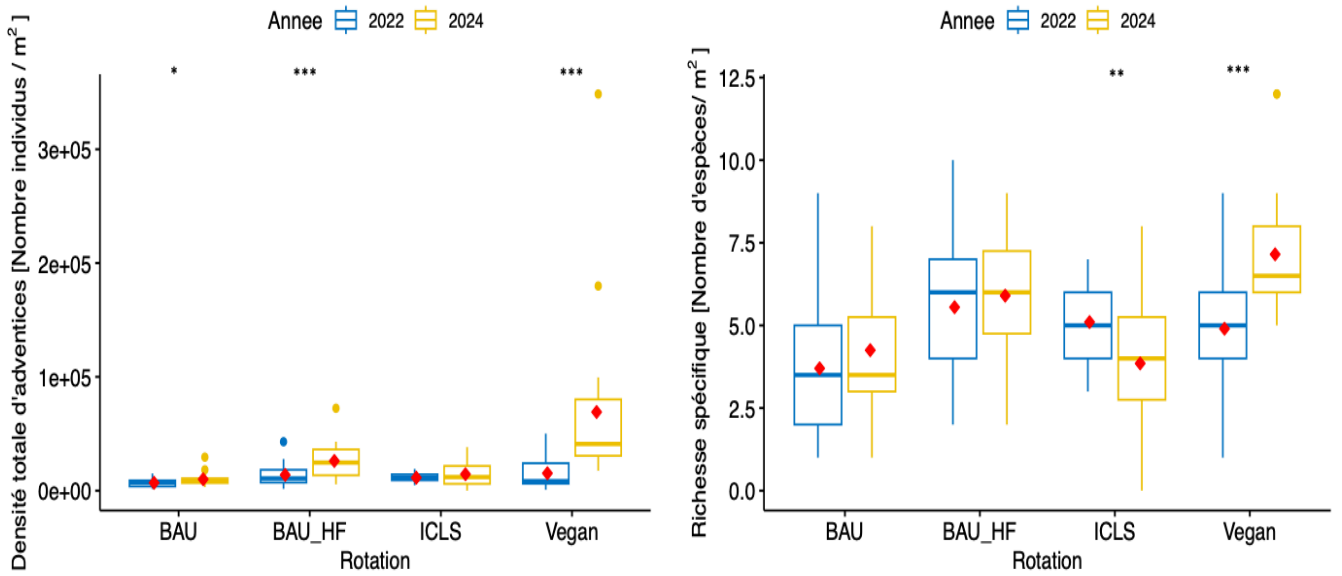


Figure 16. Graphique représentant l'influence de l'année sur les différentes rotations pour la densité totale d'adventices (à gauche) et pour la richesse spécifique (à droite) en temporalité 2 pour la flore potentielle.

La Figure 17 présente l'influence de l'année sur les différentes rotations pour l'indice de biodiversité de Shannon moyen ($p\text{-val}=0,01166$). La valeur de cet indice diminue de façon significative pour la rotation ICLS ($p\text{-val}=0,0001717$). Pour les rotations BAU, BAU_HF et Vegan aucun changement significatif n'est constaté pour cet indice.

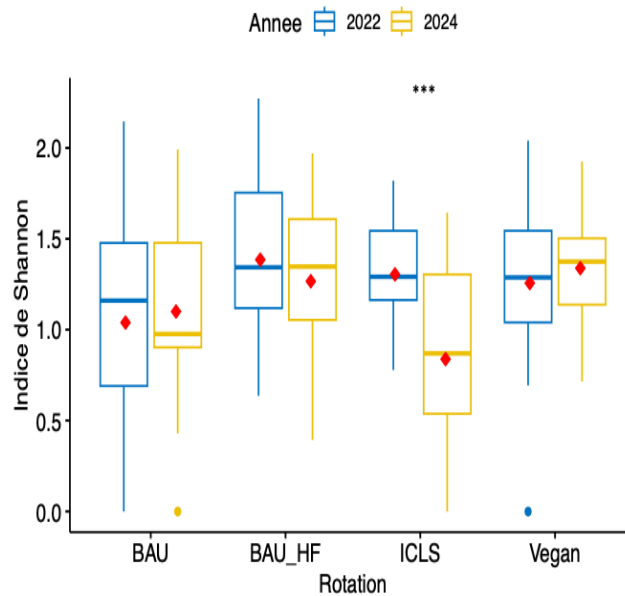


Figure 17. Graphique représentant l'influence de l'année sur les différentes rotations pour l'indice de Shannon en temporalité 2 pour la flore potentielle.

La Figure 18 présente l'influence de l'année et, d'autre part, des rotations sur l'indice de biodiversité de Pielou moyen. Cet indice diminue significativement ($p\text{-val}=4,863 \cdot 10^{-11}$) en 2024 par rapport à 2022. L'indice de Pielou présente une valeur distincte pour la rotation BAU par rapport aux rotations ICLS et Vegan et une valeur intermédiaire, non significativement différente des valeurs des rotations BAU et les rotations ICLS et Vegan ($p\text{-val}=0,0001309$).

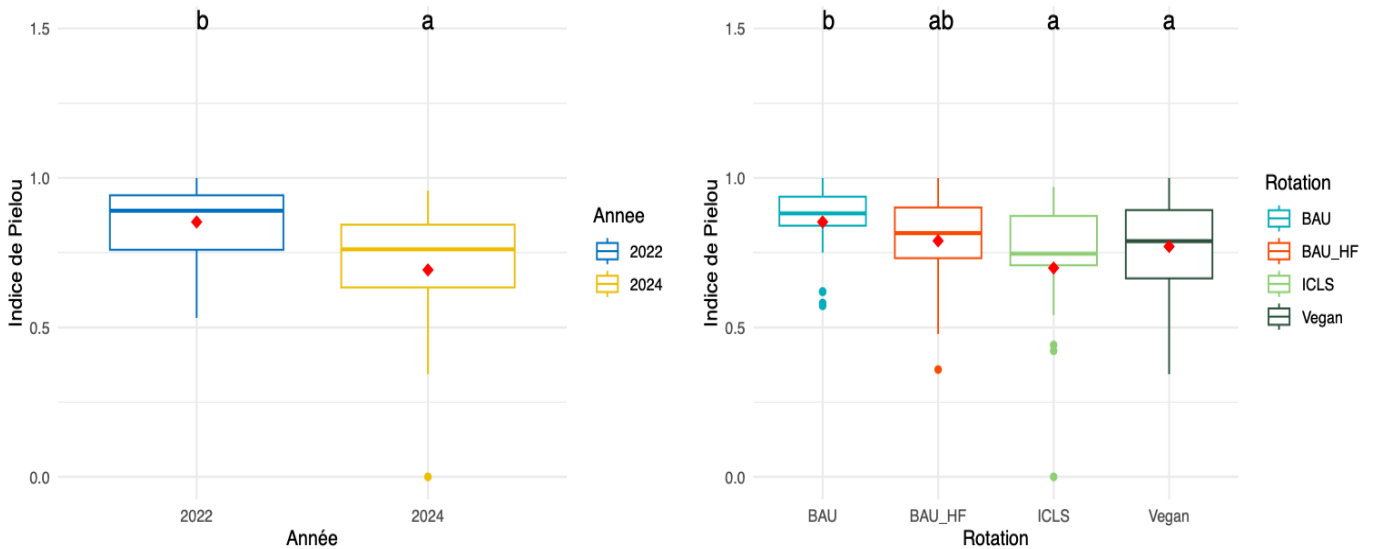


Figure 18. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et de la rotation (à droite) sur l'indice de Pielou en temporalité 2 pour la flore potentielle. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.

5.2. Flore réalisée

5.2.1. 1^{er} comptage

5.2.1.1. Structure des communautés

La Figure 19 présente le résultat de l'analyse NMDS ($\text{stress}=0,1736$) caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 et 2024 selon les rotations et les blocs. La structure des communautés d'adventices de la rotation ICLS apparaît plus homogène en 2024 par rapport à 2022. L'analyse PERMANOVA réalisée permet de conclure que les blocs, l'année et les rotations influencent significativement la structure des communautés d'adventices (respectivement $p\text{-val}=0,0001$; $0,001$; $0,002$). L'espèce qui permet le mieux de différencier les différentes communautés d'adventices selon les rotations est le pois (PIBSX).

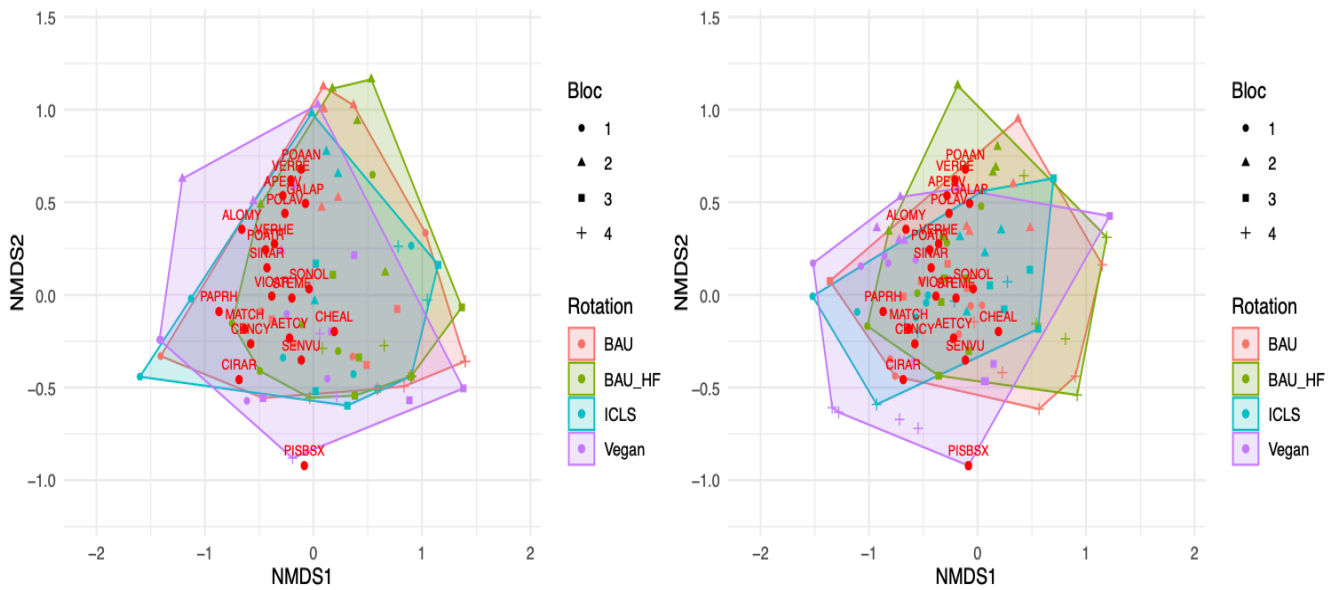


Figure 19. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) au 1^{er} comptage pour la flore réalisée en temporalité 1.

5.2.1.2. Évolution des indices de biodiversité

Le Tableau 3 récapitule les résultats des analyses ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité. Il révèle que les rotations et les années influencent séparément significativement la densité totale d'adventices et la richesse spécifique. Les indices de Shannon, Simpson et Pielou sont, quant à eux, influencés uniquement par l'année.

Tableau 3. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité au 1^{er} comptage pour la flore réalisée en temporalité 1. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur < 0,05 ; ** : p-valeur < 0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.

Facteur	Densité	Richesse	Shannon	Simpson	Pielou
Rotation	***	**	/	/	/
Année	***	***	***	***	***
Rotation*Année	/	/	/	/	/

La Figure 20 renseigne la densité relative moyenne d'adventices par espèce en fonction de l'année et des rotations au 1^{er} comptage de la flore réalisée. Les espèces présentant une densité relative moyenne inférieure à 5% sont regroupées dans la catégorie « Autres ». Le coquelicot (PAPRH) représente l'espèce la plus abondante. L'agrostis jouet du vent (APESV) est présent à plus de 5% de la densité totale d'adventices en 2022 et se retrouve dans la catégorie « Autres » (moins de 5% de la densité totale d'adventices) en 2024.

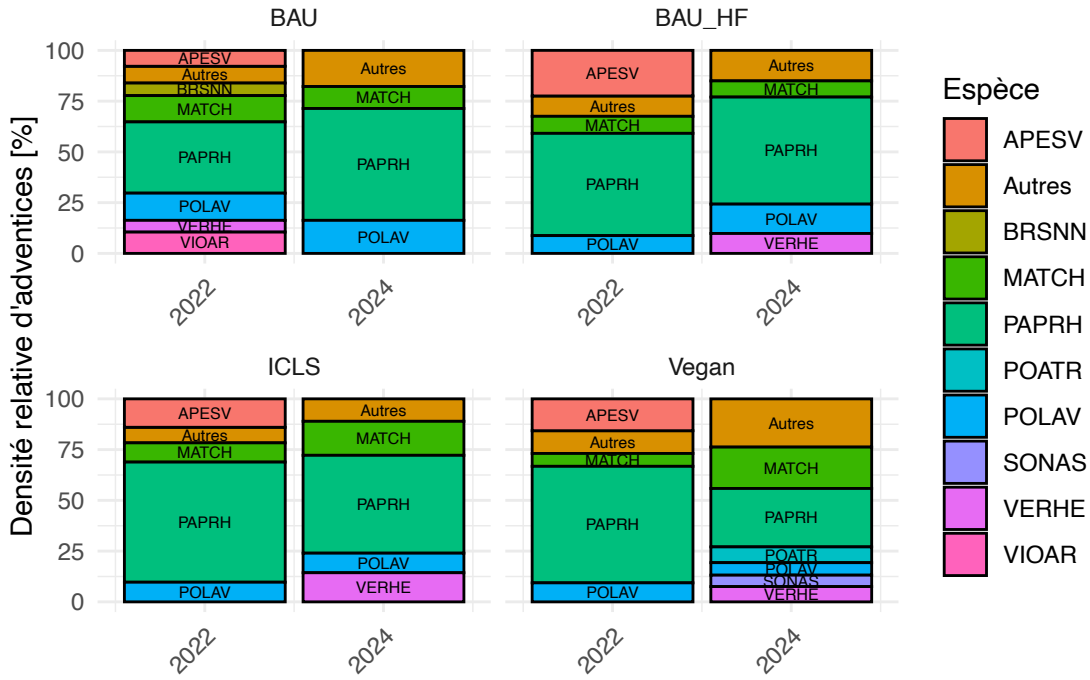


Figure 20. Graphique présentant la densité relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation au 1^{er} comptage de la flore réalisée en temporalité 1.

La Figure 21 présente l'augmentation significative de la densité totale moyenne d'adventices entre les années 2022 et 2024 ($p\text{-val} = 2,325 \cdot 10^{-7}$) et la densité totale moyenne d'adventices par rotation ($p\text{-val} = 2,325 \cdot 10^{-7}$). La rotation Vegan affiche une densité totale moyenne d'adventices supérieure aux trois autres rotations, qui elles, présentent la même.

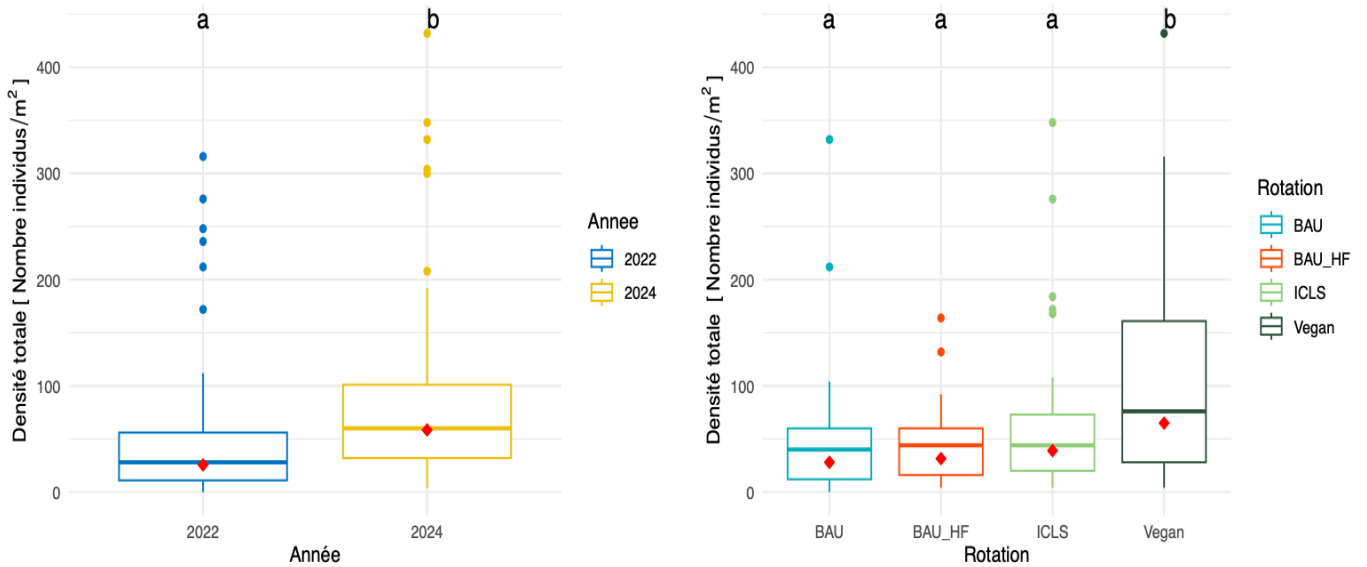


Figure 21. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur la densité totale d'adventices au 1^{er} comptage de la flore réalisée en temporalité 1. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.

La Figure 22 indique une augmentation significative de la richesse spécifique moyenne d'adventices entre 2022 et 2024 ($p\text{-val} = 3,446 \cdot 10^{-13}$). Pour la richesse spécifique moyenne, il s'observe une valeur distincte pour la rotation BAU par rapport aux rotations ICLS et Vegan et, pour la rotation BAU_HF, une valeur intermédiaire, non significativement différente des valeurs des rotations BAU d'un côté et des rotations ICLS et Vegan de l'autre côté ($p\text{-val}=0,001507$).

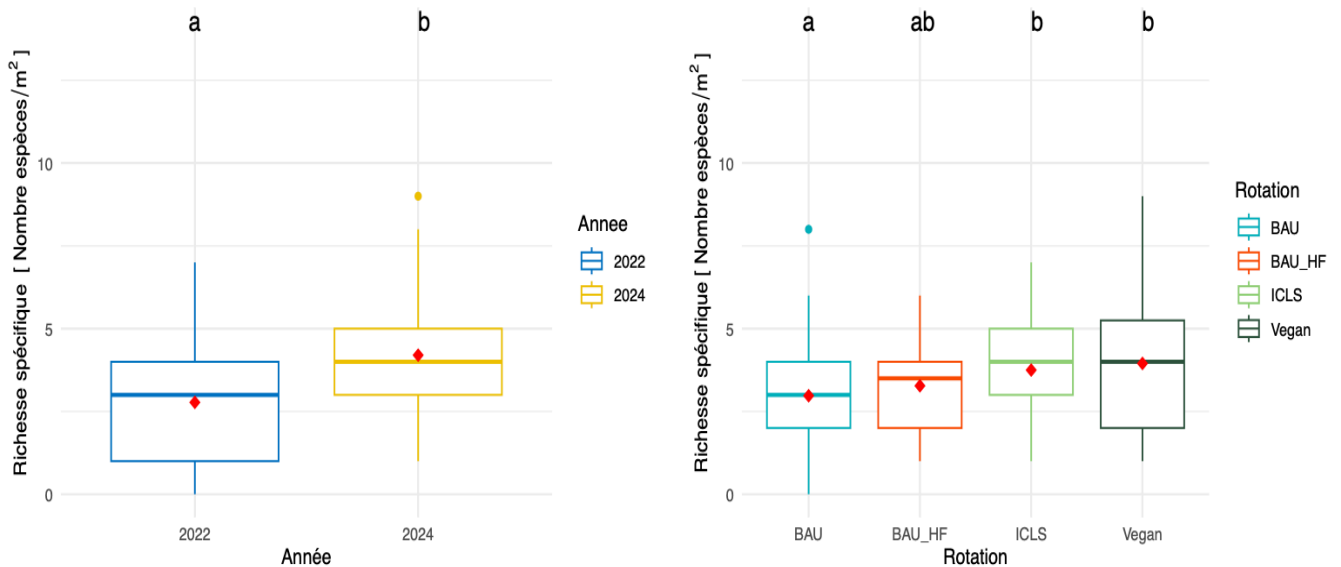


Figure 22. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur la richesse spécifique au 1er comptage de la flore réalisée en temporalité 1. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.

La Figure 23 représente l'augmentation significative de l'indice de biodiversité de Shannon moyen entre les années 2022 et 2024 ($p\text{-val}=2,01 \cdot 10^{-9}$).

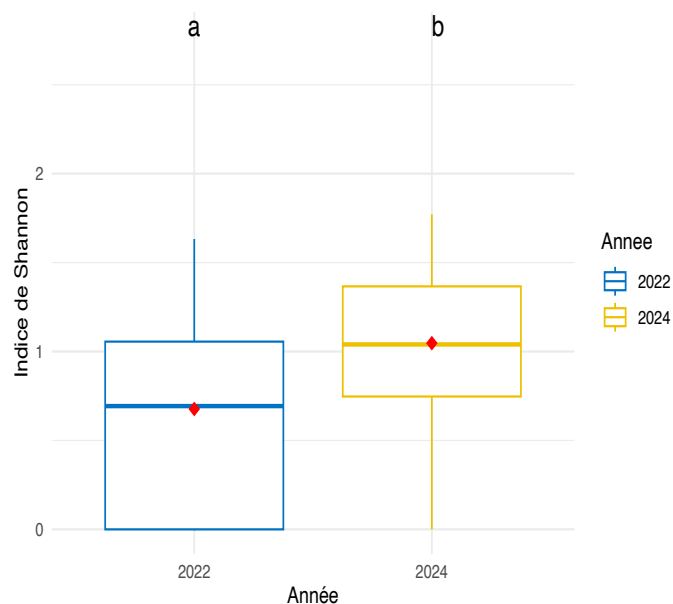


Figure 23. Influence de l'année sur l'indice de Shannon au 1er comptage de la flore réalisée en temporalité 1.

La Figure 24 montre une augmentation significative de l'indice de biodiversité moyen de Simpson entre les années 2022 et 2024 ($p\text{-val}=1,847 \cdot 10^{-5}$) et une augmentation significative de l'indice de biodiversité de Pielou entre ces mêmes années ($p\text{-val}=9,18810^{-5}$).

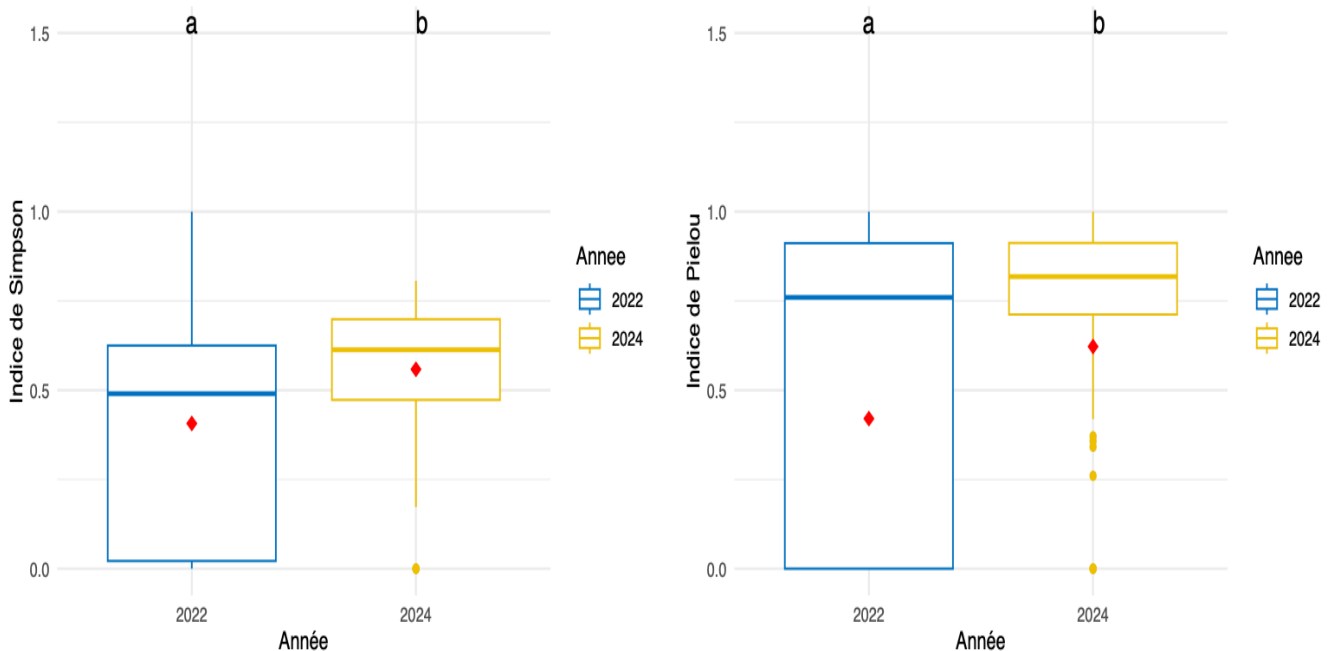


Figure 24. Graphique représentant l'influence de l'année sur l'indice de Simpson (à gauche) et de Pielou (à droite) au 1er comptage de la flore réalisée en temporalité 1.

5.2.2. 2^{ème} comptage

5.2.2.1. Structure des communautés

La Figure 25 présente le résultat de l'analyse NMDS (stress= 0,1728062) caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 et 2024 selon les rotations et les blocs. La structure des communautés d'adventices de la rotation ICLS apparaît plus hétérogène et celle de la rotation BAU plus différenciée des autres rotations en 2024 par rapport à 2022. L'analyse PERMANOVA réalisée permet de conclure que les blocs, l'année et les rotations influencent significativement la structure des communautés d'adventices (respectivement $p\text{-val}=0,0001$; $0,001$; $0,001$). Pour permettre la différenciation des différentes communautés d'adventices selon les rotations, il apparaît trois groupes d'espèces comprenant notamment pour le premier le chénopode blanc (CHEAL) et la mercuriale annuelle (MERAN), pour le deuxième le pissenlit (TAROF) et le laiteron rude (SONOL) et pour le troisième la folle-avoine (AVEFA) et le vulpin des champs (ALOMY).

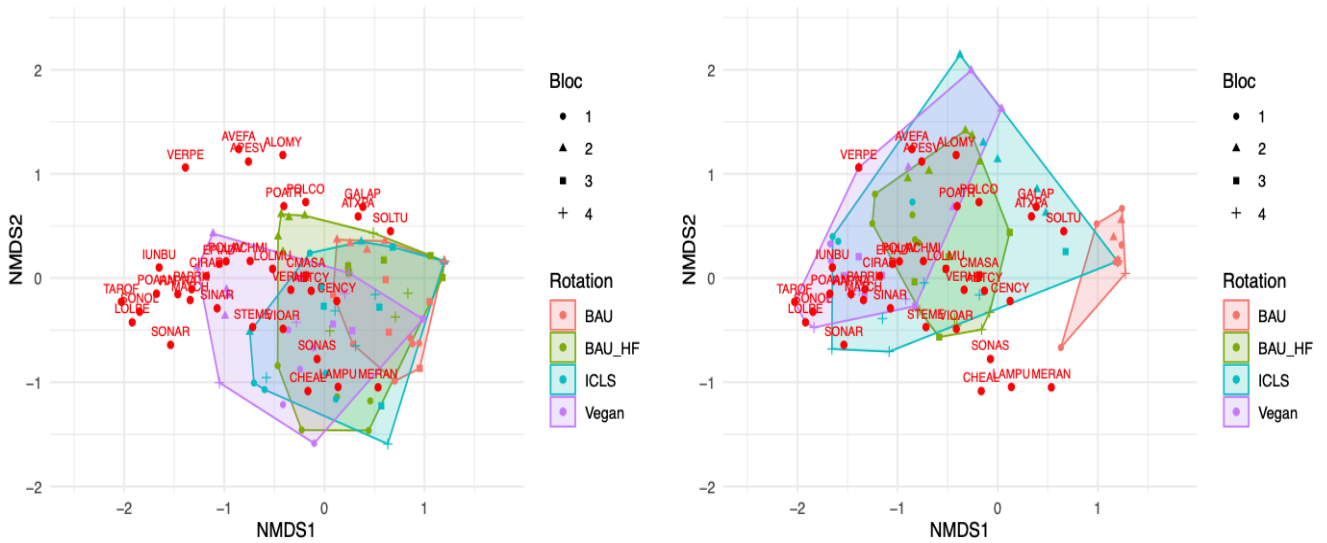


Figure 25. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) au 2ème comptage pour la flore réalisée en temporalité 1.

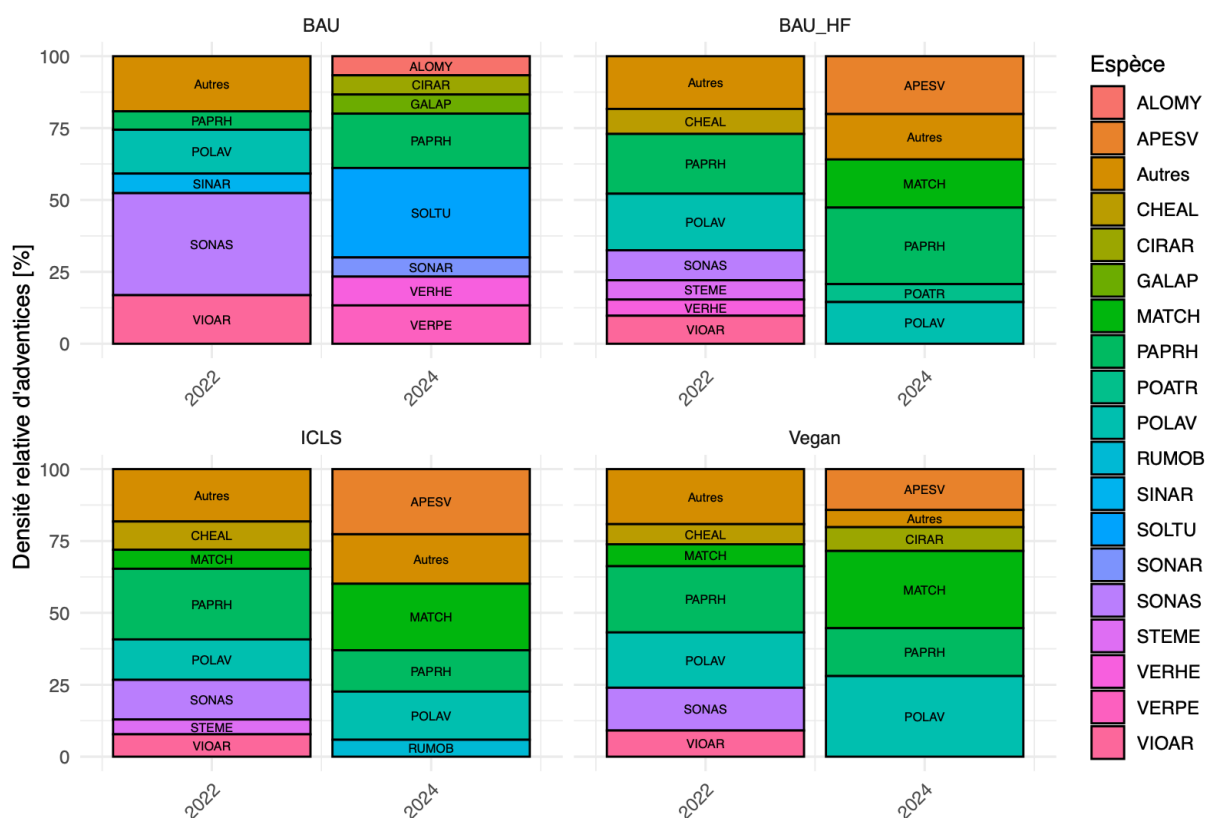
5.2.2.2. Évolution des indices de biodiversité

Le Tableau 4 synthétise les résultats des analyses ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité. Il montre que les rotations et les années influencent conjointement significativement la densité totale d'adventices, la richesse spécifique et l'indice de Shannon. L'indice Pielou est uniquement dépendant de l'année.

Tableau 4. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité au 2ème comptage pour la flore réalisée en temporalité 1. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur < 0,05 ; ** : p-valeur < 0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.

Facteur	Densité	Richesse	Shannon	Simpson	Pielou
Rotation	***	***	***	/	***
Année	/	/	/	/	*
Rotation*Année	***	***	***	/	/

La Figure 26 renseigne la densité relative moyenne d'adventices par espèce en fonction de l'année et des rotations au 2^{ème} comptage de la flore réalisée. Les espèces présentant une densité relative moyenne inférieure à 5% sont regroupées dans la catégorie « Autres ». La pomme de terre (SOLTU) est présente dans la rotation BAU en 2024 par rapport à 2022. Entre ces deux années, la proportion de laiteron rude (SONAS) apparaît en diminution et celle de l'agrostis jouet du vent en augmentation.



La Figure 27 expose l'influence de l'année sur les différentes rotations au niveau de la densité totale moyenne d'adventices ($p\text{-val}=4,976 \cdot 10^{-7}$). Elle permet de constater l'augmentation significative de la densité totale moyenne d'adventices pour les rotations BAU ($p\text{-val}=1,065 \cdot 10^{-5}$), BAU_HF ($p\text{-val}=6,107 \cdot 10^{-9}$), ICLS ($p\text{-val}= 0,0457$) et Vegan ($p\text{-val}=1,814 \cdot 10^{-7}$) entre 2022 et 2024. Ce graphique montre également l'influence de l'année sur les quatre rotations en ce qui concerne la richesse spécifique moyenne ($p\text{-val}=1,072 \cdot 10^{-6}$). Ainsi, la rotation BAU_HF présente une augmentation de sa richesse spécifique moyenne entre 2022 et 2024 ($p\text{-val}= 8,928 \cdot 10^{-5}$) alors que la rotation BAU affiche une diminution de cette valeur entre les deux années ($p\text{-val}=8,928 \cdot 10^{-5}$). Les rotations ICLS et Vegan ne manifestent pas d'augmentation significative.

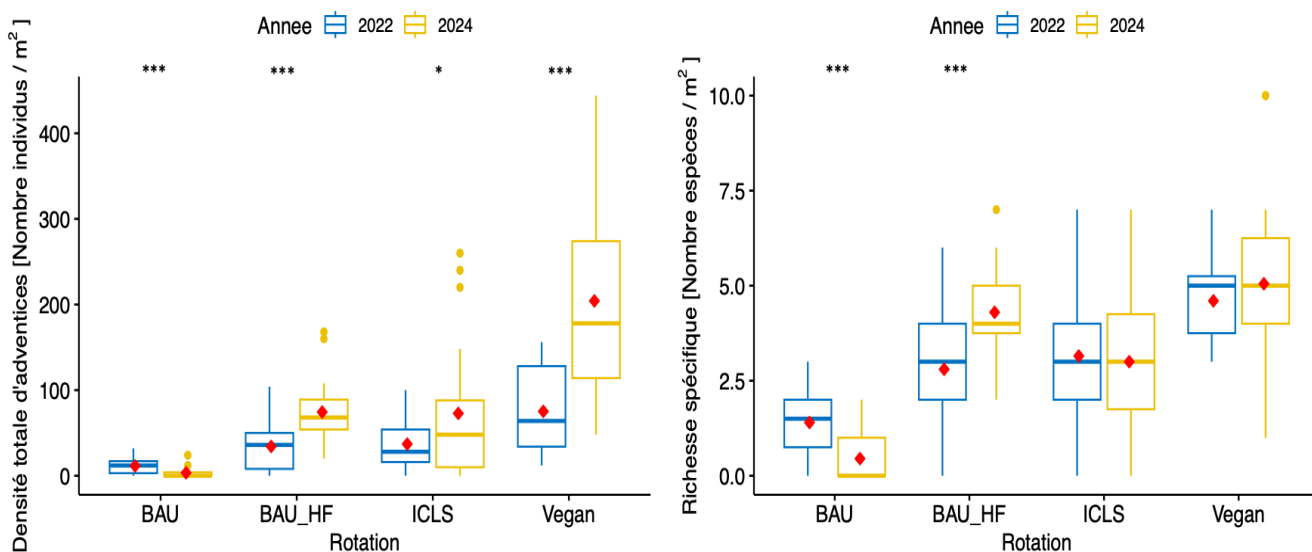


Figure 27. Graphique représentant l'influence de l'année sur les différentes rotations pour la densité (à gauche) et la richesse spécifique (à droite) au 2ème comptage de la flore réalisée en temporalité 1.

La Figure 28 présente l'influence de l'année sur les différentes rotations pour l'indice de biodiversité moyen de Shannon ($p\text{-val}=4,976 \cdot 10^{-7}$). Entre 2022 et 2024, pour la rotation BAU_HF, la valeur de cet indice augmente significativement ($p\text{-val}=1,686 \cdot 10^{-5}$) tandis qu'elle diminue significativement pour la rotation BAU ($p\text{-val}= 6, 611 \cdot 10^{-5}$). Il n'est pas observé de modification significative de cet indice pour les rotations ICLS et Vegan entre ces deux années.

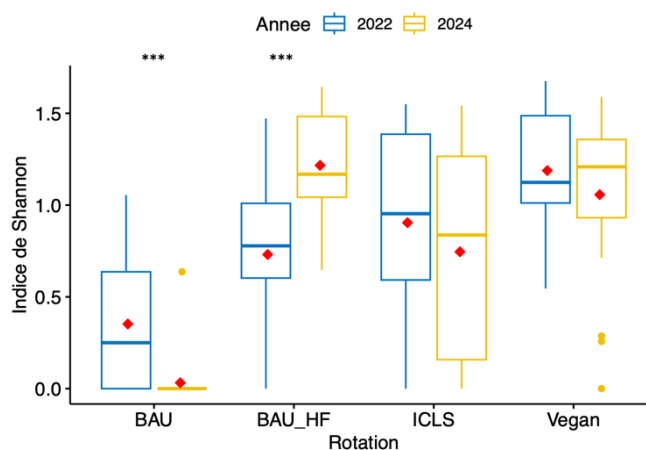


Figure 28. Graphique représentant l'influence de l'année sur les différentes rotations pour l'indice de Shannon au 2ème comptage de la flore réalisée en temporalité 1.

La Figure 29 montre une diminution significative de l'indice de biodiversité de Pielou moyen entre 2022 et 2024 ($p\text{-val} = 0,03159$) et la présence de la valeur de l'indice de Pielou moyen la plus petite en rotation BAU et la plus élevée pour les trois autres rotations ($3,833 \cdot 10^{-11}$).

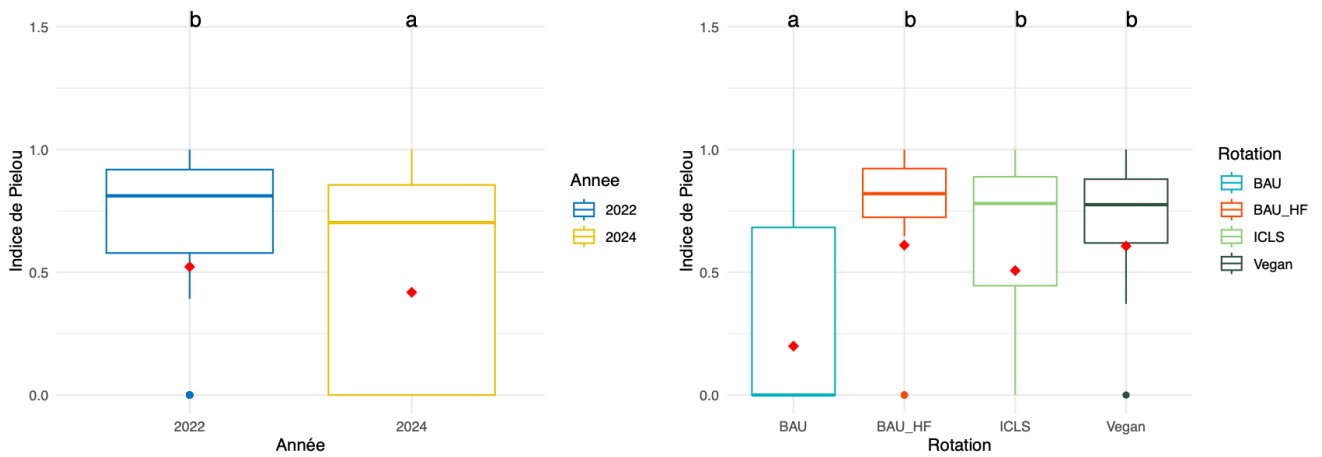


Figure 29. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur l'indice de Pielou au 2ème comptage de la flore réalisée en temporalité 1. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.



Figure 30. Illustrations de la présence d'adventices dans les parcelles à la floraison du froment en temporalité 1. De gauche à droite et de haut en bas : bloc 2 rotation BAU_HF, bloc 1 ligne de séparation entre les rotations BAU (à gauche) et BAU_HF (à droite), bloc 3 rotation Vegan, bloc 3 rotation ICLS, bloc 3 rotation ICLS, bloc 4 rotation Vegan.

5.2.3. Biomasse

5.2.3.1. Structure des communautés

La Figure 31 expose le résultat de l'analyse NMDS (stress= 0,1843947) caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 et 2024 selon les rotations et les blocs. Les structures des communautés d'adventices des rotations apparaissent plus hétérogènes, à l'égard de ce paramètre, à l'exception de la rotation BAU qui présente une homogénéité plus grande entre 2022 et 2024. Cette dernière rotation se différencie par rapport aux trois autres rotations en 2024. L'analyse PERMANOVA réalisée permet de conclure que les blocs, l'année et les rotations influencent significativement la structure des communautés d'adventices (respectivement p-val=0,0001 ;0,001 ;0,001). Les espèces qui permettent la différenciation des communautés d'adventices sont représentées notamment par le bleuet (CENCY), l'agrostis jouet du vent (ASPEV) et le ray-grass (LOLMU).

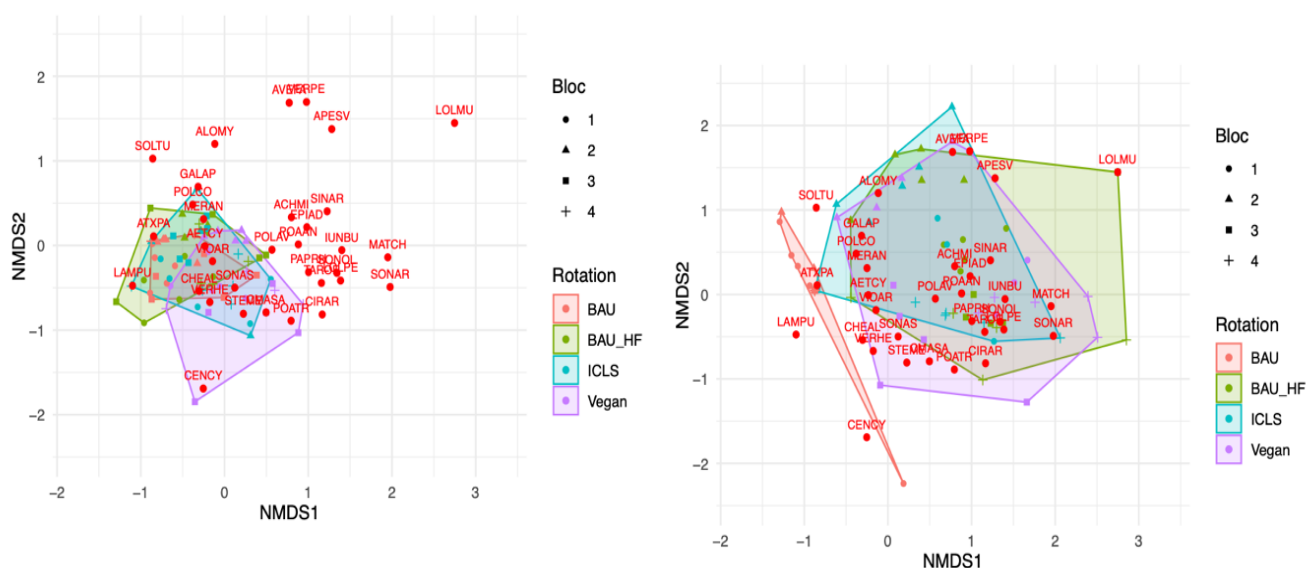


Figure 31. Graphique représentant la NMDS caractérisant la structure des communautés d'adventices en 2022 (à gauche) et en 2024 (à droite) lors de l'étude de la biomasse de la flore réalisée en temporalité 1.

5.2.3.2. Évolution des indices de biodiversité

Le Tableau 5 rassemble les résultats des analyses ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité. Il montre que les rotations et les années influencent conjointement significativement la biomasse totale d'adventices. Seul l'indice de Pielou dépend de l'année et de la rotation de manière séparée.

Tableau 5. Tableau récapitulatif des analyses des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations et des années sur les indices de biodiversité au 2^{ème} comptage pour la biomasse en temporalité 1. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.

	Biomasse	Pielou
Rotation	***	***
Année	***	***
Rotation*Année	***	/

La Figure 32 renseigne la biomasse relative moyenne d'adventices, par espèce, en fonction de l'année et des rotations. Les espèces présentant une densité relative moyenne inférieure à 5% sont regroupées dans la catégorie « Autres ». La pomme de terre (SOLTU) et l'agrostis jouet du vent apparaissent dans la rotation BAU en 2024 par rapport à 2022 dans une proportion supérieure à 5% de la biomasse totale d'adventices. Entre ces deux années, la proportion de laiteron rude (SONAS) apparaît en diminution. Dans les rotations non traitées chimiquement, il s'observe une augmentation de la proportion de matricaire camomille (MATCH) entre 2022 et 2024.

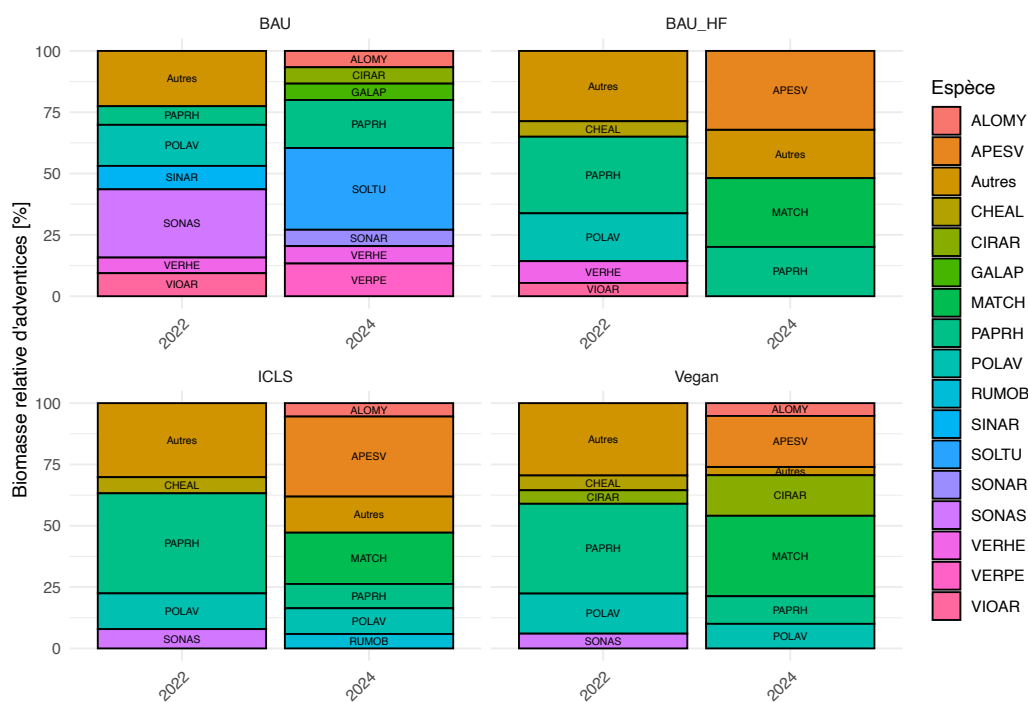


Figure 32. Graphique présentant la biomasse relative des différentes espèces d'adventices par année et par rotation lors de l'étude de la biomasse en temporalité 1.

La Figure 33 montre une augmentation significative de la biomasse totale d'adventices moyenne entre l'année 2022 et 2024 pour les rotations BAU_HF ($p\text{-val}=2,537 \cdot 10^{-9}$), ICLS ($p\text{-val}=0,01873$) et Vegan ($p\text{-val}=2,782 \cdot 10^{-5}$). La rotation BAU, quant à elle, ne présente pas de changement significatif au niveau de la biomasse.

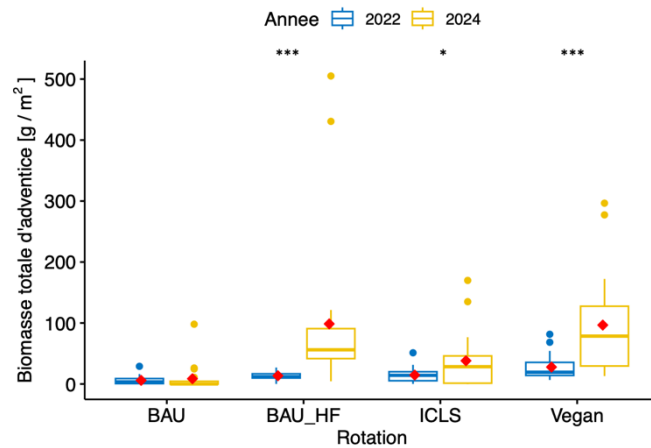


Figure 33. Graphique représentant l'influence de l'année et des rotations sur la biomasse totale d'adventices pour la flore réalisée en temporalité 1.

La Figure 34 indique une diminution significative de l'indice de biodiversité de Pielou moyen entre 2022 et 2024 ($p\text{-val} = 6,865 \cdot 10^{-11}$) et la présence de la valeur de l'indice de Pielou moyen la plus petite en rotation BAU et la plus élevée pour les trois autres rotations qui, elles, présentent la même valeur ($p\text{-val}= 0,0001427$).

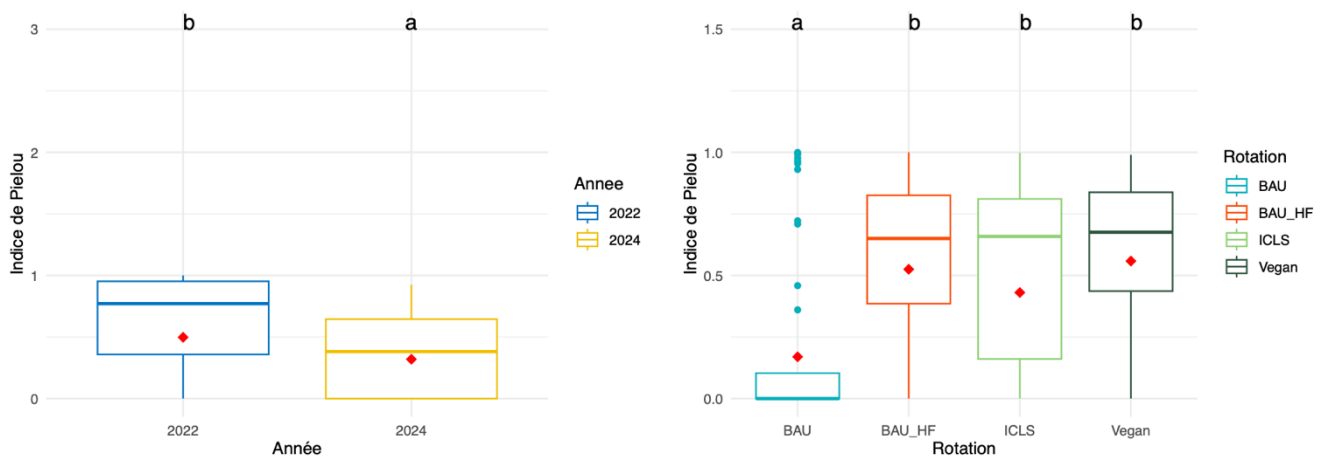


Figure 34. Graphique représentant l'influence de l'année (à gauche) et des rotations (à droite) sur l'indice de Pielou pour l'étude de biomasse de la flore réalisée en temporalité 1. Les modalités partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement pas distinctes selon le test emmeans.

Le Tableau 6 montre l'existence, en 2024, d'une corrélation négative significative entre la biomasse totale d'adventices et la biomasse totale de froment pour les rotations BAU, BAU_HF et Vegan. Pour la rotation ICLS il n'est pas possible d'établir un lien entre l'évolution de la biomasse totale d'adventices et de celle de froment.

Tableau 6. Tableau indiquant les valeurs des corrélations entre les biomasses de froment et d'adventices totale pour les différentes rotations de 2024 en temporalité 1. Le niveau de significativité est fourni par le symbole * et les seuils suivants : * : p-valeur<0,05 ; ** : p-valeur<0,01 ; *** : p-valeur < 0,001.

Rotation	Corrélation	p-valeur
BAU	-0,600	**
BAU_HF	-0,650	**
ICLS	-0,182	/
Vegan	-0,673	**

6. Discussion

6.1. Structure des communautés d'adventices

En ce qui a trait à l'évolution de la structure des communautés d'adventices pour la flore potentielle et réalisée entre 2022 et 2024, une différenciation et une plus grande hétérogénéité des communautés se remarquent. Celles-ci pourraient être imputées à l'accumulation des quatre années de précédents culturaux différents, avec leurs opérations culturales spécifiques associées, pour les rotations et aux traitements de désherbage appliqués.

6.2. Indices de biodiversité

6.2.1. Flore potentielle

Selon l'analyse de la flore potentielle, les Figure 11, Figure 12 et Figure 13 indiquent, pour la temporalité 1, des différences significatives au niveau de la densité d'adventices totale, de la richesse spécifique, de l'indice de Shannon entre les rotations pour l'ensemble des années 2022 et 2024. La rotation Vegan présente, pour ces indicateurs de biodiversité en T1, des valeurs systématiquement plus élevées que celles de la rotation BAU. Cette constatation pourrait s'expliquer, pour la culture Vegan, par les problèmes d'implantation de la culture de cameline lors de la première année de l'essai qui ont pu laisser de l'espace propice au développement des adventices. De plus, comme la culture de cameline présente peu d'exigences agronomiques et environnementales et qu'elle est capable, grâce à son système racinaire pivotant d'aller puiser les nutriments en profondeur, elle a pu laisser un sol riche participant également au bon développement des adventices (Berti et al., 2016; Matteo et al., 2023). Pour la rotation BAU, elle pourrait être imputée à l'effet du désherbage chimique qui limite le nombre d'adventices capables de réalimenter le stock semencier. Ce désherbage affecte, en effet, les indices de biodiversité des adventices en termes de diversité spécifique et d'abondance (Geiger et al., 2010). Quant à la rotation BAU_HF, elle montre des valeurs des indices de biodiversité, de richesse spécifique et de Shannon se rapprochant de ceux de la rotation BAU, certainement en raison des mêmes précédents culturaux à savoir successivement les cultures de pomme de terre, d'interculture, de froment et de betterave, qui se répercutent, donc, de la même façon sur les caractéristiques de la flore adventice. La rotation ICLS possède, pour tous les indices de biodiversité, des valeurs intermédiaires entre la rotation BAU_HF et Vegan. Cette position pourrait s'expliquer car elle succède

pour deux des années précédentes sur trois aux mêmes cultures que la rotation Vegan et qu'elle n'est pas traitée chimiquement comme la rotation BAU_HF. D'autre part, la rotation ICLS a débuté en 2021 par une culture de maïs dont le désherbage mécanique aurait été insuffisant et aurait occasionné des problèmes d'adventices pour les cultures suivantes. Cette explication pourrait justifier partiellement la différence à la hausse de la densité d'adventices et de la richesse spécifique de cette rotation par rapport à la rotation BAU.

En comparaison avec 2022, l'année 2024 affiche, en temporalité 1, une densité totale, une richesse spécifique d'adventices et un indice de Shannon de valeur plus élevée. Le nombre d'individus de la flore potentielle en 2024 est supérieur de 500 % par rapport à celui de 2022. Cette augmentation serait attribuable, en partie, à la présence du chénopode blanc. Cette espèce, à floraison estivale, a pu se développer sur les parcelles non traitées chimiquement après le dernier désherbage mécanique à la herse du 20/04/2022 et sur les parcelles de la rotation BAU après le désherbage chimique du 26/04/2022 et ensuite achever son cycle en produisant des graines qui sont venues contaminer le stock semencier. Elle est présente en 2022 dans toutes les rotations en proportion variable de 10 à 30 %, comme le montre la Figure 10, et est en mesure de produire jusqu'à 70 000 graines par plante, lesquelles sont viables pendant 30 à 40 ans dans le sol (Tang et al., 2022). Ainsi, elle est susceptible de contribuer à l'augmentation de la proportion de chénopode blanc parmi les espèces d'adventices (25 à 55 % en 2024) et à l'augmentation de la densité totale d'adventices. Une autre part de cette augmentation pourrait être imputable à l'accumulation dans le sol de graines d'autres espèces viables dans le sol avec un taux annuel de décroissance qualifié de faible et produisant un nombre important de graines par plante. Parmi ces espèces, se retrouvent le coquelicot (PAPRH), la matricaire camomille (MATCH), la renouée des oiseaux (POLAV) et le laiteron rude (SONAS) avec un taux de décroissance de 35 à 55% et capables de produire, par individu, entre 500 à 5000 graines pour la renouée et 30 000 à 100 000 pour la matricaire camomille ("Cultures Fiches adventices Matricaires," 2008; "ARVALIS-CETIOM infos - CEREALES / Fiche adventice," 2011; "Laiteron rude," August-10-2024; "Renouée des oiseaux," August-10-2024).

L'étude de la flore potentielle, pour la temporalité 2, expose une interaction significative entre les facteurs année et rotation et invite donc à examiner l'évolution des indices de biodiversité pour chaque rotation (Figure 16 et Figure 17). Il ressort, ainsi, que la rotation BAU voit sa densité totale d'adventices augmenter par rapport à 2022 mais cela dans une proportion moindre que les rotations BAU_HF et Vegan. Cet effet est sans doute lié au traitement chimique de la rotation BAU qui limite la présence des adventices mais ne l'élimine pas complètement, les adventices pouvant monter en graines après l'opération de désherbage et, ainsi, réalimenter le stock semencier. Le traitement chimique apparaît plus efficace que les opérations mécaniques de désherbage (Pavlović et al., 2022). Quant à la rotation ICLS, sa densité totale d'adventices, stable entre 2022 et 2024, est vraisemblablement due à la mise en place de la prairie temporaire depuis septembre 2022. En effet, il est attendu, un an après l'installation d'une prairie temporaire, une évolution de la dynamique des populations d'adventices avec une réduction des espèces problématiques dans les phases de cultures. Ces prairies temporaires permettent la réduction de la densité d'adventices jusqu'à des valeurs similaires de celles rencontrées dans les cultures traitées chimiquement (Munier-Jolain et al., 2012; Gastal et al., 2022). Dans la Figure 16, la diminution du nombre d'espèces visibles pour la rotation ICLS entre les deux années peut être mise en liaison avec le nombre d'espèces réduites capables de se développer dans une prairie dense. Pour cette même rotation, la diminution du nombre d'espèces conduirait, selon le graphique 17, à une diminution de la valeur de l'indice de Shannon. En ce qui concerne l'indice de Pielou, sa valeur diminue entre 2022 et 2024 indiquant une moins grande équitabilité entre les espèces. La valeur de cet indice, pour la rotation BAU, apparaît plus élevée que pour les rotations ICLS et Vegan sur la Figure 18. Ces deux dernières constatations semblent contraires aux attentes de trouver une flore adventice plus diversifiée apportée par l'installation des rotations

innovantes, complexes et non traitées chimiquement de l'essai (Fried et al., 2008; Liebman et al., 2021).

Le relevé des espèces au laboratoire a pris fin le 17 juin 2024 et, dès lors, certaines espèces d'adventices à germination préférentielle estivale n'ont, sans doute, pas été recensées. La méthode d'émergence tend, en effet, à sous-estimer la flore potentielle en raison, notamment, de l'existence d'une période d'expérimentation limitée qui peut être insuffisante pour permettre la levée de dormance de toutes les espèces (Poonia et al., 2015). D'autre part, à la suite de variations hydriques, la germination de certaines adventices a pu être perturbée par la présence de champignons, de mouches de terreau et par la formation d'une croûte de battance à certains moments. De plus, un faible taux de mortalité des individus (0,003%) a été observé avant que leur stade de développement ne permette l'identification. Les conditions des recensements au laboratoire ont donc pu également contribuer à la sous-évaluation de la flore potentielle. L'allongement de la période des relevés pour autoriser la germination automnale et l'amélioration de l'environnement au laboratoire en plaçant des pièges à mouches et en assurant un arrosage plus fréquent et plus régulier pourrait conduire à une meilleure évaluation de la flore potentielle. Une période de 6 à 24 mois est recommandée pour évaluer les populations potentielles d'adventices au cours d'une saison de croissance (Pannacci et al., 2015). Pour une estimation plus précise, il est possible de prévoir des stimulations de température et à l'acide gibbérélique pour lever la dormance des graines (Mahe et al., 2019b). Après tamisage, les graines non germées pourraient encore subir un test de coloration au tetrazolium qui permet de vérifier la viabilité des cellules embryonnaires (Witty et al., 2012; Hasanuzzaman, 2019).

6.2.2. Flore réalisée

Le premier comptage de la flore réalisée montre, au niveau de la densité d'adventices, une valeur plus élevée pour la rotation Vegan par rapport à celle des trois autres rotations (Figure 21). Cette constatation pourrait s'expliquer, comme pour la densité d'adventices pour la flore potentielle en temporalité 1, par le passé cultural de cette rotation impliquant, en premier lieu, les difficultés d'implantation de la culture de cameline et ensuite l'inter-culture qui n'a pas été pâturée. Lors de ce comptage, l'augmentation de la densité d'adventices entre 2022 et 2024 concorderait avec l'augmentation du stock semencier remarquée précédemment (Figure 11). L'augmentation ne se produit cependant pas dans les mêmes proportions car seulement une partie des graines du stock semencier se traduit en flore réalisée et parce que le relevé de la flore potentielle couvre une période beaucoup plus longue. Au niveau des rotations, les rotations ICLS et Vegan présentent une richesse spécifique plus élevée que celle de la rotation BAU, probablement imputable à une complexité de leurs rotations (Koocheki et al., 2009). La valeur basse de cette variable pour la rotation BAU pourrait provenir du désherbage chimique. Quant à la valeur intermédiaire de la rotation BAU_HF, elle pourrait s'expliquer par les caractéristiques communes partagées avec la rotation BAU en raison du précédent cultural et avec les rotations ICLS et Vegan désherbées mécaniquement les années précédentes. Entre 2022 et 2024, l'augmentation de la richesse spécifique (Figure 21) serait attribuable à l'augmentation de la richesse spécifique de la flore potentielle. Cette dernière pourrait provenir de l'introduction d'une nouvelle espèce par les outils, les animaux, le passage de personnes ou du placement du quadrat d'échantillonnage à un endroit légèrement différent. L'implantation de nouvelles cultures au cours des rotations, apportant avec elles de nouvelles opérations culturales en matière de semis, fertilisation et de désherbage selon notamment que la culture soit sarclée ou non, pourrait également favoriser l'apparition de nouvelles espèces d'adventices.

En ce qui concerne les relevés de la flore réalisée, le deuxième comptage, effectué lors de la floraison du froment d'hiver, a permis une plus grande précision pour la détermination des espèces, celles-ci se trouvant à un stade de développement plus avancé, surtout en ce qui concerne les graminées.

L'importante pluviométrie de la saison (Figure 3) a rendu impossible les opérations de désherbage mécanique des rotations BAU_HF, ICLS et Vegan et, donc, l'effet de ce désherbage prévu par l'essai EcoFoodSystem n'a pas pu être testé en 2024 et cela, dès lors, introduit un biais expérimental dans la comparaison des indices de biodiversité entre 2022 et 2024 à la floraison du froment pour ces rotations. Seule, la rotation BAU a bénéficié du même traitement de désherbage chimique en 2022 par rapport à 2024. Les résultats de la comparaison sont donc à prendre avec précaution.

Entre 2022 et 2024, les indices de densité totale d'adventices, de richesse spécifique et de Shannon, calculés sur la base du deuxième comptage, présentent pour la rotation BAU une diminution des valeurs (Figure 27 et Figure 28). L'efficacité accrue du désherbage chimique sur la culture de froment pur par rapport à celle du froment-pois pourrait être responsable de cette évolution. La rotation ICLS non désherbée, comme les rotations BAU_HF et Vegan, montre, pour la densité d'adventices, une augmentation moins grande que ces deux dernières plausiblement due au précédent d'inter-culture pâturée qui provoque un régime de perturbation sur les adventices (Figure 27) (Sainju et al., 2011; Lenssen et al., 2013). Cette inter-culture, hormis ses rôles de piège à nitrates, de protection du sol contre l'érosion, de fertilisation grâce aux déjections animales et de soutien à la biodiversité permet de limiter la prolifération d'adventices, en recouvrant la surface des parcelles entre deux cultures, par effet de concurrence ou d'allélopathie comme dans le cas du seigle (Charles et al., 2012; Adhikari et al., 2018). De plus, le pâturage des moutons sur l'inter-culture pourrait affecter le développement des adventices et réduire leur multiplication surtout en ce qui concerne les adventices annuelles (Herremans et al., 2021).

Au regard des espèces d'adventices, le plus grand nombre d'agrostis jouet du vent (APESV) observés en 2024, année non désherbée, par rapport en 2022 pourrait démontrer l'action du désherbage chimique et mécanique sur cette graminée. En 2022, cette espèce est présente au premier comptage mais son occurrence se réduit fortement lors du 2^{ème} comptage après les opérations de désherbage. L'herbicide anti-graminées utilisé sur la rotation BAU, Sigma star, mentionne comme cible l'agrostis jouet du vent. D'autre part, les passages successifs de herse étrille et de houe rotative aux stades appropriés de la culture et des adventices sous des conditions de sol favorables ont pu également contribuer à la réduction de la densité de cette adventice.

Il est à noter que le chénopode blanc apparaît très peu dans les deux comptages de flore réalisée contrairement au recensement de la flore potentielle. Cette espèce possède, en effet, une germination préférentielle en été et au printemps et pose, dès lors, peu de problèmes dans la culture de froment d'hiver car ce dernier est déjà bien développé lors de la période d'émergence du chénopode blanc.

En ce qui concerne l'évolution de la biomasse d'adventices entre l'année 2022 et 2024, toutes les rotations à l'exception de la rotation BAU voient leurs quantités d'adventices augmenter (Figure 33). Cet élément s'expliquerait par le traitement de désherbage chimique de la rotation BAU et par l'absence de désherbage combiné à un stock semencier pour les autres rotations. L'augmentation de la biomasse d'adventices des rotations BAU_HF, ICLS et Vegan en 2024 est à mettre en relation avec l'augmentation de la densité totale d'adventices pour ces rotations. Pour la rotation BAU, la présence d'adventices moins nombreuses et plus massives comme de la pomme de terre (SOLTU) pourrait expliquer une biomasse stable associée à une densité d'adventices en diminution.

Pour l'indice de Pielou relatif à la densité d'adventices et à la biomasse, toutes les rotations à l'exception de la rotation BAU présentent des valeurs plus grandes indiquant une plus grande équitabilité entre les espèces (Figure 29 et Figure 34). Ces rotations innovantes et diversifiées semblent remplir leur rôle en favorisant les espèces généralistes au détriment des espèces spécialistes (Fried et al., 2012).

Le Tableau 6 révèle, pour 2024, une influence négative de la biomasse totale d'adventice sur la biomasse de la culture de froment pour toutes les rotations à l'exception de la rotation ICLS pour laquelle il n'y a pas de lien établi entre ces biomasses. En effet, selon Colbach et Cordeau, une diminution de la biomasse produite par la culture est liée à une augmentation de la biomasse d'adventices (Colbach et al., 2018).

7. Conclusion et perspectives

En conclusion, ce mémoire a permis de dresser un inventaire de la diversité et de la densité d'adventices dans les différentes rotations de l'essai EcoFoodSystem pendant une partie de la saison culturale de 2024 et d'appréhender une évolution de ces variables par une comparaison avec les données recueillies en 2022.

En 2024, au niveau des indices de biodiversité, les rotations BAU et Vegan apparaissent les plus distinctes en raison probable des effets des précédents culturaux et des méthodes de désherbage différencié. Pour les autres rotations, les valeurs des indices de biodiversité varient dans différentes directions selon l'indice considéré. La tendance observée en 2024 par rapport à 2022 correspond à une augmentation générale de la densité d'adventices pour les rotations. Dans cette orientation, la rotation ICLS paraît se distinguer pour la flore potentielle et réalisée. L'effet de l'implantation de la prairie et de l'inter-culture pâturées semble efficace pour limiter l'augmentation de la densité d'adventices. La biomasse d'adventices montre une augmentation pour toutes les rotations à l'exception de la rotation BAU, reflétant probablement, ainsi, l'action du désherbage chimique. Un échantillonnage plus complet pendant plusieurs années conduirait possiblement à des conclusions plus précises pour l'ensemble des rotations et pour la comparaison pluriannuelle.

La comparaison avec l'année 2022, pour le relevé à floraison du froment, a comporté un biais expérimental puisqu'aucun désherbage mécanique n'a pu être pratiqué en raison des conditions pluviométriques. Il est à noter que ce manque de désherbage mécanique induira encore des conséquences sur le relevé de la flore adventice des années suivantes, les graines pouvant rester viables dans le sol plusieurs années.

La problématique de la flore adventice étant primordiale dans un système de production agricole désireux de réduire l'utilisation d'herbicides et dans lequel le rendement est pris en compte nécessite une réflexion sur l'ensemble des leviers disponibles au niveau de la rotation et au niveau de l'itinéraire technique des cultures. A la vue du constat d'augmentation de la densité d'adventices, tant au niveau de la flore potentielle que réalisée, il y a éventuellement lieu d'envisager une amélioration du traitement de désherbage mécanique des parcelles par un ou plusieurs passages supplémentaires de la houe rotative aux stades appropriés de la culture. Un autre moyen concevable pour diminuer la pression des adventices consiste à planter, outre les prairies pâturées, les inter-cultures pâturées ou non et les associations culturales, un couvert végétal combiné aux cultures de rente dans les précédents culturaux tel que le colza. Ainsi, une culture de colza sous couvert végétal de légumineuses a montré ses effets positifs sur la quantité d'adventices (Lorin et al., 2015). Ces couverts végétaux ont également la capacité de diminuer la biomasse des adventices (Cordeau et al., 2015).

Pour favoriser la compréhension de dynamique des populations d'adventices, il serait peut-être judicieux d'établir une zone témoin sans désherbage chimique ni mécanique pour séparer au mieux l'effet du désherbage et de l'évolution spontanée des communautés d'adventices. Ainsi, une zone témoin a été mise en place dans le dispositif Réseau Biovigilance Flore pour distinguer sur les parcelles

expérimentales les variations de flore adventice provenant du climat, du cycle biologique des espèces et celles dues à l'activité anthropique (Fried et al., 2007).

Dans le but d'améliorer et de faciliter les relevés et la régulation des adventices, l'utilisation de technologies de précision pourrait contribuer à l'amélioration de la gestion durable et de la connaissance des communautés d'adventices. Dans ce cadre, le recours à des méthodes cartographiques à l'aide de drones pourrait s'avérer utile. Une étude menée à Gembloux avec une caméra multispectrale portée sur drone montre les premiers résultats de l'utilisation d'indicateurs issus d'images terrestres et aériennes pour caractériser la dynamique de compétition entre la culture de froment d'hiver et ses adventices. Les conclusions de cette recherche s'avèrent encourageantes en ce qui concerne le modèle étudié pour le stade post-floraison de la culture (Arquin, 2024).

Afin d'évaluer l'efficacité sur le moyen terme du désherbage mécanique au sein de ces rotations innovantes et de leurs dynamiques d'adventices, il serait utile de poursuivre les relevés et la comparaison d'année en année. Cette étude pluriannuelle permettrait de connaître les limites de l'essai et de déterminer, notamment par l'étude de la flore adventice, si la conception et la mise en œuvre de ses rotations innovantes permettent de correspondre aux régimes alimentaires préconisés par la Commission EAT-Lancet et de promouvoir, ainsi, la transition vers des systèmes alimentaires plus durables et plus respectueux de l'environnement.

8. Contribution personnelle de l'étudiante

En addition des recherches bibliographiques et de la rédaction de ce mémoire, l'étudiante a effectué différentes prises de données tout au long de ce travail.

L'étudiante a assuré la mise en place de cette étude au laboratoire pour réaliser l'analyse de la flore potentielle, a veillé à l'arrosage régulier des bacs et a garanti l'identification et le comptage des adventices. Elle a également procédé à l'identification, au comptage, au prélèvement et à la pesée des adventices pour le suivi, sur le terrain, de la flore adventice réalisée aux stades opportuns de la culture considérée.

Après l'obtention des données suite aux relevés en laboratoire et aux champs, l'étudiante a employé le logiciel R afin de réaliser l'ensemble des analyses statistiques utiles à la finalisation de ce travail.

9. Bibliographie

- AbdelRazek G.M. & Balah M.A., 2023. Associate plant parasitic nematodes to weed species in some newly reclaimed lands. *Sci Rep* **13**(1), 21923, DOI:[10.1038/s41598-023-49357-x](https://doi.org/10.1038/s41598-023-49357-x).
- Adeux G., Vieren E., Carlesi S., Bàrberi P., Munier-Jolain N. & Cordeau S., 2019. Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nat Sustain* **2**(11), 1018–1026, DOI:[10.1038/s41893-019-0415-y](https://doi.org/10.1038/s41893-019-0415-y).
- Adhikari L., Mohseni-Moghadam M. & Missaoui A., 2018. Allelopathic Effects of Cereal Rye on Weed Suppression and Forage Yield in Alfalfa. *AJPS* **09**(04), 685–700, DOI:[10.4236/ajps.2018.94054](https://doi.org/10.4236/ajps.2018.94054).
- Adler P.B., Fajardo A., Kleinhesselink A.R. & Kraft N.J.B., 2013. Trait-based tests of coexistence mechanisms. *Ecology Letters* **16**(10), 1294–1306, DOI:[10.1111/ele.12157](https://doi.org/10.1111/ele.12157).
- Adoption de l'agriculture de conservation : adaptations agronomiques et réponses des communautés adventices - INRAE - Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, April-14-2024. . <https://hal.inrae.fr/tel-03133176v1>, (14/04/2024).
- Alcamo J., Bennett E.M., & Millennium Ecosystem Assessment (Program) (Eds.), 2003. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*, Washington, DC: Island Press, 245.
- AlterAgro, 2014. *Contrôler les adventices en grandes cultures biologique*.
- Altieri M.A., 1995. *Agroecology: the science of sustainable agriculture*, Boulder, Colo. : London: Westview Press ; IT Publications, 433.
- Anderson R.L., 2007. Managing weeds with a dualistic approach of prevention and control. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **27**(1), 13–18, DOI:[10.1051/agro:2006027](https://doi.org/10.1051/agro:2006027).
- Anderson R.L., 2010. A rotation design to reduce weed density in organic farming. *Renew. Agric. Food Syst.* **25**(3), 189–195, DOI:[10.1017/S1742170510000256](https://doi.org/10.1017/S1742170510000256).
- Andreasen C., Streibig J.C. & Haas H., 1991. Soil properties affecting the distribution of 37 weed species in Danish fields. *Weed Research* **31**(4), 181–187, DOI:[10.1111/j.1365-3180.1991.tb01757.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1991.tb01757.x).
- Arquin N., 2024. Caractérisation de la dynamique de compétition entre froment d'hiver et adventices en essai agroécologique par imagerie à deux échelles.
- ARVALIS, Institut technique de la betterave & Terres Inovia, 2015. *Le labour : un moyen de lutte très efficace*.
- Audergon J.-M., Barre P., Colbach N., Debaeke P., Durand-Tardif M., Fontaine L., Gate P., Gauffreteau A., Jézéquel S., Lecouviour F., Cohan J.-P., Dufour P., Masson F., Maupas F., Menz M., Moreau L. & Szambien M., 2022. La gestion des adventices : quels traits et fonctions agro-écologiques pour les plantes ?
- Auffret A.G. & Cousins S.A.O., 2011. Past and present management influences the seed bank and seed rain in a rural landscape mosaic. *Journal of Applied Ecology* **48**(5), 1278–1285, DOI:[10.1111/j.1365-2664.2011.02019.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02019.x).
- Auld B.A. & Tisdell C.A., 1987. Economic thresholds and response to uncertainty in weed control. *Agricultural Systems* **25**(3), 219–227, DOI:[10.1016/0308-521X\(87\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0308-521X(87)90021-7).
- Baessler C. & Klotz S., 2006. Effects of changes in agricultural land-use on landscape structure and arable weed vegetation over the last 50 years. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **115**(1–4), 43–50, DOI:[10.1016/j.agee.2005.12.007](https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.007).
- Bajwa A.A., 2014. Sustainable weed management in conservation agriculture. *Crop Protection* **65**, 105–113, DOI:[10.1016/j.cropro.2014.07.014](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.07.014).
- Bàrberi P., 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research* **42**(3), 177–193, DOI:[10.1046/j.1365-3180.2002.00277.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2002.00277.x).
- Bàrberi P., Bocci G., Carlesi S., Armengot L., Blanco-Moreno J.M. & Sans F.X., 2018. Linking species traits to agroecosystem services: a functional analysis of weed communities. *Weed Research* **58**(2), 76–88, DOI:[10.1111/wre.12283](https://doi.org/10.1111/wre.12283).

- Barralis G., Chadoeuf R. & Lonchamp J.P., 1988a. Longevité des semences de mauvaises herbes annuelles dans un sol cultivé. *Weed Research* **28**(6), 407–418, DOI:[10.1111/j.1365-3180.1988.tb00821.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1988.tb00821.x).
- Barralis G., Chadoeuf R. & Lonchamp J.P., 1988b. Longevité des semences de mauvaises herbes annuelles dans un sol cultivé. *Weed Research* **28**(6), 407–418, DOI:[10.1111/j.1365-3180.1988.tb00821.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1988.tb00821.x).
- Barralis G., Dessaint F. & Chadœuf R., 1996. Relation flore potentielle-flore réelle de sols agricoles de Côte-d’Or. *Agronomie* **16**(7), 453–463, DOI:[10.1051/agro:19960705](https://doi.org/10.1051/agro:19960705).
- Battany M.C. & Grismer M.E., 2000. Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrol. Process.* **14**(7), 1289–1304, DOI:[10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200005\)14:7<1289::AID-HYP43>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200005)14:7<1289::AID-HYP43>3.0.CO;2-R).
- Belmain S.R., Tembo Y., Mkindi A.G., Arnold S.E.J. & Stevenson P.C., 2022. Elements of agroecological pest and disease management. *Elementa: Science of the Anthropocene* **10**(1), 00099, DOI:[10.1525/elementa.2021.00099](https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00099).
- Benton T.G., Vickery J.A. & Wilson J.D., 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology & Evolution* **18**(4), 182–188, DOI:[10.1016/S0169-5347\(03\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00011-9).
- Berquer A., Bretagnolle V., Martin O. & Gaba S., 2023. Disentangling the effect of nitrogen input and weed control on crop–weed competition suggests a potential agronomic trap in conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **345**, 108232, DOI:[10.1016/j.agee.2022.108232](https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108232).
- Blaix C., Moonen A.C., Dostatny D.F., Izquierdo J., Le Corff J., Morrison J., Von Redwitz C., Schumacher M. & Westerman P.R., 2018. Quantification of regulating ecosystem services provided by weeds in annual cropping systems using a systematic map approach. *Weed Research* **58**(3), 151–164, DOI:[10.1111/wre.12303](https://doi.org/10.1111/wre.12303).
- Bohan D.A., Boursault A., Brooks D.R. & Petit S., 2011. National-scale regulation of the weed seedbank by carabid predators: Carabid seed predation. *Journal of Applied Ecology* **48**(4), 888–898, DOI:[10.1111/j.1365-2664.2011.02008.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02008.x).
- Booth B.D. & Swanton C.J., 2002. Assembly Theory Applied to Weed Communities. *Weed Science* **50**(1), 2–13.
- Borgy B., 2011. Dynamique et assemblage des communautés adventices : approche par modélisation statistique (phdthesis).
- Boutagayout A., Bouiamrine E.H., Synowiec A., Oihabi K.E., Romero P., Rhioui W., Nassiri L. & Belmalha S., 2023. Agroecological practices for sustainable weed management in Mediterranean farming landscapes. *Environ Dev Sustain* DOI:[10.1007/s10668-023-04286-7](https://doi.org/10.1007/s10668-023-04286-7).
- Boutin C., Aya K.L., Carpenter D., Thomas P.J. & Rowland O., 2012. Phytotoxicity testing for herbicide regulation: Shortcomings in relation to biodiversity and ecosystem services in agrarian systems. *Science of The Total Environment, Ecosystem Functions, Ecosystem Services and Biodiversity in Ecological Risk Assessment* **415**, 79–92, DOI:[10.1016/j.scitotenv.2011.04.046](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.046).
- Bretagnolle V. & Gaba S., 2015. Weeds for bees? A review. *Agron. Sustain. Dev.* **35**(3), 891–909, DOI:[10.1007/s13593-015-0302-5](https://doi.org/10.1007/s13593-015-0302-5).
- Brown B., Gallandt E.R., DiTommaso A., Salon P., Smith R.G., Ryan M.R. & Cordeau S., 2022. Improving Weed Management Based on the Timing of Emergence Peaks: A Case Study of Problematic Weeds in Northeast USA. *Front. Agron.* **4**, 888664, DOI:[10.3389/fagro.2022.888664](https://doi.org/10.3389/fagro.2022.888664).
- Brühl C.A. & Zaller J.G., 2021. Indirect herbicide effects on biodiversity, ecosystem functions, and interactions with global changes. In: *Herbicides*. Elsevier, 231–272.
- Buhler D.D., Hartzler R.G. & Forcella F., 1997. Implications of Weed Seedbank Dynamics to Weed Management. *Weed Science* **45**(3), 329–336.
- Cadotte M.W., Carscadden K. & Mirotnick N., 2011. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. *Journal of Applied Ecology* **48**(5), 1079–1087, DOI:[10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x).

- Carretero J.L., 1977. Estimacion del contenido de semillas de malas hierbas de un suelo agricola como prediction de su flora adventicia. *Anal. Inst. Bot. Cavanilles* **34**, 267–278.
- Catarino R., Bretagnolle V., Perrot T., Vialoux F. & Gaba S., 2019. Bee pollination outperforms pesticides for oilseed crop production and profitability. *Proc. R. Soc. B.* **286**(1912), 20191550, DOI:[10.1098/rspb.2019.1550](https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1550).
- Caussanel J.P., 1989. Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. *Agronomie* **9**(3), 219–240, DOI:[10.1051/agro:19890301](https://doi.org/10.1051/agro:19890301).
- Chauvel B., Darmency H., Munier-Jolain N. & Rodriguez A., 2018. *Gestion durable de la flore adventice des cultures*, Versailles: Editions Quae.
- Chicouène D., 2010. PRINCIPAUX TYPES DE NUISIBILITÉ DES MAUVAISES HERBES DANS LES GRANDES CULTURES TEMPÉRÉES.
- Christoffoleti P.J., Carvalho S.J.P., Nicolai M., Doohan D. & VanGessel M., 2007. Prevention strategies in weed management. In: *Non-Chemical Weed Management: Principles, Concepts and Technology*. UK: CABI.
- Colbach N. & Cordeau S., 2018. Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy* **94**, 67–78, DOI:[10.1016/j.eja.2017.12.008](https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.008).
- Colbach N., Gardarin A., Granger S., Guillemain J.-P. & Munier-Jolain N., 2008. La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de cultures intégrés. *Innovations Agronomiques* **3**, 61–73.
- Conservation Agriculture principles | Conservation Agriculture | Food and Agriculture Organization of the United Nations, April-13-2024. . FAO. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/conservation-agriculture-principles/en/>, (13/04/2024).
- Cordeau S., 2022. Conservation Agriculture and Agroecological Weed Management. *Agronomy* **12**(4), 867, DOI:[10.3390/agronomy12040867](https://doi.org/10.3390/agronomy12040867).
- Cordeau S., Guillemain J. -P., Reibel C. & Chauvel B., 2015. Weed species differ in their ability to emerge in no-till systems that include cover crops. *Annals of Applied Biology* **166**(3), 444–455, DOI:[10.1111/aab.12195](https://doi.org/10.1111/aab.12195).
- Cordeau S. & Schwartz M., 2018. Perception des adventices par les agriculteurs, conseillers, techniciens d'expérimentation et chercheurs en FRANCE.
- Cordeau S., Smith R.G., Gallandt E.R., Brown B., Salon P., DiTommaso A. & Ryan M.R., 2017. Timing of Tillage as a Driver of Weed Communities. *Weed Sci* **65**(4), 504–514, DOI:[10.1017/wsc.2017.26](https://doi.org/10.1017/wsc.2017.26).
- Cramer H.-H., 1967. *La protection des plantes et les récoltes dans le monde*, Leverkusen : Bayer.
- Dale M.R.T., Thomas A.G. & John E.A., 1992. Environmental factors including management practices as correlates of weed community composition in spring seeded crops. *Can. J. Bot.* **70**(10), 1931–1939, DOI:[10.1139/b92-240](https://doi.org/10.1139/b92-240).
- Debaeke P., 1988. Dynamique de quelques dicotylédones adventices en culture de céréale. I. Relation flore levée—stock semencier. *Weed Research* **28**(4), 251–263, DOI:[10.1111/j.1365-3180.1988.tb00803.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1988.tb00803.x).
- Decruyenaere F., 2021. Suivi des bioagresseurs au sein des rotations innovantes de longue durée mises en place dans l'essai ECOFOODSYSTEM, dans un contexte agroécologique et zéro pesticide.
- Définitions : flore - Dictionnaire de français Larousse, April-1-2024. . Larousse. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/flore/34206>, (01/04/2024).
- Délye C., Jasieniuk M. & Le Corre V., 2013. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics* **29**(11), 649–658, DOI:[10.1016/j.tig.2013.06.001](https://doi.org/10.1016/j.tig.2013.06.001).
- Derrouch D., 2020. Adoption de l'agriculture de conservation: adaptations agronomiques et réponses des communautés adventices.

- Derrouch D., Dessaint F., Fried G. & Chauvel B., 2021. Weed community diversity in conservation agriculture: Post-adoption changes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **312**, 107351, DOI:[10.1016/j.agee.2021.107351](https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107351).
- Di Biase L., Tsafack N., Pace L. & Fattorini S., 2023. Ellenberg Indicator Values Disclose Complex Environmental Filtering Processes in Plant Communities along an Elevational Gradient. *Biology (Basel)* **12**(2), 161, DOI:[10.3390/biology12020161](https://doi.org/10.3390/biology12020161).
- Duchene O., Bathellier C., Dumont B., David C. & Celette F., 2023. Weed community shifts during the aging of perennial intermediate wheatgrass crops harvested for grain in arable fields. *European Journal of Agronomy* **143**, 126721, DOI:[10.1016/j.eja.2022.126721](https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126721).
- EAT, n.d. Food Planet Heath.
- Ellenberg H., Weber H.E., Düll R., Wirth V. & Werner W., n.d. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa.
- Ellenberg H., Weber H.E., Dull R., Wirth V., Werner W. & Paulissen D., 1992. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa.
- Ellenberg Indicator Values Disclose Complex Environmental Filtering Processes in Plant Communities along an Elevational Gradient - PMC, April-20-2024. .
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9953212/>, (20/04/2024).
- Esposito M., Westbrook A.S., Maggio A., Cirillo V. & DiTommaso A., 2023. Neutral weed communities: the intersection between crop productivity, biodiversity, and weed ecosystem services. *Weed Sci* **71**(4), 301–311, DOI:[10.1017/wsc.2023.27](https://doi.org/10.1017/wsc.2023.27).
- FAO, 1997. Rome Declaration on World Food Security /: adopted by the World Food Summit, Rome, Italy, 13 November 1996. Presented at the World Food Summit (1996 : Rome).
- FAO, 2019. The 10 elements of agroecology - Guiding the transition to sustainable food and agricultural systems.
- FAO, 2023. *Tracking progress on food and agriculture-related SDG indicators 2023*, FAO.
- FAO, FIDA, OMS, PAM & UNICEF, 2023. *L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2023*, FAO; UNICEF; IFAD; WFP; WHO;
- Ferrero R., Lima M., Davis A.S. & Gonzalez-Andujar J.L., 2017. Weed Diversity Affects Soybean and Maize Yield in a Long Term Experiment in Michigan, USA. *Front. Plant Sci.* **8**, DOI:[10.3389/fpls.2017.00236](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00236).
- Finigold C., n.d. Global Burden of Crop Loss. *CABI.org*.
- Florez J.A., Fischer A.J., Ramirez H. & Duque M.C., 1999. Predicting Rice Yield Losses Caused by Multispecies Weed Competition. *Agronomy Journal* **91**(1), 87–92, DOI:[10.2134/agronj1999.00021962009100010014x](https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100010014x).
- Fried G., Chauvel B.B. & Reboud X., 2008. Evolution de la flore adventice des champs cultivés au cours des dernières décennies: vers la sélection de groupes d'espèces répondant aux systèmes de culture. *Innovations Agronomiques* (3).
- Fried G., Kazakou E. & Gaba S., 2012. Trajectories of weed communities explained by traits associated with species' response to management practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **158**, 147–155, DOI:[10.1016/j.agee.2012.06.005](https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.06.005).
- Fried G., Norton L.R. & Reboud X., 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **128**(1), 68–76, DOI:[10.1016/j.agee.2008.05.003](https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.05.003).
- Frost R.A., Launchbaugh K.L., & Society for Range Management, 2003. Prescription Grazing for Rangeland Weed Management. *Rangelands* **25**(6), DOI:[10.2458/azu_rangelands_v25i6_frost](https://doi.org/10.2458/azu_rangelands_v25i6_frost).
- Functional characterizations of Ellenberg indicator values – a review on ecophysiological determinants, April-20-2024. .
<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/1365-2435.12531>, (20/04/2024).

- Gaba S., Cheviron N., Perrot T., Piutti S., Gautier J.-L. & Bretagnolle V., 2020. Weeds Enhance Multifunctionality in Arable Lands in South-West of France. *Front. Sustain. Food Syst.* **4**, 71, DOI:[10.3389/fsufs.2020.00071](https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00071).
- Gaba S., Fried G., Kazakou E., Chauvel B. & Navas M.-L., 2014. Agroecological weed control using a functional approach: a review of cropping systems diversity. *Agron. Sustain. Dev.* **34**(1), 103–119, DOI:[10.1007/s13593-013-0166-5](https://doi.org/10.1007/s13593-013-0166-5).
- Gaba S., Perronne R., Fried G., Gardarin A., Bretagnolle F., Biju-Duval L., Colbach N., Cordeau S., Fernández-Aparicio M., Gauvrit C., Gibot-Leclerc S., Guillemain J., Moreau D., Munier-Jolain N., Strbik F. & Reboud X., 2017. Response and effect traits of arable weeds in agro-ecosystems: a review of current knowledge. *Weed Research* **57**(3), 123–147, DOI:[10.1111/wre.12245](https://doi.org/10.1111/wre.12245).
- Garnier E. & Navas M.-L., 2012. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **32**(2), 365–399, DOI:[10.1007/s13593-011-0036-y](https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y).
- Géoportail de la Wallonie, March-17-2024. WalOnMap | Géoportail de la Wallonie. *Géoportail de la Wallonie*. <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=173354.1644895082,174555.375225263,139414.65754868268,140035.10670624764>, (17/03/2024).
- Godinho I., 1984. Les définitions d' 'adventice' et de 'mauvaise herbe.' *Weed Research* **24**(2), 121–125, DOI:[10.1111/j.1365-3180.1984.tb00579.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1984.tb00579.x).
- Grime J.P., 2001. *Plant strategies, vegetation processes and ecosystem properties*, Chichester [etc.]: J. Wiley.
- Grosjean P. & Engels G., n.d. 8.2 *Indices de biodiversité | Science des données biologiques II*.
- Guo Q., Rundel P.W. & Goodall D.W., 1998. Horizontal and vertical distribution of desert seed banks: patterns, causes, and implications. *Journal of Arid Environments* **38**(3), 465–478, DOI:[10.1006/jare.1997.0353](https://doi.org/10.1006/jare.1997.0353).
- Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estrogues V., Labeyrie B., Lafond D., Meynard J.-M., Petit M.S., Plénet D., Picault S., Tchamitchian M. & Faloya V., 2017. Guide de l'expérimentateur système: concevoir, conduire et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et pérennes.
- Hennig W., 1999. *Phylogenetic systematics*. Davis, D.D., Zangerl, R. trans., Urbana Chicago London: University of Illinois Press, 263.
- Henriet F., Jaunard D., Gilleman A., Monty A. & Mahy G., 2017. Influence du travail du sol sur la dynamique des adventices.
- Henry M. & Dedryver C.A., 1991. Occurrence of barley yellow dwarf virus in pastures of western France. *Plant Pathology* **40**(1), 93–99, DOI:[10.1111/j.1365-3059.1991.tb02297.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1991.tb02297.x).
- HLPE-FSN, 2023. Reducing inequalities for food security and nutrition **18**.
- Holm L., 1978. Proceedings of the Western Society of Weed Science **31**, 3–12.
- Honegger A., Wittwer R., Heggin D., Oberholzer H.-R. & de Ferron A., 2014. Effets à long terme d'une conversion à l'agriculture biologique.
- INRAE, 2020. Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050.
- INRAE, 2023. Comment nourrir la planète en 2050 ? | INRAE. <https://www.inrae.fr/dossiers/alimentation-saine-durable/comment-nourrir-planete-2050>, (24/04/2024).
- INSERM, 2021. Pesticides et effets sur la santé : nouvelles données, INSERM.
- IRM - Climat dans votre commune, March-16-2024. . *KMI*. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune>, (16/03/2024).
- IWM PRAISE, n.d. Décalage de la date de semis pour maîtriser les mauvaises herbes dans les céréales à paille d'hiver (No. 8), IWM PRAISE.
- Jasieniuk M., Brûlé-Babel A.L. & Morrison I.N., 1996. The Evolution and Genetics of Herbicide Resistance in Weeds. *Weed sci.* **44**(1), 176–193, DOI:[10.1017/S0043174500093747](https://doi.org/10.1017/S0043174500093747).

- Jennings R.E., 1935. Stramonium poisoning. *The Journal of Pediatrics* **6**(5), 657–664, DOI:[10.1016/S0022-3476\(35\)80060-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3476(35)80060-7).
- Kraft N.J.B. & Ackerly D.D., 2014. Assembly of Plant Communities. In: Monson, R.K. ed. *Ecology and the Environment*. New York, NY: Springer, 67–88.
- Lacroix C., Pierreux J., Geruzet G., Vandenberghe C. & Dumont B., n.d. Contrôle des adventices en céréales tout en réduisant.
- Lal B., Gautam P., Raja R., Tripathi R., Shahid M., Mohanty S., Panda B.B., Bhattacharyya P. & Nayak A.K., 2016. Weed seed bank diversity and community shift in a four-decade-old fertilization experiment in rice–rice system. *Ecological Engineering* **86**, 135–145, DOI:[10.1016/j.ecoleng.2015.10.030](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.10.030).
- Larousse É., March-21-2024. Définitions : adventice - Dictionnaire de français Larousse. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/adventice/1239>, (21/03/2024).
- Laviña A., Aramburu J. & Moriones E., 1996. Occurrence of tomato spotted wilt and cucumber mosaic viruses in field-grown tomato crops and associated weeds in northeastern Spain. *Plant Pathology* **45**(5), 837–842, DOI:[10.1111/j.1365-3059.1996.tb02893.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1996.tb02893.x).
- Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J.-P. & Trommetter M., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies : Synthèse du rapport d’expertise 116 p., DOI:[10.15454/CHZ5-0922](https://doi.org/10.15454/CHZ5-0922).
- Leblanc M. & Cloutier D., 2006. La haute technologie au service de la lutte physique aux mauvaises herbes dans un contexte d’agriculture biologique. *phyto* **87**(2), 77–81, DOI:[10.7202/013976ar](https://doi.org/10.7202/013976ar).
- Leblanc M.L., Cloutier D.C., Leroux G.D. & Hamel C., 2005. Facteurs impliqués dans la levée des mauvaises herbes au champ. *phyto* **79**(3), 111–127, DOI:[10.7202/706140ar](https://doi.org/10.7202/706140ar).
- Lechenet M., Dessaint F., Py G., Makowski D. & Munier-Jolain N., 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants* **3**(3), 17008, DOI:[10.1038/nplants.2017.8](https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8).
- Leippert F., Darmaun M., Mpheshea M., Muller A. & Bernoux M., 2020. *The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems*, FAO and Biovision.
- Lenssen A.W., Sainju U.M. & Hatfield P.G., 2013. Integrating sheep grazing into wheat–fallow systems: Crop yield and soil properties. *Field Crops Research* **146**, 75–85, DOI:[10.1016/j.fcr.2013.03.010](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.010).
- Les Essentiels d’ARVALIS - Quelle est la nuisibilité des mauvaises herbes en céréales à paille ?, 2019. . ARVALIS. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/quelle-est-la-nuisibilite-des-mauvaises-herbes-en-cereales-paille>, (02/04/2024).
- Liebman M. & Dyck E., 1993. Crop Rotation and Intercropping Strategies for Weed Management. *Ecological Applications* **3**(1), 92–122, DOI:[10.2307/1941795](https://doi.org/10.2307/1941795).
- Liliane T.N., Charles M.S., Liliane T.N. & Charles M.S., 2020. Factors Affecting Yield of Crops. In: *Agronomy - Climate Change & Food Security*. IntechOpen.
- Lonchamp J.-P., Chadœuf R., Barralis G. & Bourlier M., 1984. Evolution de la capacité de germination des semences de mauvaises herbes enfouies dans le sol. *Agronomie* **4**(7), 671–682.
- Loranger J., 2015. Assemblage des communautés d’herbacées : une approche fonctionnelle (phdthesis).
- Loyeau A., 2019. La classification phylogénétique au cycle 3.
- MacLaren C., Storkey J., Menegat A., Metcalfe H. & Dehnen-Schmutz K., 2020. An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **40**(4), 24, DOI:[10.1007/s13593-020-00631-6](https://doi.org/10.1007/s13593-020-00631-6).
- MacLaren C., Storkey J., Strauss J., Swanepoel P. & Dehnen-Schmutz K., 2019. Livestock in diverse cropping systems improve weed management and sustain yields whilst reducing inputs. *Journal of Applied Ecology* **56**(1), 144–156, DOI:[10.1111/1365-2664.13239](https://doi.org/10.1111/1365-2664.13239).
- Mahe I., Derrouch D., Vieren E. & Chauvel B., 2019a. Le stock de semences peut-il être utilisé dans les études de terrain sur l’effet des systèmes de culture sur la flore adventice ? *Agronomie, Environnement & Sociétés* **9**(2).

- Mahe I., Derrouch D., Vieren E. & Chauvel B., 2019b. STOCK DE SEMENCES VERSUS RELEVÉ DE FLORE : COMMENT MESURER LES ÉVOLUTIONS DE LA FLORE ADVENTICE LIÉES À DES MODIFICATIONS DE SYSTÈME DE CULTURE ?
- Mamarot J. & Rodriguez A., 2014. *Mauvaises herbes des cultures*, Paris: ACTA-le Réseau des instituts des filières animales et végétales.
- Mantle P.G. & Shaw S., 1977. A Case Study of the Aetiology of Ergot Disease of Cereals and Grasses. *Plant Pathology* **26**(3), 121–126, DOI:[10.1111/j.1365-3059.1977.tb01041.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1977.tb01041.x).
- Marshall E.J.P., Brown V.K., Boatman N.D., Lutman P.J.W., Squire G.R. & Ward L.K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields*. *Weed Research* **43**(2), 77–89, DOI:[10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x).
- Masson S., Chauvel B., Carlen C. & Wirth J., 2021. De nouveaux outils de décision pour une gestion durable des adventices DOI:[10.34776/AFS12-78F](https://doi.org/10.34776/AFS12-78F).
- Mazoyer M. & Roudart L., 2002. *Histoire des agricultures du monde: du néolithique à la crise contemporaine*, Points, Paris: Éd. du Seuil.
- Médiène S., Colbach N., Charrier X. & Doisy D., 2015. Régulation de la flore adventice par l’insertion de prairies temporaires. In: *Rencontres Sur La Gestion Durable Des Adventices En Grandes Cultures GCHP "Comment Maîtriser Les Adventices Dans de Nouveaux Contextes de Production ?"*. Paris, France: GIS - Grande Culture à Hautes Performances Economiques et Environnementales (GCHP2E). FRA., 77 p.
- Méral P. & Pesche D., 2016. *Les services écosystémiques: repenser les relations nature et société*, Nature et société, Versailles: Éditions Quae.
- Métais P., Bonin L., Perriot B., Desbourdes C. & Solan B.D., 2018. Gestion des adventices par l’agronomie et les agroéquipements : moyens mobilisables et perspectives.
- Milberg P. & Hallgren E., 2004. Yield loss due to weeds in cereals and its large-scale variability in Sweden. *Field Crops Research* **86**(2–3), 199–209, DOI:[10.1016/j.fcr.2003.08.006](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.08.006).
- Monaco T.J., Weller S.C. & Ashton F.M., 2002. *Weed science : principles and practices*, New York, 671.
- Monteiro A. & Santos S., 2022. Sustainable Approach to Weed Management: The Role of Precision Weed Management. *Agronomy* **12**(1), 118, DOI:[10.3390/agronomy12010118](https://doi.org/10.3390/agronomy12010118).
- Moreau D., Adeux G., Rouge A., Guillemin J.-P. & Cordeau S., 2022. Mécanismes de régulation biologique des adventices par les couverts végétaux. *AE&S* **12**(1), DOI:[10.54800/tre343](https://doi.org/10.54800/tre343).
- Moreau D., Pointurier O., Nicolardot B., Villerd J. & Colbach N., 2020. In which cropping systems can residual weeds reduce nitrate leaching and soil erosion? *European Journal of Agronomy* **119**, 126015, DOI:[10.1016/j.eja.2020.126015](https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126015).
- Munier-Jolain N., Mediène S., Meiss H., Boissinot F., Rainer W., Jacques C. & Bretagnolle V., 2012. Rôle des prairies temporaires pour la gestion de la flore adventice dans les systèmes céréaliers. *Innovations Agronomiques* **22**, 71–84.
- Nations Unies, 1992. Convention sur la diversité biologique.
- Navas M.-L., 2012. Trait-based approaches to unravelling the assembly of weed communities and their impact on agro-ecosystem functioning. *Weed Research* **52**(6), 479–488, DOI:[10.1111/j.1365-3180.2012.00941.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2012.00941.x).
- Neve P., Vila-Aiub M. & Roux F., 2009. Evolutionary-thinking in agricultural weed management. *New Phytologist* **184**(4), 783–793, DOI:[10.1111/j.1469-8137.2009.03034.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03034.x).
- Neyton S., Abbady D. & Sarthou J.-P., 2018. Agroécosystème : Définition DOI:[10.17180/YS6M-A511](https://doi.org/10.17180/YS6M-A511).
- O’Donovan J.T., 2005. Weed economic thresholds : Useful agronomic tool or pipe dream? *phyto* **77**(1), 13–28, DOI:[10.7202/706097ar](https://doi.org/10.7202/706097ar).
- Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* **144**(1), 31–43, DOI:[10.1017/S0021859605005708](https://doi.org/10.1017/S0021859605005708).
- Oliver L.R., 1988. Principles of Weed Threshold Research. *Weed Technology* **2**(4), 398–403.
- Pelosi C., Bertrand C., Daniele G., Coeurdassier M., Benoit P., Néliu S., Lafay F., Bretagnolle V., Gaba S., Vulliet E. & Fritsch C., 2021. Residues of currently used pesticides in soils and earthworms: A

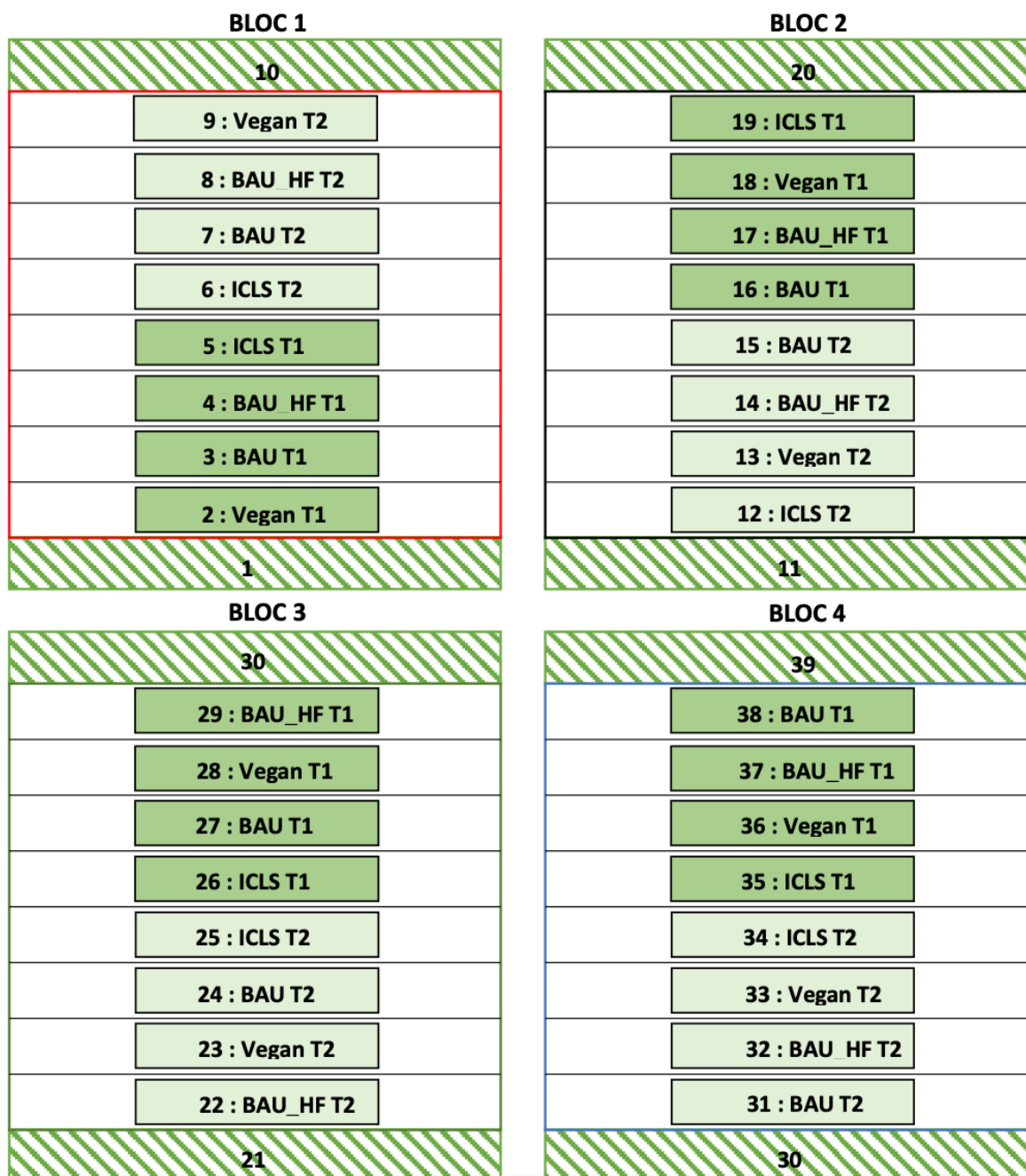
- silent threat? *Agriculture, Ecosystems & Environment* **305**, 107167, DOI:[10.1016/j.agee.2020.107167](https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107167).
- Petit M.-S., 2017. *Le Guide de l'expérimentateur « système »*.
- Petit S., Boursault A., Guilloux M., Munier-Jolain N. & Reboud X., 2011. Weeds in agricultural landscapes. A review. *Agronomy Sust. Developm.* **31**(2), 309–317, DOI:[10.1051/agro/2010020](https://doi.org/10.1051/agro/2010020).
- Petit S., Gaba S.S., Colbach N., Bockstaller C.C., Bretagnolle V., Meziere D., Ricou C., Trichard A. & Munier-Jolain N., 2013. Gestion agro-écologique de la flore adventice dans les systèmes à bas niveau d'usage d'herbicides: le projet ADVHERB.
- Petit S., Munier-Jolain N., Bretagnolle V., Bockstaller C., Gaba S., Cordeau S., Lechenet M., Mézière D. & Colbach N., 2015. Ecological Intensification Through Pesticide Reduction: Weed Control, Weed Biodiversity and Sustainability in Arable Farming. *Environmental Management* **56**(5), 1078–1090, DOI:[10.1007/s00267-015-0554-5](https://doi.org/10.1007/s00267-015-0554-5).
- Qasem J.R., 2019. Weed Seed Dormancy: The Ecophysiology and Survival Strategies. In: *Seed Dormancy and Germination*. IntechOpen.
- Radosevich S.R., Holt J.S., Ghersa C. & Radosevich S.R., 2007. *Ecology of weeds and invasive plants: relationship to agriculture and natural resource management*, Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 454.
- Rasmussen I.A., 2004. The effect of sowing date, stale seedbed, row width and mechanical weed control on weeds and yields of organic winter wheat. *Weed Research* **44**(1), 12–20, DOI:[10.1046/j.1365-3180.2003.00367.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00367.x).
- Raven P.H., Evert R.F. & Eichhorn S.E., 2013. *Biology of plants*, New York: W.H. Freeman and Company Publishers, 727.
- Reibel C., Chauvel B., Felten E., Gounon R., Laurent E., Matejicek A., Pimet E., Vieren E. & Moreau D., 2020. Mieux connaître la diversité des semences des espèces adventices.
- Reinhardt T. & Leon R.G., 2018. Extractable and Germinable Seedbank Methods Provide Different Quantifications of Weed Communities. *Weed Sci* **66**(6), 715–720, DOI:[10.1017/wsc.2018.56](https://doi.org/10.1017/wsc.2018.56).
- Roberts H.A. & Chancellor R.J., 1986. Seed banks of some arable soils in the English midlands. *Weed Research* **26**(4), 251–258, DOI:[10.1111/j.1365-3180.1986.tb00704.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1986.tb00704.x).
- Rodriguez A., 2005. Connaître la biologie des adventices pour mieux les maîtriser. *Perspectives agricoles* (313), 56–60.
- Romillac N., 2017. Les traits fonctionnels racinaires, un outil pour comprendre les interactions entre les plantes cultivées et les microorganismes du sol ?
- Rosenfeld J.S., 2002. Functional redundancy in ecology and conservation. *Oikos* **98**(1), 156–162, DOI:[10.1034/j.1600-0706.2002.980116.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.980116.x).
- Ryan M.R., Smith R.G., Mirsky S.B., Mortensen D.A. & Seidel R., 2010. Management Filters and Species Traits: Weed Community Assembly in Long-Term Organic and Conventional Systems. *Weed sci.* **58**(3), 265–277, DOI:[10.1614/WS-D-09-00054.1](https://doi.org/10.1614/WS-D-09-00054.1).
- Sainju U.M., Lenssen A.W., Goosey H.B., Snyder E. & Hatfield P.G., 2011. Sheep Grazing in a Wheat-Fallow System Affects Dryland Soil Properties and Grain Yield. *Soil Science Society of America Journal* **75**(5), 1789–1798, DOI:[10.2136/sssaj2010.0202](https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0202).
- Savary S., Willcoquet L., Pethybridge S.J., Esker P., McRoberts N. & Nelson A., 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol Evol* **3**(3), 430–439, DOI:[10.1038/s41559-018-0793-y](https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y).
- Scalla R., 1991. *Les herbicides: mode d'action et principes d'utilisation*, Du labo au terrain, Paris: Institut national de la recherche agronomique.
- Schuster M.Z., Harrison S.K., Moraes A. de, Sulc R.M., Carvalho P.C.F., Lang C.R., Anghinoni I., Lustosa S.B.C. & Gastal F., 2018. Effects of crop rotation and sheep grazing management on the seedbank and emerged weed flora under a no-tillage integrated crop-livestock system. *The Journal of Agricultural Science* **156**(6), 810–820, DOI:[10.1017/S0021859618000813](https://doi.org/10.1017/S0021859618000813).
- Scott D. & Freckleton R.P., 2022. Crop diversification and parasitic weed abundance: a global meta-analysis. *Sci Rep* **12**(1), 19413, DOI:[10.1038/s41598-022-24047-2](https://doi.org/10.1038/s41598-022-24047-2).

- Sebillotte M., 1990. Systeme de culture, un concept operatoire pour les agronomes. *In: Les Systèmes de culture*, Un point sur. Paris: Institut national de la recherche agronomique.
- Silvertown J., Dodd M., Gowing D., Lawson C. & McConway K., 2006. Phylogeny and the Hierarchical Organization of Plant Diversity. *Ecology* **87**(7), S39–S166.
- Soltis P.S. & Soltis D.E., 2021. Plant genomes: Markers of evolutionary history and drivers of evolutionary change. *Plants, People, Planet* **3**(1), 74–82, DOI:[10.1002/ppp3.10159](https://doi.org/10.1002/ppp3.10159).
- SPW, 2022. Population active. http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorsheets/EAW-A_II_b_2.html, (09/04/2024).
- SPW, 2023a. Superficie Agricole Utilisée. <http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorsheets/EAW-1.html>, (09/04/2024).
- SPW, 2023b. Régions agricoles de Wallonie. *Etat de l'Agriculture Wallonne*. http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorsheets/EAW-A_I_d_2.html, (17/03/2024).
- SPW, 2023c. Exploitations agricoles. *SPW*. http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorsheets/EAW-A_II_b_1-1.html, (09/04/2024).
- Sterk M., Gort G., Klimkowska A., van Ruijven J., van Teeffelen A.J.A. & Wamelink G.W.W., 2013. Assess ecosystem resilience: Linking response and effect traits to environmental variability. *Ecological Indicators* **30**, 21–27, DOI:[10.1016/j.ecolind.2013.02.001](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.001).
- Storkey J., 2006. A functional group approach to the management of UK arable weeds to support biological diversity. *Weed Research* **46**(6), 513–522, DOI:[10.1111/j.1365-3180.2006.00528.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2006.00528.x).
- Swanson H.K., Lysy M., Power M., Stasko A.D., Johnson J.D. & Reist J.D., 2015. A new probabilistic method for quantifying *n*-dimensional ecological niches and niche overlap. *Ecology* **96**(2), 318–324, DOI:[10.1890/14-0235.1](https://doi.org/10.1890/14-0235.1).
- Swenson N.G. & Enquist B.J., 2009. Opposing assembly mechanisms in a Neotropical dry forest: implications for phylogenetic and functional community ecology. *Ecology* **90**(8), 2161–2170, DOI:[10.1890/08-1025.1](https://doi.org/10.1890/08-1025.1).
- Thiery E., 2020. Analyse des relations entre flore adventice, système de culture et paysage.
- Tibi A., Debaeke P., Ari T.B., Bérard A., Bispo A., Charcosset A., Durand J.-L., Gouis J.L., Makowski D., Marrou H., Planton S., Sauquet E., Savary S., Willocquet L., Guyomard H. & Schmitt B., 2020. Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale (report).
- United Nations, n.d. Objectif 2 : Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable. *Développement durable*.
- United Nations D. of E. and S.A. Population Division, 2019. *World Urbanization Prospects The 2018 Revision*, New York.
- United Nations D. of E. and S.A. Population Division, 2023. *World Population Prospects 2022 : Summary of Results (No. 3)*, New York, United Nations.
- 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 ? *Innovations agronomiques* **3**, 27–41.
- Van Den Abeele M., 2022. Etude de la flore adventice potentielle et exprimée au sein des différents itinéraires agricoles des essais Ecofoodsystem et Solresidu dans un contexte agroécologique.
- Violle C., Castro H., Richarte J. & Navas M., 2009. Intraspecific seed trait variations and competition: passive or adaptive response? *Functional Ecology* **23**(3), 612–620, DOI:[10.1111/j.1365-2435.2009.01539.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01539.x).
- Weston L.A. & Duke S.O., 2003. Weed and Crop Allelopathy. *Critical Reviews in Plant Sciences* **22**(3 & 4), 367–389.

- Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A. & Peigné J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **34**(1), 1–20, DOI:[10.1007/s13593-013-0180-7](https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7).
- Wezel A., Herren B.G., Kerr R.B., Barrios E., Gonçalves A.L.R. & Sinclair F., 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **40**(6), 40, DOI:[10.1007/s13593-020-00646-z](https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z).
- Willett W., Rockström J., Loken B., Springmann M., Lang T., Vermeulen S., Garnett T., Tilman D., DeClerck F., Wood A., Jonell M., Clark M., Gordon L.J., Fanzo J., Hawkes C., Zurayk R., Rivera J.A., De Vries W., Majele Sibanda L., Afshin A., Chaudhary A., Herrero M., Agustina R., Branca F., Lartey A., Fan S., Crona B., Fox E., Bignet V., Troell M., Lindahl T., Singh S., Cornell S.E., Srinath Reddy K., Narain S., Nishtar S. & Murray C.J.L., 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* **393**(10170), 447–492, DOI:[10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4).
- Wisler G.C. & Norris R.F., 2005. Interactions between Weeds and Cultivated Plants as Related to Management of Plant Pathogens. *Weed Science* **53**(6), 914–917.
- Wood S.A., Karp D.S., DeClerck F., Kremen C., Naeem S. & Palm C.A., 2015. Functional traits in agriculture: agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution* **30**(9), 531–539, DOI:[10.1016/j.tree.2015.06.013](https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.013).
- World Bank Group, March-17-2024. World Bank Climate Change Knowledge Portal. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>, (17/03/2024).
- Yang Q., Liu G., Casazza M., Gonella F. & Yang Z., 2021. Three dimensions of biodiversity: New perspectives and methods. *Ecological Indicators* **130**, 108099, DOI:[10.1016/j.ecolind.2021.108099](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108099).
- Zimdahl R.L., 2018. *Fundamentals of weed science*, London: Academic press.
- Zwinger P., Ammon H.U. & Arlt K. (Eds.), 2002. *Unkraut - Ökologie und Bekämpfung*, Stuttgart (Hohenheim): Ulmer, 419.

10. Annexes

Annexe 1. Schéma des blocs du dispositif expérimental de l'essai EcoFoodSystem.



Annexe 2. Composition des bandes fleuries en bordure des parcelles expérimentales.

	Poaceae	Fabaceae	Apiaceae	Asteraceae	Lamiaceae
Mélange "LOW" 5 espèces	Agrostis capillaris Festuca rubra Poa Pratensis	Lotus corniculatus	Pimpinella major	Achillea millefolium Crepis Biennis	Origanum vulgare
Mélange "MEDIUM" 10 espèces	Agrostis capillaris Festuca rubra Poa Pratensis	Lotus corniculatus Medicago lupulina	Pimpinella major Anthriscus sylvestris	Achillea millefolium Crepis Biennis Leucanthemum vulgare Centaurea jacea	Origanum vulgare Betonica officinalis
Mélange "HIGH" 15 espèces	Agrostis capillaris Festuca rubra Poa Pratensis	Lotus corniculatus Medicago lupulina Trifolium pratense	Pimpinella major Anthriscus sylvestris Heracleum sphondylium	Achillea millefolium Crepis Biennis Leucanthemum vulgare Centaurea jacea Cichorium intybus Tragopogon pratensis	Origanum vulgare Betonica officinalis Prunella vulgaris

Annexe 3. Tableau récapitulatif des modèles, transformation et distributions des variables considérées dans l'analyse statistique des données.

Variable	Modèle	Transformation	Distribution
Flore potentielle			
Temporalité 1			
Densité T1	GLMM	/	Binomiale négative
Richesse spécifique T1	LMER	/	Normale
Shannon T1	LMER	/	/
Simpson T1	LMER	/	Normale
Pielou T1	GLMM	/	β
Temporalité 2			
Densité T2	LMER	Racine carrée	Normale
Richesse spécifique T2	LMER	/	Normale
Shannon T2	LMER	/	Normale
Simpson T2	LMER	/	Normale
Pielou T2	GLMM	/	β
Flore réalisée			
1er relevé			
Densité T1	LMER	Logarithme	Normale
Richesse spécifique T1	LMER	/	Normale
Shannon T1	LMER	/	Normale
Simpson T1	LMER	/	Normale
Pielou T1	GLMM	/	β
2ème relevé			
2ème comptage			
Densité T1	LMER	Logarithme	Normale
Richesse spécifique T1	LMER	Logarithme	Normale
Shannon T1	LMER	/	Normale
Pielou	GLMM	/	β
Biomasse			
Densité T1	LMER	Logarithme	Normale
Pielou T1	GLMM	/	β

Annexe 4. Moyennes marginales et erreurs standard des indices de biodiversité de la flore potentielle.

Temporalité 1

	Rotation	Moyenne marginale	Erreur standard	Groupe
Densité	BAU	6133	1110	a
	BAU_HF	11822	2184	b
	ICLS	15260	2745	bc
	Vegan	21993	3909	c
	Année			
	2022	5393	836	a
	2024	28926	4371	b
Richesse spécifique	Rotation			
	BAU	3,00	0,523	a
	BAU_HF	3,52	0,523	ab
	ICLS	4,03	0,523	bc
	Vegan	4,85	0,523	c
	Année			
	2022	2,98	0,491	a
2024	4,72	0,491	b	
Shannon	Rotation			
	BAU	0,750	0,142	a
	BAU_HF	0,756	0,142	a
	ICLS	0,894	0,142	ab
	Vegan	1,147	0,142	b
	Année			
	2022	0,796	0,132	a
2024	0,978	0,132	b	

Temporalité 2

	Rotation_Année	Moyenne marginale	Erreur standard	Groupe
Densité	BAU_2022	6256	954	a
	BAU_2024	9336	1165	b
	BAU_HF_2022	12242	3651	a
	BAU_HF_2024	23583	5067	b
	ICLS_2022	11038	2962	/
	ICLS_2024	11627	3040	/
	Vegan_2022	12650	6591	a
	Vegan_2024	57457	1407	b
Richesse spécifique	Rotation_Année			
	BAU_2022	3,70	0,63	/
	BAU_2024	4,25	0,63	/
	BAU_HF_2022	5,55	0,559	/
	BAU_HF_2024	5,90	0,559	/
	ICLS_2022	3,85	0,638	a
	ICLS_2024	5,10	0,638	b
	Vegan_2022	4,90	0,616	a
Vegan_2024	7,15	0,616	b	
Shannon	Rotation_Année			
	BAU_2022	1,04	0,175	/
	BAU_2024	1,10	0,175	/
	BAU_HF_2022	1,39	0,132	/
	BAU_HF_2024	1,27	0,132	/
	ICLS_2022	1,305	0,134	a
	ICLS_2024	0,838	0,134	b
	Vegan_2022	1,26	0,128	/
Vegan_2024	1,34	0,128	/	
Pielou	Rotation			
	BAU	0,853	0,0220	b
	BAU_HF	0,790	0,0263	ab
	ICLS	0,699	0,0326	b
	Vegan	0,771	0,0280	b
	Année			
	2022	0,853	0,0172	b
2024	0,692	0,0172	a	

Annexe 5. Moyennes marginales et erreurs standard des indices de biodiversité de la flore réalisée au 1^{er} comptage en temporalité 1.

	Rotation	Moyenne marginale	Erreur standard	Groupe
Densité	BAU	28,0	10,9	a
	BAU_HF	31,5	12,2	a
	ICLS	39,0	15,0	a
	Vegan	64,9	24,7	b
	Année			
	2022	25,5	9,62	a
	2024	58,4	21,59	b
Richesse spécifique	Rotation			
	BAU	2,98	0,585	a
	BAU_HF	3,27	0,585	ab
	ICLS	3,75	0,585	b
	Vegan	3,95	0,585	b
	Année			
	2022	2,77	0,568	a
2024	4,20	0,568	b	
Shannon	Rotation			
	BAU	0,759	0,158	/
	BAU_HF	0,861	0,158	/
	ICLS	0,954	0,158	/
	Vegan	0,873	0,158	/
	Année			
	2022	0,677	0,152	a
2024	1,047	0,152	b	
Simpson	Rotation			
	BAU	0,475	0,0662	/
	BAU_HF	0,472	0,0662	/
	ICLS	0,512	0,0662	/
	Vegan	0,471	0,0662	/
	Année			
	2022	0,407	0,0613	a
2024	0,558	0,0613	b	
Pielou	Rotation			
	BAU	0,492	0,0735	/
	BAU_HF	0,537	0,0740	/
	ICLS	0,534	0,0739	/
	Vegan	0,525	0,0741	/
	Année			
	2022	0,420		a
2024	0,622		b	

Annexe 6. Moyennes marginales et erreurs standard des indices de biodiversité de la flore réalisée au 2^{ème} comptage en temporalité 1.

	Rotation_Année	Moyenne marginale	Erreur standard	Groupe
Densité	BAU_2022	3,4	3,16	a
	BAU_2024	11,4	3,16	b
	BAU_HF_2022	34,2	15,2	a
	BAU_HF_2024	74,4	15,2	b
	ICLS_2022	37,0	19,6	a
	ICLS_2024	72,8	19,6	b
	Vegan_2022	75,2	31,2	a
	Vegan_2024	75,2	31,2	b
Richesse	Rotation_Année			
	BAU_2022	1,40	0,361	a
	BAU_2024	0,45	0,361	b
	BAU_HF_2022	2,8	0,452	a
	BAU_HF_2024	4,3	0,452	b
	ICLS_2022	3,15	0,707	/
	ICLS_2024	3,00	0,707	/
	Vegan_2022	4,60	0,707	/
Vegan_2024	5,05	0,707	/	
Shannon	Rotation_Année			
	BAU_2022	0,3521	0,0943	a
	BAU_2024	0,0318	0,0943	b
	BAU_HF_2022	0,731	0,097	a
	BAU_HF_2024	1,217	0,097	b
	ICLS_2022	0,904	0,188	/
	ICLS_2024	0,746	0,188	/
	Vegan_2022	1,19	0,136	/
Vegan_2024	1,06	0,136	/	
Pielou	Rotation			
	BAU	0,199	0,3521	a
	BAU_HF	0,610	0,3521	b
	ICLS	0,507	0,3521	b
	Vegan	0,607	0,3521	b
	Année			
	2022	0,522	0,0374	b
2024	0,418	0,0360	a	

Annexe 7. Moyennes marginales et erreurs standard des indices de biodiversité de la flore réalisée au 2^{ème} comptage lors de l'étude de la biomasse en temporalité 1.

	Rotation_Année	Moyenne marginale	Erreur standard	Groupe
Biomasse	BAU_2022	5,86	4,36	/
	BAU_2024	8,58	4,36	/
	BAU_HF_2022	11,3	2,41	a
	BAU_HF_2024	60,2	11,99	b
	ICLS_2022	14,6	9,2	a
	ICLS_2024	38,0	9,2	b
	Vegan_2022	21,9	4,17	a
	Vegan_2024	65,9	12,58	b
Pielou	Rotation			
	BAU	0,170	0,0360	a
	BAU_HF	0,525	0,0641	b
	ICLS	0,431	0,0615	b
	Vegan	0,558	0,0631	b
	Année			
	2022	0,498	0,0527	b
	2024	0,319	0,0463	a

Annexe 8. Liste des codes EPPO, noms latins et noms vernaculaires des espèces considérées dans le cadre de ce travail.

CODE EPPO	NOM LATIN	NOM VERNACULAIRE
ACHMI	<i>Achillea millefolium</i> L.	Achillée millefeuille
AETCY	<i>Aethusa cynapium</i> L.	Ethuse ciguë
ALOMY	<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.	Vulpin des champs
APESV	<i>Apera spica-venti</i> L.P.Beauv.	Agrostis jouet du vent
ATXHA	<i>Atriplex prostrata</i> Boucher ex DC.	Arroche hastée
ATXPA	<i>Atriplex patula</i> L.	Arroche étalée
AVEFA	<i>Avena fatua</i> L.	Folle-avoine
BRSNN	<i>Brassica napus</i> L.	Colza
CAPBPE	<i>Capsella bursa-pastoris</i> L. Medik.	Capselle bourse-à-pasteur
CENCY	<i>Cyanus segetum</i> Hill	Centaurée bleuet
CERGL	<i>Cerastium glomeratum</i> Thuill.	Céraiste aggloméré
CHEAL	<i>Chenopodium album</i> L.	Chénopode blanc
CHEMU	<i>Chenopodium murale</i> L.	Chénopode des murs
CHYSE	<i>Glebionis segetum</i> L. Fourr.	Chrysanthème des moissons
CIRAR	<i>Cirsium arvense</i> L. Scop.	Chardon des champs
CMASA	<i>Camelina sativa</i> (L.) Crantz	Cameline
ECHCG	<i>Echinochloa crus-galli</i> (L.) P. Bauv.	Panic pied-de-coq
EPIAD	<i>Epilobium tetragonum</i> L.	Epilobe à quatre angles
EPHHE	<i>Euphorbia helioscopia</i> L.	Euphorbr réveil-matin
ERIFL	<i>Erigeron sumatrensis</i> Retz.	Vergerette de Sumatra
FUMOF	<i>Fumaria officinalis</i> L.	Fumeterre officinale
GAETE	<i>Galeopsis tetrahit</i> L.	Ortie royale
GALAP	<i>Gallium aparine</i> L.	Gaillet gratteron
GERSS	<i>Geranium</i> sp.	Geranium
JUNBU	<i>Juncus bufonius</i> L.	Jonc des crapauds
LAMAM	<i>Lamium amplexicaule</i> L.	Lamier amplexicaule
LAMPU	<i>Lamium purpureum</i> L.	Lamier pourpre
LOLMU	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	Ray-grass d'Italie
LOLPE	<i>Lolium perenne</i> L.	Ray-grass anglais
MATCH	<i>Matricaria chamomilla</i> L.	Matricaire camomille
MERAN	<i>Mercurialis annua</i> L.	Mercuriale annuelle
PAPRH	<i>Papaver rhoeas</i> L.	Coquelicot
PICHI	<i>Picris hieracioides</i> L.	Picris fausse épervière
PIBSX	<i>Pisum sativum</i> L.	Pois
PLAMA	<i>Plantago major</i> L.	Plantain majeur
POAAN	<i>Poa annua</i> L.	Pâturin annuel
POATR	<i>Poa trivialis</i> L.	Pâturin commun
POLAV	<i>Polygonum aviculare</i> L.	Renouée des oiseaux
POLCO	<i>Fallopia convolvulus</i> (L.) Á Löve	Renouée faux liseron
POLPE	<i>Persicaria maculosa</i> Gray	Renouée persicaire
RAPRA	<i>Raphanus raphanistrum</i> L.	Ravenelle
RUMCR	<i>Rumex crispus</i> L.	Rumex crépu
RUMOB	<i>Rumex obtusifolius</i> L.	Rumex à feuilles obtuses
SENVU	<i>Senecio vulgaris</i> L.	Sénéçon vulgaire
SINAL	<i>Sinapis alba</i> L.	Moutarde blanche
SINAR	<i>Sinapis arvensis</i> L.	Moutarde des champs
SOLNI	<i>Solanum nigrum</i> L.	Morelle noire
SOLTU	<i>Solanum tuberosum</i> L.	Pomme de terre
SONAR	<i>Sonchus arvensis</i> L.	Laiteron des champs

SONAS	<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill	Laiteron rude
SONOL	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Laiteron maraîcher
STEME	<i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	Stellaire intermédiaire
TAROF	<i>Taraxacum officinale</i> F.H.Wigg.	Pissenlit officinal
TRFRE	<i>Trifolium repens</i> L.	Trèfle rampant
TRFSU	<i>Trifolium subterraneum</i> L.	Trèfle souterrain
VERAR	<i>Veronica arvensis</i> L.	Véronique des champs
VERHE	<i>Veronica hederifolia</i> L.	Véronique à feuilles de lierre
VERPE	<i>Veronica persica</i> L.	Véronique de Perse
VIOAR	<i>Viola arvensis</i> Murray	Pensée des champs

Annexe 9. Tableau récapitulatif des opérations culturales relatives aux cultures de l'essai.

	Froment traité	Froment non traité	Avoine	Prairie temporaire
Variété ou mélange d'espèces pour la prairie	Imperator	Imperator	Avoine	Ray-grass anglais intermédiaire 2n, Ray-grass anglais tardif 4n, Fétuque des prés, Fétuque élevée tardive, Trèfle blanc, Lotier
Travail du sol	14/12/2023 Labour	14/12/2023 Labour	14/12/2023 Labour 11/04/2024 Préparation du sol	15/08/2022 Déchaumage
Date de semis	14/12/2023	14/12/2023	12/04/2024	30/09/2022
Fertilisation	20/03/2024 Azote liquide 39 % k 25/04/2024 Azote liquide 39 % k 17/05/2024 Azote liquide 39 % k	20/03/2024 Azote liquide 39 % k 25/04/2024 Azote liquide 39 % k 17/05/2024 Azote liquide 39 % k	03/06/2024 Azote liquide 39% k	03/04/2024 Fertilisation solide 12-4-21
Désherbage mécanique	/	/	/	/
Désherbage chimique	08/04/2024 Actirob B Sigma star Zypar	/	/	/
Régulateur de croissance	14/05/2024 Stabilan 750	/	/	/