
Etude de la flore adventice potentielle et exprimée au sein des différents itinéraires agricoles des essais Ecofoodsystem et Solresidu dans un contexte agroécologique

Auteur : Van Den Abeele, Martin

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

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15211>

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.

**ETUDE DE LA FLORE ADVENTICE POTENTIELLE ET
EXPRIMÉE AU SEIN DES DIFFÉRENTS ITINÉRAIRES
AGRICILES DES ESSAIS ECOFOODSYSTEM ET SOLRESIDU
DANS UN CONTEXTE AGROÉCOLOGIQUE**

MARTIN VAN DEN ABEELE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT, À FINALITÉ

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

CO-PROMOTEURS: MONTY ARNAUD & DE CLERCK CAROLINE

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

ETUDE DE LA FLORE ADVENTICE POTENTIELLE ET
EXPRIMÉE AU SEIN DES DIFFÉRENTS ITINÉRAIRES
AGRICILES DES ESSAIS ECOFOODSYSTEM ET SOLRESIDU
DANS UN CONTEXTE AGROÉCOLOGIQUE

MARTIN VAN DEN ABEELE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT, À FINALITÉ

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

CO-PROMOTEURS: MONTY ARNAUD & DE CLERCK CAROLINE

Remerciements

Tout d'abords j'aimerais remercier mes co-promoteurs Mr Monty et Mme De Clerck de m'avoir permis de réaliser ce travail de fin d'étude. Vos conseils et votre encadrement m'ont été d'une aide précieuse.

Je tiens à adresser un remerciement particulier à Christophe Lacroix pour le suivi qu'il m'a accordé tout au long de ce travail. Merci de m'avoir prêté main forte pendant les comptages et les prélèvements sur le terrain et pour le temps que tu m'as consacré de manière générale. Grâce à toi je sais maintenant que « le début, c'est toujours le début ».

J'aimerais remercier l'ensemble du personnel de l'unité de phytotechnie tempérée pour leur accueil. Merci aux Tfistes et doctorants de l'open-space de m'avoir supporté pendant ces quelques mois. Vous avez su m'offrir un environnement de travail de qualité.

Je souhaiterais également remercier Florian de m'avoir permis d'utiliser son drone et de m'avoir accompagné dans son utilisation. Merci également pour tous ces moments et ces petites mousses qu'on a partagés !

Je me dois de remercier les membres du KSH, grâce à vous j'ai la chance de pouvoir me souvenir de moments inoubliables.

Enfin je tiens à remercier Marie pour son soutien. Me supporter pendant cette période n'a pas été chose simple, je te remercie pour la patience, la bienveillance et l'écoute dont tu as fait preuve. Merci pour tes conseils et ton implication dans les relectures.

Résumé

Les communautés d'adventices se forment par la combinaison de plusieurs facteurs tels que des facteurs abiotiques comme le climat ou les propriétés du sol (Andreasen et al., 1991), des facteurs biotiques comme la concurrence de la culture ou d'espèce d'adventices (Caussanel, 1989), les pratiques agricoles (Dale et al., 1992) et l'hétérogénéité du paysage (Weibull et al., 2003 ; Roschewitz et al., 2005 ; Boutin et al., 2008). Bien que souvent perçues comme dommageables en raison de leur compétition avec les cultures, les adventices constituent une composante essentielle des agroécosystèmes. Cette étude a pour objectif d'évaluer l'influence des différents leviers agronomiques que sont les rotations innovantes du projet EcoFoodSystem et le type de travail du sol et de gestion des résidus de culture du projet SOLRESIDU sur la composition et le développement de la flore adventice. Différents indices écologiques (richesse, diversité, équitabilité) ainsi qu'une analyse des traits fonctionnels sont utilisés afin de caractériser la flore adventice des agroécosystèmes représentés par ces essais. La flore potentielle est déterminée par un suivi du stock semencier grâce à des échantillons de sols prélevés dans chacune des parcelles des essais concernés et mis en culture en laboratoire. La flore exprimée en champs est obtenue par un comptage et une identification des adventices directement au sein des parcelles.

Il résulte de cette étude que les rotations innovantes du projet EcoFoodSystem permettent de développer une flore adventice diversifiée. Cette diversification des espèces au sein de la flore adventice a un impact positif sur les performances de la culture. Elle s'avère être une stratégie exploitable afin d'élaborer des systèmes de culture performants et soucieux de l'environnement. Le projet SOLRESIDU a permis de confirmer l'efficacité du levier agronomique qu'est le labour. Il a également permis d'exprimer l'influence de l'incorporation des résidus de culture sur le développement de la flore adventice.

Mots-clés : flore adventice, rotation, labour, résidus de culture, biodiversité, traits fonctionnels, EcoFoodSystem, SOLRESIDU

Abstract

Weed communities are formed by a combination of several factors such as abiotic factors like climate or soil properties (Andreasen et al., 1991), biotic factors like crop or weed species competition (Caussanel, 1989), agricultural practices (Dale et al., 1992) and landscape heterogeneity (Weibull et al., 2003; Roschewitz et al., 2005; Boutin et al., 2008). Although often considered damaging due to their competition with crops, weeds are an essential component of agroecosystems. The objective of this study is to evaluate the influence of different agronomic levers such as the innovative rotations of the EcoFoodSystem project and the type of tillage and crop residue management of the SOLRESIDU project on the composition and development of the weed flora. Different ecological indices (richness, diversity, equitability) as well as an analysis of functional traits are used to characterize the weed flora of the agroecosystems represented by these trials. The potential flora is determined by monitoring the seed stock using soil samples taken from each of the plots in the trials concerned and grown in the laboratory. The flora expressed in the field is obtained by counting and identifying weeds directly in the plots.

The result of this study is that the innovative rotations of the EcoFoodSystem project allow the development of a diversified weed flora. This diversification of species within the weed flora has a positive impact on crop performance. It proves to be an exploitable strategy to develop efficient and environmentally friendly cropping systems. The SOLRESIDU project has confirmed the effectiveness of

the agronomic lever of ploughing. It has also allowed us to express the influence of the incorporation of crop residues on the development of the weed flora.

Keywords: weed flora, rotation, tillage, crop residues, biodiversity, functional traits, EcoFoodSystem, SOLRESIDU

Table des matières

I.	Introduction	1
II.	Synthèse Bibliographique	2
II.1.	Définition et impacts des adventices	2
II.2.	Les services écosystémiques	3
II.3.	Lutte et stratégie	3
II.4.	Le stock semencier	5
II.5.	Approche trait fonctionnel	6
III.	Objectifs	7
IV.	Matériels et Méthodes	8
IV.1.	Contexte EcoFoodSystem	8
IV.1.1.	Dispositif expérimental	9
IV.2.	Contexte SOLRESIDU	10
IV.2.1.	Dispositif expérimental	10
IV.3.	Localisation des projets et situation météo	11
IV.4.	Suivi de la flore potentielle	11
IV.4.1.	Echantillonnage	11
IV.4.2.	Dispositif expérimental	12
IV.4.3.	Suivi expérimental en laboratoire	13
IV.5.	Suivi de la flore exprimée en champs	14
IV.6.	Description des communautés d'adventice	14
IV.6.1.	Richesse spécifique	14
IV.6.2.	Diversité alpha	15
IV.6.3.	Diversité fonctionnelle	16
IV.8.	Analyse statistique	16
V.	Résultats	18
V.1.	Flore adventice exprimée	18
V.1.1.	EcoFoodSystem (1 ^{er} comptage)	18
V.1.2.	EcoFoodSystem (2 ^{ème} comptage)	23
V.1.3.	SOLRESIDU (1 ^{er} comptage)	34

V.1.4. SOLRESIDU (2 ^{ème} comptage).....	38
V.2. Flore adventice potentielle	46
V.2.1. EcoFoodSystem	46
V.2.2. SOLRESIDU.....	51
VI. Discussion	56
VI.1. Critique de l'échantillonnage	56
VI.2. Effet des rotations.....	57
VI.2.1. Impact de la culture précédente (EcoFoodSystem, T2).....	57
VI.2.2. Effet de la culture actuelle (EcoFoodSystem, T6)	59
VI.3. Effet du travail du sol et de la gestion des résidus de culture.....	60
VII. Conclusion.....	62
VIII. Annexe.....	64
IX. Références	78

Table des équations

Équation 1 : Estimateur Chao 1.....	15
Équation 2 : Indice de Shannon-Weaver (H).....	15
Équation 3 : Indice de Simpson (SI).....	15
Équation 4 : Indice d'équitabilité de Piélou	15

Table des abréviations

Til_IN : Labour conventionnel avec incorporation des résidus de culture
Til_OUT : Labour conventionnel avec exportation des résidus de culture
No_Til_IN : Travail du sol réduit avec incorporation des résidus de cultures
No_Til_OUT : Travail du sol réduit avec exportation des résidus de cultures
SFS : Surface foliaire spécifique
PLH : Hauteur de la plante
SWT : Poids des graines
SN : Nombre de graines par plante
SSG : Période de germination
BFF : Début de période de floraison
DFF : Durée de floraison
SSB : Durée de vie de la banque de graines
SNC : Affinité aux conditions nutritives du sol
PT : Méthode de pollinisation
PSP : Support de pollinisateur
DT : Méthode de dissémination
GLS : Grime's life strategy
LSR : Life span x regeneration form
PCoA : Analyse en coordonnées principales

Table des figures

Figure 1 : Rotation de l'essai EcoFoodSystem avec (A) la rotation de référence et phyto, (B) la rotation agroécologique et (C) la rotation vegan. Les numéros représentent la temporalité allant de 1 à 8 étant donné la construction des rotations sur 8 ans.	8
Figure 2 : Localisation de l'essai EcoFoodSystem, visualisation de l'organisation des temporalités et des blocs.	9
Figure 3 : Schéma d'une parcelle type du projet EcoFoodSystem.	9
Figure 4 : Schéma de la disposition de parcelles de l'essai SOLRESIDU.	10
Figure 5 : Diagramme ombrothermique reprenant les données moyennes de Gembloux entre 1991 et 2020 (couleur blanche et rouge clair) et les données de 2022 (bleu et rouge foncé). Les données ne reprennent que les mois concernant l'expérience.	11
Figure 6 : Quadrat utilisé afin d'effectuer l'échantillonnage (prélèvement aux quatre coins) et pour réaliser le relevé d'adventices.	12
Figure 7 : Schéma du dispositif utilisé pour réaliser l'étude du stock semencier. (1) le bac non perforé, (2) l'échantillon de terre tamisée, (3) la couche de terreau, (4) la couche de billes d'argex, (5) le tube de PVC.	12
Figure 8 : Visualisation étape par étape de la réalisation du dispositif utilisé pour réaliser le stock semencier. (A) couche d'argex, (B) couche de terreau, (C) couche d'échantillon tamisé.	13
Figure 9 : Laboratoire utilisé pour réaliser le suivi du stock semencier.	13
Figure 10 : Lien entre les différentes matrices de l'analyse RLQ (Gámez-Virués et al., 2015).	17
Figure 11 : Courbes de raréfaction exprimant le nombre d'espèces cumulées selon l'effort d'échantillonnage pour les quatre rotations de culture et à l'échelle du projet.	18
Figure 12 : Graphiques présentant les proportions en adventices en fonction des rotations pour la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite). Les espèces les plus présentes sont PAPRH (<i>Papaver rhoeas</i> L.) et APESV (<i>Apera spica venti</i> L.) représentant respectivement 57,57% et 16,56% de l'échantillonnage total, (EcoFoodSystem, 1 ^{er} comptage).	19
Figure 13 : Graphique présentant l'influence des rotations sur la richesse en espèces au sein de la temporalité 6 de l'essai (EcoFoodSystem, 1 ^{er} comptage).	20
Figure 14 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la diversité de Shannon (gauche) et la diversité de Simpson (droite) au sein de la temporalité 6 (EcoFoodSystem, 1 ^{er} comptage).	21
Figure 15 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'équitabilité au sein de la temporalité 6 (EcoFoodSystem, 1 ^{er} comptage).	21
Figure 16 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'abondance en espèces au sein de la temporalité 2 (gauche) et de la temporalité 6 (droite) (EcoFoodSystem, 1 ^{er} comptage).	22
Figure 17 : Analyse en coordonnées principales de la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite) (EcoFoodSystem, 1 ^{er} comptage).	22
Figure 18 : Graphiques présentant les courbes de raréfaction réalisées sur les différentes rotations et pour le projet dans son ensemble, (EcoFoodSystem, 2 ^{ème} comptage).	23
Figure 19: Graphiques présentant les proportions d'adventices pour la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2 ^{ème} comptage). PAPRH représente 27,33% des adventices en temporalité 6. POLAV représente 27,48% en temporalité 2.	24
Figure 20 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la richesse en espèce en temporalité 2 (gauche) et 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2 ^{ème} comptage).	25
Figure 23 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'abondance en adventices pour la temporalité 2 (gauche) et 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2 ^{ème} comptage).	26
Figure 22 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'équitabilité de Pielou en temporalité 2 (gauche) et 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2 ^{ème} comptage).	26

Figure 21 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'indice de Shannon en temporalité 2 (gauche) et 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2ème comptage).	26
Figure 24 : Graphique présentant la proportion en espèces (en biomasse) en fonction de la rotation pour la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite) de l'essai EcoFoodSystem. PAPRH représente 57,74% de la biomasse en temporalité 6 et 20,5% en temporalité 2.	27
Figure 25 : Graphiques présentant l'influence de la rotation sur (A) la biomasse d'adventices et (B) la biomasse de froment (EcoFoodSystem, temporalité 2).	28
Figure 26 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la biomasse d'adventices (A), de pois (B) et de la culture totale (C) au sein de la temporalité 6 (EcoFoodSystem, 2 ^{ème} comptage).	29
Figure 27 : Graphiques présentant l'influence (A) de la richesse, (B) l'indice de Shannon et (C) de la régularité (calculé selon la biomasse) sur la biomasse en adventices (EcoFoodSystem, temporalité 2).	30
Figure 28 : Graphiques présentant l'influence de (A) la richesse, (B) l'indice de Shannon et (C) de l'abondance en adventices (calculées selon la biomasse) sur la biomasse du froment (EcoFoodSystem, temporalité 2).	30
Figure 29 : Graphiques représentant l'influence de la richesse (A), l'équitabilité (calculées selon la biomasse) (B) sur la biomasse en adventices (EcoFoodSystem, temporalité 6).....	31
Figure 30 : Graphiques représentant l'influence de la richesse (A), la diversité de Shannon (B) et la diversité de Simpson (C) sur la biomasse du pois (EcoFoodSystem, temporalité 6).	31
Figure 31 : Graphiques représentant l'influence de la biomasse d'adventices sur la biomasse du pois (A) et de la culture totale (B) (EcoFoodSystem, temporalité 6).	32
Figure 32 : Analyses en composantes principales basées sur les données de biomasse des adventices avec la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2ème comptage).	32
Figure 33 : Analyse RLQ réalisée sur le deuxième comptage de l'essai EcoFoodSystem sur base des données de biomasse en temporalité 2 (Gauche) et la temporalité 6 (droite). Les relations significatives positives sont en rouge, les significatives négatives en bleu et les non significatives en gris.....	33
Figure 34 : Courbes de raréfaction exprimant le nombre d'espèces cumulées selon l'effort d'échantillonnage pour les quatre stratégies de culture du projet SOLRESIDU ainsi que pour l'ensemble du projet (SOLRESIDU, 1er comptage).	34
Figure 35 : Graphique présentant les proportions en adventices en fonction des stratégies de culture (1 ^{er} comptage, SOLRESIDU).....	35
Figure 36 : Graphiques présentant l'influence du type de travail du sol sur la richesse en espèces (SOLRESIDU, 1er comptage).	36
Figure 37 : Graphique présentant l'influence du type de travail du sol sur l'abondance en adventices (SOLRESIDU, 1 ^{er}) comptage).	37
Figure 38 : Analyse en coordonnées principales basée sur les données du premier comptage de l'essai SOLRESIDU. Le graphique de gauche correspond à un cluster sur le type de gestion de résidus de culture et à droite sur les types de travail du sol. L'ensemble des stratégies de culture sont représentés par un code couleur.	37
Figure 39 : Courbes de raréfaction exprimant le nombre d'espèces cumulées selon l'effort d'échantillonnage pour les quatre stratégies de culture et pour l'ensemble du projet (SOLRESIDU, 2ème comptage).	38
Figure 40 : Graphique présentant les proportions d'adventices en fonction des stratégies de culture, (SOLRESIDU, 2 ^{ème} comptage).	39
Figure 41 : Graphiques présentant l'influence du type de travail du sol sur (A) la richesse en espèces, (B) la diversité de Shannon, (C) l'abondance en adventices (SOLRESIDU, 2ème comptage).	40

Figure 42 : Graphique présentant les proportions d'adventices en densité de biomasse (SOLRESIDU, 2 ^{ème} comptage).	41
Figure 43 : Biomasse du froment et des adventices en fonction du type de travail du sol (SOLRESIDU, 2 ^{ème} comptage).	42
Figure 44 : Graphiques présentant la biomasse du froment en fonction de la biomasse des adventices (SOLRESIDU, 2 ^{ème} comptage).	43
Figure 45 : Graphiques présentant l'influence de la diversité de Shannon, de Simpson et de l'équitabilité sur la biomasse en adventices (SolRésidu 2 ^{ème} comptage).	43
Figure 46 : Analyse en coordonnées principales basée sur les données de biomasse des adventices. Le graphique de gauche présente un cluster sur le type de travail du sol et à droite sur le type de gestion des résidus. Les quatre stratégies de culture sont représentées par un code couleur.	44
Figure 47 : Analyse RLQ réalisée à l'aide des données de biomasse lors du deuxième comptage de l'essai SOLRESIDU. Les relations significatives positives sont en rouge et les significatives négatives en bleu.	45
Figure 48 : Courbes d'accumulation réalisées pour les quatre rotations et l'ensemble du projet (EcoFoodSystem, stock semencier).	46
Figure 49 : Graphiques présentant les proportions d'adventices par m ² en fonction des rotations pour des deux temporalités EcoFoodSystem, stock semencier).	47
Figure 50 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la richesse (gauche), l'indice de Shannon (centre) et l'équitabilité (droite) de la temporalité 2 du stock semencier du projet EcoFoodSystem.	48
Figure 51 : Graphique présentant l'influence des rotations sur l'abondance en adventices de la temporalité 2 pour le stock semencier du projet EcoFoodSystem.	49
Figure 52 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la richesse (gauche) et l'abondance en adventices (droite) pour la temporalité 6 du stock semencier du projet EcoFoodSystem.	49
Figure 53 : Analyse en coordonnées principales réalisée sur la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite) du stock semencier du projet EcoFoodSystem.	50
Figure 54 : Analyse RLQ sur le stock semencier du projet EcoFoodSystem selon la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite). Les relations significatives positives sont en rouge et les significatives négatives en bleu.	50
Figure 55 : Courbes d'accumulation réalisées sur les quatre stratégies de cultures et à l'échelle du projet dans son ensemble (SOLRESIDU, stock semencier).	51
Figure 56 : Graphiques présentant les proportions d'adventices par stratégie de culture pour l'horizon de surface (gauche) et l'horizon en profondeur (droite), (SOLRESIDU, stock semencier).	52
Figure 57 : Graphiques présentant l'influence des stratégies de culture sur la richesse (Gauche) l'indice de Shannon (centre) et l'équitabilité (droite) pour les premiers 10 cm du sol (SOLRESIDU, stock semencier).	53
Figure 58 : Graphique présentant l'influence des stratégies de culture sur l'abondance en adventices sur les premiers 10 cm du sol (SOLRESIDU, stock semencier).	54
Figure 59 : Graphique présentant l'influence du type de travail du sol sur l'abondance en adventices dans le stock semencier entre 10 et 25 cm de profondeur pour le projet SOLRESIDU.	54
Figure 60 : Analyse en coordonnées principales du stock semencier l'horizon de surface entre 0 et 10 cm (gauche) et entre 10 et 25 cm (droite) pour le stock semencier du projet SOLRESIDU. Les clusters ainsi que le code couleur de ces deux graphiques correspondent aux aux différentes stratégies de culture.	55
Figure 61 : Analyse RLQ sur le stock semencier en considérant les échantillons reprenant les 10 premiers centimètres du sol (gauche) et l'horizon en profondeur entre 10 et 25 cm (droite) pour le	

projet SOLRESIDU. Les relations significatives positives sont en rouge, les significatives négatives en bleus et les non significatives en gris.....56

Table des annexes

Annexe 1 : Lexique des espèces rencontrées dans le cadre de ce travail.....	64
Annexe 2 : Schéma du bloc 1 et 2 du projet EcoFoodSystem.....	65
Annexe 3 : Schéma du bloc 3 et 4 du projet EcoFoodSystem.....	65
Annexe 4 : Tableau récapitulatif des moyennes des indices de biodiversité et de la biomasse de la flore exprimée du projet EcoFoodSystem.	66
Annexe 5 : Tableau récapitulatif des moyennes des indices de biodiversité et de la biomasse de la flore exprimée du projet SolRésidu.....	67
Annexe 6 : Tableau récapitulatif des moyennes des indices de biodiversité du stock semencier EcoFoodSystem.....	67
Annexe 7 : Tableau récapitulatif des moyennes des indices du stock semencier SOLRESIDU.	68
Annexe 8 : Tableau récapitulatif des opérations agricoles réalisées sur les parcelles du projet EcoFoodSystem.....	69
Annexe 9 : Tableau détaillé des traits fonctionnels utilisés.	69
Annexe 10 : Graphiques présentant les courbes de raréfaction du stock semencier et du deuxième comptage pour le projet EcoFoodSystem (gauche) et SOLRESIDU (droite).....	76
Annexe 11 : Représentation cartographique de la densité totale d'adventices recensées lors du deuxième comptage du projet SOLRESIDU.....	77
Annexe 12 : Recensement par photogrammétrie des Rumex obtusifolius (surplombant le couvert) présent dans le bloc 2 du projet EcoFoodSystem (2 ^{ème} comptage). La densité évaluée par drone est de 0.14 Rumex par m ² et la densité évaluée par quadrat est de 1 Rumex par m ²	78

I. Introduction

Avec l'évolution croissante de la démographie que nous connaissons, la terre devrait porter, selon les prévisions issues du dernier rapport de l'Organisation des Nations Unies, près de 9,7 milliards d'habitants à l'horizon 2050 (ONU, 2019). En parallèle, la superficie des terres utilisées pour l'agriculture tend à stagner au cours des dernières décennies, car les zones favorables à la production agroalimentaire se raréfient (Matson et al., 1997). En réponse, l'intensification agricole a conduit à une augmentation des rendements sans précédent (Pingali, 2012) apportant également son lot d'impacts environnementaux (Matson et al., 1997 ; Stoate et al., 2001 ; Kleijn et al., 2006). Le recours excessif aux produits phytosanitaires dans la lutte contre les bioagresseurs des cultures a notamment favorisé l'émergence de différentes adventices résistantes aux herbicides (Délye et al., 2013).

En 2015, l'Organisation des Nations Unies a adopté 17 objectifs mondiaux de développement durable à atteindre pour 2030 (FAO, 2021). L'un de ces objectifs visant à éradiquer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir une agriculture durable constitue une priorité du programme alimentaire mondial (FAO, 2021). Cependant, l'insécurité alimentaire modérée ou grave (déterminée à l'aide de l'échelle de mesure de l'insécurité alimentaire vécue ou échelle FIES) déjà en lente progression jusqu'en 2019, s'est vue accentuée en 2020 avec la crise sanitaire mondiale, passant de 26,6% à 30,4%. En d'autres termes, à l'échelle mondiale, près d'une personne sur trois n'avait pas accès à de la nourriture adéquate en 2020 (FAO, 2021). Outre la sous nutrition, il est à noter qu'une alimentation de mauvaise qualité contribue entre autres au surpoids et à l'obésité. En effet, la prévalence des maladies associées à des régimes alimentaires riches en calories augmente avec plus de 40% des hommes et des femmes en surpoids ou en situation d'obésité en 2021 (Willett, 2019)

Selon la commission Eat-Lancet, une transformation du régime alimentaire est nécessaire afin d'atteindre les objectifs de développement durable des Nations Unies et des accords de Paris (Willett, 2019). Afin d'établir un régime alimentaire durable de référence réduisant l'impact sur l'environnement, des objectifs scientifiques ont été établis et reposent sur les 9 limites planétaires universelles¹ (Willett, 2019). La transition vers des régimes alimentaires sains d'ici 2050 fournissant un apport de 2500 kcal/jour pour environ 10 milliards de personnes nécessitera des changements alimentaires importants, bien que différents d'une région à l'autre (Willett, 2019). Afin de mener à bien cette transition, la commission a mis en place cinq stratégies comprenant notamment une intensification durable de la production alimentaire générant une production de haute qualité (Willett, 2019). La gestion des ravageurs de culture est un enjeu primordial dans la perspective d'une agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

Afin de palier à la nuisibilité des adventices et des autres ravageurs des cultures tout en augmentant la productivité, l'agriculture est devenue dépendante aux intrants (herbicides, engrais azotés) et au travail intensif du sol, entraînant un large éventail d'impacts environnementaux (Stoate et al., 2009). Une gestion intégrée des adventices est cependant essentielle pour la conservation de la biodiversité qui est nécessaire au maintien des services écosystémiques soutenant l'agriculture (Willett, 2019). Il apparaît que l'un des principaux défis de l'agriculture de notre temps est de concilier productivité des cultures et durabilité environnementale (Stoate et al., 2009). Dès lors il apparaît judicieux d'étudier l'influence de la flore adventice au sein des agroécosystèmes, comme ce sera le cas dans ce travail.

¹ Le concept des limites planétaires définit un espace de développement sûr et juste pour l'humanité, fondé actuellement sur neuf processus biophysiques qui, ensemble, régulent la stabilité de la planète : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, les changements d'utilisation des sols, l'acidification des océans, l'utilisation mondiale de l'eau, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère, l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère.

II. Synthèse Bibliographique

II.1. Définition et impacts des adventices

La flore adventice regroupe un large éventail d'espèces végétales se développant spontanément dans des milieux modifiés par l'homme (Godinho, 1984). De ce fait, dans un champ cultivé, les adventices constituent l'ensemble des espèces végétales autres que l'espèce cultivée.

Dans le milieu agricole, la flore adventice est généralement perçue comme étant nuisible et responsable d'une perte de rendement pour la culture de blé estimée entre 7 et 13%, malgré les techniques de désherbage utilisées (Oerke, 2006). Cette nuisibilité se définit comme la gêne occasionnée par ces espèces à la culture et aux activités agricoles. Selon Caussanel (1989), elle se distingue en trois groupes. Premièrement, la nuisibilité dite primaire directe fait référence à la concurrence des plantes adventices pour les ressources (lumière, nutriments, ...) vis-à-vis de la culture ou à des phénomènes d'allélopathie² qui réduise le développement de la culture. Secondement, la nuisibilité primaire indirecte, se produit quand une baisse de la qualité de la récolte, de l'état sanitaire de la culture ou de la parcelle est constaté. Finalement, la nuisibilité secondaire se caractérise au niveau de la parcelle comme le réapprovisionnement du stock semencier du sol par les plantes adventices (Caussanel, 1989).

Plus spécifiquement, les mauvaises herbes peuvent agir comme vecteur ou réservoir d'agents pathogènes des plantes cultivées et influencer plus significativement l'incidence des maladies des cultures (Wisler et Norris, 2005). Elles peuvent par exemple devenir des plantes hôtes pour des champignons infectieux³ (Mantle, 1977), des virus⁴ (Lavina et al., 1996) ou encore pour des organismes parasites comme l'Orobanche rameuse (*Phelipanche ramosa* L. 1874), qui nuit au colza d'hiver, provoquant de fortes pertes de rendement (Gibot-Lerclerc et al, 2003).

Les plantes adventices sont le plus souvent caractérisées par un cycle de vie annuel avec un taux de croissance rapide, une production élevée de graines largement dispersées, des fruits qui persistent sur la plante et une propagation végétative rapide (Kuester et al., 2014). Les espèces les plus problématiques, c'est-à-dire celles connues pour réduire drastiquement le rendement, présentent généralement une synchronie avec le cycle de développement de la plante cultivée (Wilson & Wright 1990, Fried et al., 2009b). Parmi les spécificités caractérisant la flore adventice, il est à noter la présence de nombreuses thérophytes. Ces dernières se définissent comme des plantes annuelles dont les systèmes aériens et souterrains meurent après la production de graines, passant la saison hivernale sous forme de graines (Chauvel et al., 2018). La survie et l'accroissement de ces populations d'espèces adventices sont donc assurés exclusivement par la production de graines. Le cycle annuel de la majorité des plantes cultivées en grande culture explique la prédominance d'espèces thérophytes car il favorise les espèces adventices annuelles présentant cette même spécificité (Lososová et al. 2006, Fried 2007). La formation des communautés d'adventices résulte de la combinaison de plusieurs facteurs comprenant des facteurs abiotiques tels que le climat ou les propriétés du sol (Andreasen et al., 1991), des facteurs biotiques comme la concurrence de la culture (Caussanel, 1989) ou d'adventices, des pratiques agricoles (Dale et al., 1992) et de l'hétérogénéité du paysage (Weibull et al., 2003 ; Roschewitz et al., 2005 ; Boutin et al., 2008).

²L'allélopathie se définit comme tout effet direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante sur une autre, par le biais de composés biochimiques libérés dans l'environnement (Rice, 1984).

³ Par exemple : L'ergot du seigle (*Claviceps purpurea* Tul., 1853) pouvant être présent sur le vulpin des champs.

⁴ Par exemple : Le virus de la mosaïque du concombre (*Cucumber mosaic virus* ICTV, 1971).

La dispersion temporelle des graines est assurée par les processus de survie et de dormance des graines. La survie est principalement dépendante du vieillissement de l'embryon, du niveau de prédation et des attaques microbiennes et fongiques (Gaba, 2017). La dormance des graines se définit quant à elle, comme une stratégie permettant de retarder la germination dans le temps, contribuant de ce fait à la persistance des espèces dans des environnements imprévisibles (Venable & Lawlor, 1980). Il s'avère que la majeure partie de la flore adventice présente une dormance cyclique, se retrouvant dormante une saison et non la suivante, optimisant ainsi leur chance de germer dans un environnement favorable (Gaba, 2017).

II.2. Les services écosystémiques

Si d'une part, les adventices sont perçues comme dommageables car elles rivalisent avec les cultures pour les ressources et peuvent favoriser la présence de ravageurs engendrant des pertes de rendement (Oerke, 2006), elles constituent également une composante essentielle de l'agroécosystème (Bretagnolle & Gaba, 2015). En effet, la flore adventice contribue au maintien de services écosystémiques qui peuvent, dans une certaine mesure, soutenir la production agricole en maintenant par exemple, la présence de pollinisateurs (Bretagnolle & Gaba, 2015) et en contribuant à réduire les problèmes d'érosion des sols (Ruiz-Colmenero et al., 2013).

De surcroît, les adventices se retrouvent à la base du réseau trophique de l'agroécosystème, fournissant ainsi de la nourriture pour une série d'animaux tel que les vers de terre (Thompson et al., 1994), les arthropodes granivores et omnivores comme les carabes (Hawes et al., 2003), les fourmis (Jacob et al., 2006), les oiseaux des terres agricoles (comme la perdrix grise) qui dépendent des graines de plantes sauvages dans les champs de céréales (Wilson et al., 1999; Gibbons et al., 2006 ; Hollande et al., 2006) et certains mammifères (Manson et Stiles, 1998).

Les adventices peuvent également servir de ressource indirecte pour les espèces prédatrices (Hawes et al., 2003). Elles peuvent constituer une source de nourriture alternative pour les espèces jouant un rôle dans la lutte contre les ravageurs, comme les carabes omnivores qui se nourrissent de limaces et de pucerons (Kromp, 1999). De plus, les impacts peuvent être indirects grâce aux interactions trophiques. Un exemple est celui des vers de terre qui se nourrissent des graines d'adventices et qui, par leur activité, améliorent la qualité du sol en fournissant un habitat aux micro-organismes, ces derniers pouvant exercer des activités antifongiques bénéfiques pour les plantes (Petit et al., 2010). Les adventices des cultures entretiennent donc des relations particulières avec d'autres groupes d'organismes, lesquelles sont généralement spécifiques à l'espèce (Petit et al., 2011). De ce fait, les services rendus par une communauté d'adventices dépendent strictement de l'ensemble des espèces individuelles et de leurs abondances respectives au sein de la communauté (Petit et al., 2011).

II.3. Lutte et stratégie

Au cours des dernières décennies, l'utilisation intensive des agroécosystèmes a mené à une intensification de l'utilisation des engrais et des produits phytosanitaires. De cet emploi intensif a découlé toute une série d'impacts environnementaux négatifs, influençant la qualité des sols et augmentant la pollution des eaux souterraine et de surface (Arias-Estevéz et al., 2008). Ces différents phénomènes entraînent de surcroît une forte réduction de la biodiversité (Robinson et Sutherland., 2002) exprimée par la richesse spécifique mais aussi par l'abondance des taxons (Benton et al., 2003 ; Tschardt et al., 2005). Des recherches antérieures sur les cultures céréalières ont révélé que par rapport au système conventionnel, les systèmes d'agriculture biologique ont des impacts positifs significatifs sur l'abondance et des impacts positifs marginaux sur la richesse en espèces (Cavigelli et al.

2008 ; Ryan et al. 2009 ; Crowder et al., 2010,2012). Malgré l'efficacité des produits phytosanitaires pour réduire les pertes potentielles globales de production agricole (de 50 % à des pertes réelles d'environ 30 %), les pertes de récolte induites par les ravageurs varient encore de 14 à 35 % selon les pays (Oerke, 2006).

Les impacts environnementaux, les effets sur la santé humaine ainsi que la résistance aux herbicides engendrés par les stratégies standards de gestion des adventices ont suscité un regain d'intérêt pour la gestion écologique des mauvaises herbes (Mortensen et al., 2000 ; Petit et al., 2018 ; Maclaren et al., 2020). Selon les principes de l'agroécologie, il est possible d'améliorer la durabilité et l'efficacité de la production des agroécosystèmes en ayant recours à moins d'intrants externes et en engendrant moins d'impacts environnementaux et sociaux négatifs (Gliessman, 2006 ; Wezel et al., 2009). De plus, une idée préconçue veut qu'une utilisation réduite d'herbicide conduira à une dynamique explosive des mauvaises herbes impactant la production agricole (Bastiaans et al. 2008). Selon une étude basée sur 946 exploitations agricoles non biologiques, aucune relation positive entre la productivité et le recours aux herbicides n'a été observée pour 71% des exploitations. De tels résultats suggèrent que les adventices ne constituent pas toujours une contrainte majeure pour la production et que l'utilisation d'herbicides pourrait être compensée par des méthodes de gestion intégrées curatives et préventives des adventices (Colbach et Cordeau 2018). La gestion intégrée des adventices repose sur des pratiques qui ont fait preuve d'une efficacité intéressante depuis des décennies dans la limitation à long terme de leurs impacts en agriculture biologique (Bàrberi, 2002). Elle combine la conception d'une rotation diversifiée des cultures et l'adaptation des pratiques culturales telles que la densité et la date de semis, la fertilisation équilibrée des cultures (Liebman et Davis, 2000), le type de travail du sol et le désherbage mécanique (Bastiaans et al.,2008).

La nuisibilité est grandement liée à la période d'émergence des adventices conjointement au stade de la culture (Dieleman et al., 1996 ; Knezevic et al., 1997 ; Zwerger et Arlt, 2002). L'itinéraire technique en parcelle agricole est alors établi dans le but de favoriser une compétition asymétrique des ressources lumineuses entre la flore adventice et les plantes cultivées durant le cycle cultural (Holt 1995). En effet, plusieurs études ont montré que, selon la période d'émergence, l'impact des adventices sur le rendement est différent (Oliver 1988 ; Dieleman et al., 1996 ; Knezevic et al., 1997 ; Zwerger et Arlt 2002). Par exemple, un décalage entre l'émergence de l'adventice et la levée de culture de trois à cinq semaines permet une diminution de l'incidence sur les rendements de soja ou de maïs (Swanton et al., 1999). Au contraire, si l'adventice apparaît trois semaines avant la récolte, le rendement ne baissera pas, quel que soit la couverture ou le pourcentage de l'adventice (Zwerger et Arlt 2002).

La rotation des cultures détermine le type de travail du sol, la date de semis, le type de désherbage mécanique, la quantité de résidus de culture et la période de compétition (Barzman et al., 2015 ; Koocheki et al.2009 ; Lechenet et al., 2014 ; Petit et al., 2015). Par conséquent, grâce à une rotation diversifiée, chaque culture et ses pratiques associées agiront comme un ensemble de filtres susceptibles de perturber les différentes phases du cycle de vie de la flore adventice potentiellement présente (Derksen et al., 2002).

Le labour conventionnel constitue un levier agronomique efficace dans le contrôle de l'infestation en adventices (Khaliq et al., 2013). Il permet notamment d'influencer la composition de la flore en modifiant la répartition verticale des graines dans le sol (Bulher, 1995) et les propriétés du sol comme le pH, le taux d'humidité et de matière organique (Belvins et al., 1973). A l'inverse, le travail du sol de conservation⁵ peut s'avérer être un levier efficace pour restaurer la fertilité du sol car il permet

⁵ L'agriculture de conservation est basée sur une couverture permanente du sol, des rotations de cultures et la réduction ou l'élimination du travail du sol. (FAO, 2001)

d'augmenter la teneur en matière organique grâce aux résidus de culture épandus ou incorporés dans le sol ce qui améliore la structure du sol mais également la disponibilité des principaux éléments nutritifs (Blevins & Frye, 1993 ; Mazzoncini et al., 2000). De plus, le recours au système de labour réduit ou du non-labour permet de réduire les problèmes liés au lessivage des nitrates et d'érosion des sols (Swanton et al., 1998). En outre, l'absence d'inversion du sol est généralement associée à une augmentation de l'infestation des adventices car les graines nouvellement tombées se retrouvent à la surface du sol favorisant leur chance d'émergence (Froud-Williams, 1988 ; Cardina et al., 1991 ; Spandl et al., 1999). Par conséquent, ces systèmes ont tendance à s'appuyer sur une utilisation plus importante d'herbicides (Worsham, 1991). Cependant, il est à noter que ces constatations sont fréquemment spécifiques à la culture et variables dans le temps (Armengot et al., 2015 ; Légère et al., 2013 ; Vakali et al., 2011). En outre, les systèmes de travail du sol de conservation peuvent modifier la composition de la communauté d'adventices en favorisant les espèces bisannuelles et pérennes ainsi que les graminées (Arshadet al., 1995 ; Young et al., 1996 ; Zanin et al., 1997). En effet, les graines de petite taille et légères semblent plus à même de survivre aux effets du labour, lequel favorise les graines à longévité importante (Albrecht & Auerswald 2009). Cependant, une infestation plus élevée en adventices engendrée par un travail du sol réduit ne provoque pas systématiquement une augmentation des pertes de rendement par rapport à un travail du sol conventionnel, car la densité en adventices n'atteint pas nécessairement le seuil permettant une diminution significative du rendement (Armengot et al., 2015

Les méthodes alternatives de gestion des adventices basées sur les différents leviers agronomiques disponibles peuvent difficilement égaler l'efficacité des herbicides synthétiques à eux seuls (Swanton et al., 2008). En complément de ces différents leviers, la gestion des adventices est également possible grâce à des outils de désherbage mécanique tels que la houe rotative, la herse-étrille et la bineuse, lesquelles s'avèrent être les plus fréquemment utilisées (Fontaine et al., 2013). Afin de maintenir la productivité des cultures tout en réduisant la dépendance aux herbicides, une combinaison diversifiée d'outils de gestion des mauvaises herbes réfléchi de manière cohérente à l'échelle de l'itinéraire cultural peut s'avérer suffisante (Anderson, 2007).

II.4. Le stock semencier

Le stock semencier ou banque de graine est défini comme « l'ensemble des semences adventices viables persistant plusieurs années dans le sol, leur germination étant inhibée par des processus de dormance ou un environnement défavorable » (Chauvel et al., 2018).

Les principales raisons d'estimer les banques de graine sont la compréhension de la dynamique des communautés et des populations végétales (Hanson 1938 ; Houle 1998 ; Allen et Nowak 2008), la caractérisation de la flore d'une zone (Major et Pyott 1966) et la prévention des infestations d'adventices (Ball et Miller 1989 ; Creech et al. 2008) qui constituent une menace potentielle pour la production agricole (Cavers et Benoit, 1989). En effet, les banques de semences peuvent être considérées comme la mémoire des communautés de mauvaises herbes, reflétant leur évolution dans les agroécosystèmes (Cavers, 1995). Ainsi, l'itinéraire agricole appliqué au cours d'une année donnée influencera la flore adventice l'année suivante (Haring & Flessner, 2018).

La relation entre la banque de graines et les communautés émergentes est délicate car seul un faible pourcentage des graines d'une banque de graine de sol germera (Zhang et al. 1998). Il existe une grande hétérogénéité spatiale de la distribution des espèces et des graines au sein d'un champ (Luschei 2003). La variabilité temporelle des conditions de croissance entraînera la germination de différentes fractions de la banque de graines de mauvaises herbes (Cardina et Sparrow 1996). Selon plusieurs études, seul 4 à 15% de la banque de graines est susceptible de germer au cours d'une année (Ball & Miller, 1989 ;

Barralis, Dessaint, & Chadoeuf, 1996 ; Dessaint, Chadoeuf, & Barralis, 1997 ; Forcella et al., 1992) et cette proportion peut varier selon les espèces (de 0,01 % pour le chénopode blanc (*Chénopodium album* L., 1753) (Ball & Miller, 1989) à 33 % pour *Polygonum persicaria* L., 1821 (Barralis et al., 1996)). La densité et la composition en espèces peuvent varier d'un champ à l'autre mais également au sein d'une parcelle (Buhler et al. 1997 ; Fenner, 1985 ; Mortensen et al. 1993).

Dans les sols agricoles, des densités de stocks semenciers ont été évaluées entre 0 et 1 million de graine/m² (Fenner, 1985). La plupart des banques de graines se composent de nombreuses espèces avec quelques adventices dominantes représentant 70 à 90 % du total. Un deuxième groupe d'adventices comprend 10 à 20 % de la banque de graines, mais elles ne sont pas aussi bien adaptées au système de production que les espèces dominantes. Le dernier groupe de semences est un petit pourcentage composé d'espèces nouvellement introduites et de semences de cultures précédentes (Wilson 1988). De plus, il est à noter que la banque de graines joue un rôle essentiel dans la dynamique des populations d'espèces qui se reproduisent par graines, tandis que les espèces se propageant principalement par voie végétative sont identifiées grâce aux banques de bourgeons (Klimešová et Klimeš, 2007).

L'un des enjeux majeurs pour améliorer la gestion des adventices est de déterminer si l'évaluation du stock semencier peut aider à prédire la nature des infestations futures de mauvaises herbes et les impacts sur le rendement des cultures (Buhler et al., 1997 ; Cardina et Sparrow 1996 ; Wilson et al., 1985).

II.5. Approche trait fonctionnel

Au vu du nombre d'espèces adventices, une analyse des propriétés écologiques centrée sur chaque espèce peut s'avérer fastidieuse. En revanche, une approche basée sur les traits de réponse-effet permet de s'affranchir en partie du problème. Les traits font référence aux caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologiques mesurables des individus contribuant à leur fonctionnement ou à leur fitness (Violle et al., 2009).

Une approche basée sur les traits fonctionnels des adventices permet de déterminer le résultat des interactions par le développement de hiérarchies de traits plutôt que de différences de niches (Bennett et al., 2016 ; Funk et al., 2016). Elle constitue un cadre prometteur pour quantifier les réponses des mauvaises herbes aux différents facteurs environnementaux et évaluer les effets des mauvaises herbes sur le fonctionnement de l'écosystème (Lavorel & Garnier, 2002). L'analyse des traits permet également de déterminer l'influence des mécanismes d'assemblage communautaire, tels que le filtrage environnemental, les hiérarchies compétitives et la différenciation des niches (Kraft et al., 2015). Dans le cadre d'un agroécosystème, l'assemblage des communautés d'adventice est fortement influencé par les perturbations et le stress lié à l'itinéraire agricole à l'échelle de la parcelle, pouvant être interprétés comme des filtres d'assemblage (Booth et Swanton 2002). D'un point de vue fonctionnel, une plus grande diversité dans les rotations de culture, d'apport de nutriments et de pratiques culturales conduira à une plus grande variété de traits de « réponse » aux mauvaises herbes, réduisant ainsi la prédominance des « traits d'effet » compétitifs qui ont un impact négatif sur le rendement des cultures (Navas, 2012). De plus, il est reconnu que la diversité fonctionnelle a un poids plus important que le nombre d'espèces (l'indice de biodiversité le plus communément étudié) dans la compréhension du fonctionnement d'un écosystème (Chauvel et al., 2018).

Au sein d'un champ il est possible d'observer des variations intraspécifiques significatives dans les valeurs des traits chez les espèces de mauvaises herbes communes entre le centre et la bordure du champ (Perronne et al., 2014). De plus, le type de culture et ses pratiques associées sont également une

source de variations intraspécifiques. Une différence de la surface foliaire spécifique (SLA) des adventices d'une même espèce a notamment été observée entre deux types de culture, probablement en raison d'un taux de couverture végétale sensiblement différent (Borgy et al., 2016). Les terres arables représentent donc à la fois une niche spécifique pour une flore spécialisée sélectionnée par des contraintes agronomiques et une niche étendue pour des espèces pré-adaptées ou généralistes (Vigueira et al., 2013).

Les approches basées sur les traits ont permis dans de nombreuses études d'établir les informations générales sur la réponse de la communauté d'adventices face aux pratiques agricoles (Storkey, 2006; Fried et al., 2009a ; Storkey et al., 2010 ; Gunton et al., 2011 ; Fried et al., 2012 ; Colbach et al., 2014 ; Perronne et al., 2015 ; Armengot et al., 2016), à l'hétérogénéité des paysages (Fried et al., 2009b ; Alignier et al., 2012), et aux propriétés environnementales caractérisant les limites des champs (Cordeau et al., 2012 ; Perronne et al., 2014).

III. Objectifs

Ce travail de fin d'étude s'intègre dans les projets EcoFoodSystem et SOLRESIDU pilotés par le centre d'appui à la recherche et à l'enseignement « *AgricultureisLife* » de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. L'objectif général de ce travail est de caractériser l'influence des rotations innovantes, du mode de gestion des résidus de culture et du type de travail du sol sur le développement de la flore adventice dans un contexte agroécologique en région limoneuse. Cependant, d'autres objectifs en découlent.

Tout d'abord, le premier objectif consiste à évaluer le niveau de salissement et la composition de la flore adventice des parcelles en lien avec l'itinéraire agricole utilisé. Dès lors, un recensement de la flore adventice exprimée et potentielle des essais EcoFoodSystem et SOLRESIDU sera réalisé. Au niveau de la flore exprimée, il s'agira d'effectuer une identification et un comptage des adventices présentes directement au sein des parcelles expérimentales. La flore potentielle, quant à elle, sera déterminée par un suivi du stock semencier grâce à des échantillons de sols prélevés dans chacune des parcelles des essais concernés et mis en culture en laboratoire. Le stock semencier relatif à chacune des parcelles sera mis en relation avec les relevés floristiques réalisés sur le champ afin d'évaluer l'homogénéité des parcelles quant à leur diversité floristique et leur niveau d'infestation.

Le deuxième objectif consiste à mesurer l'influence des différents leviers agronomiques que sont les rotations innovantes du projet EcoFoodSystem, le type de travail du sol et de gestion des résidus de culture du projet SOLRESIDU sur la composition et le développement de la flore adventice. Différents indices écologiques seront utilisés ainsi qu'une analyse des traits fonctionnels afin de caractériser la diversité fonctionnelle de la flore adventice des agroécosystèmes représentés par ces essais.

Enfin, le dernier objectif de ce travail de fin d'étude est de proposer des pistes d'amélioration des protocoles expérimentaux afin de permettre une amélioration continue des travaux de recherche dans ce domaine.

IV. Matériels et Méthodes

IV.1. Contexte EcoFoodSystem

Le projet « EcoFoodSystem » vise à étudier sur le long terme la durabilité de différents modes d'agriculture. Le projet prévoit de tester sur une durée d'au moins seize ans, quatre itinéraires agricoles innovants pensés pour assurer localement les besoins alimentaires et énergétiques d'une population qui s'alimenterait suivant les recommandations de la commission EAT-Lancet. Les quatre rotations testées sont établies sur une période de huit ans. Elles seront donc observées au moins deux fois au terme du délais expérimental et sont décrites comme telles :

1. Une rotation dite « phyto », pensée selon une méthode « business as usual ». Elle a recours aux herbicides de synthèse et intègre les animaux via des apports de fumier et des exportations de co-produits (figure 1A).
2. Une rotation dite de « référence », identique à la rotation « phyto », à la seule différence que tout type de produit phytosanitaire y est proscrit. La méthode de désherbage est de ce fait mécanique (figure 1A).
3. Une rotation dite « agroécologique », au sein de laquelle le bétail est à la fois un outil de fertilisation grâce aux apports de fumier et de gestion des adventices grâce au pâturage des prairies temporaires et intercultures. Le désherbage est exclusivement mécanique sans recours aux produits de synthèse (figure 1B).
4. Une rotation dite « végan », dans laquelle le bétail est banni et dont l'ensemble de la production est à destination humaine. Cette rotation est gérée sans produits phytosanitaires ni engrais organique d'origine animal (figure 1C).

Les rotations sont détaillées à la figure 1 et sont testées chaque année selon deux temporalités. En effet, chaque rotation a débuté par les cultures 1 et 5 lors de la mise en place de l'essai. Cette année 2021-2022 marque la deuxième année de l'expérience et les cultures observées sont la 2 et 6 correspondant respectivement au froment d'hiver et à une association froment-pois (sauf pour la rotation vegan). Il est à noter que l'année précédant le début de l'essai, l'ensemble des parcelles utilisées a été cultivée avec une céréale d'hiver dans le but d'homogénéiser les parcelles.

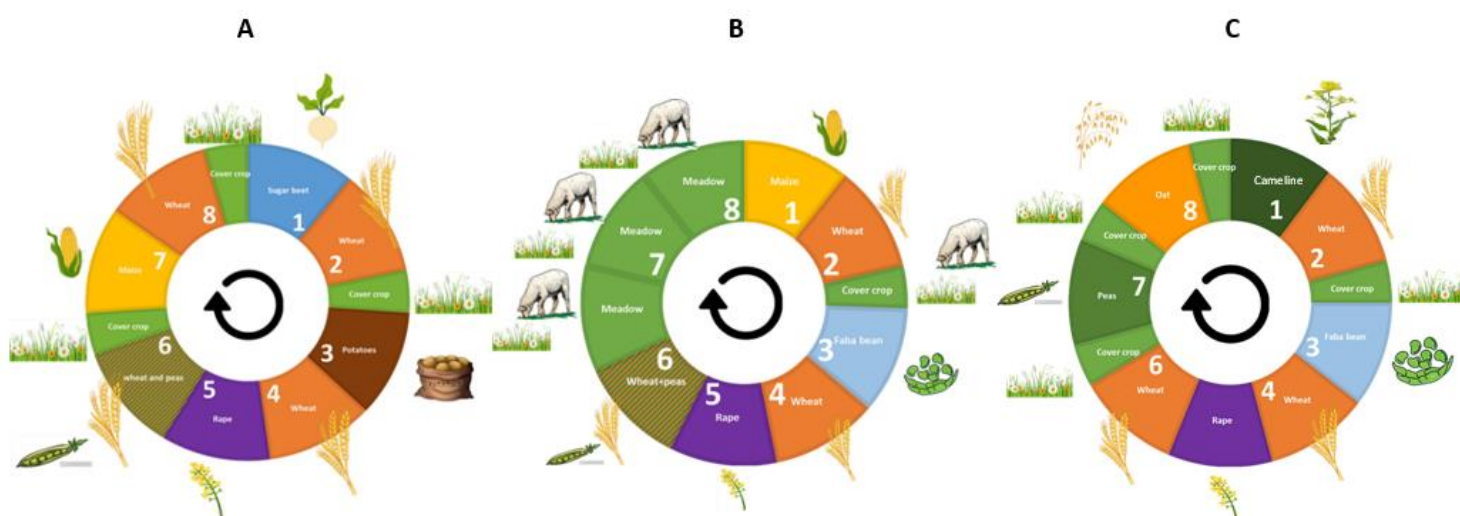


Figure 1 : Rotation de l'essai EcoFoodSystem avec (A) la rotation de référence et phyto, (B) la rotation agroécologique et (C) la rotation vegan. Les numéros représentent la temporalité allant de 1 à 8 étant donné la construction des rotations sur 8 ans.

IV.1.1. Dispositif expérimental

Les parcelles de l'essai EcoFoodSystem sont réparties en 4 blocs de 8 parcelles, réparties sur un total de 30 ha de terre agricole. Dans chacun des blocs, les 4 rotations sont testées en considérant les deux temporalités. Chaque temporalité de chacune des rotations est présente une fois dans les quatre blocs afin d'observer quatre répétitions. Les parcelles en temporalité 2 ont été cultivées essentiellement avec du froment et celles en temporalité 6 avec une association pois-froment et du froment pur (figure 1).



Figure 2 : Localisation de l'essai EcoFoodSystem, visualisation de l'organisation des temporalités et des blocs.

Les blocs de 84m x 144m sont composés de 8 parcelles de 84m x 18m et sont également bordés de part et d'autre par une bande fleurie (figure 2). Au sein des parcelles « brute » de 84 x 18m, est délimitée une parcelle dite « nette » de 42m x 15m, considérée comme homogène (figure 3). De plus, les parcelles sont divisées dans le sens de la longueur en deux parties distinctes, l'une permettant des tests destructifs et l'autre n'admettant aucune destruction. La partie autorisant des tests destructifs permet de réaliser l'identification et le comptage de la flore adventice exprimée ainsi que l'échantillonnage de sol, tandis que l'autre partie est utilisée exclusivement pour évaluer le rendement de la culture.

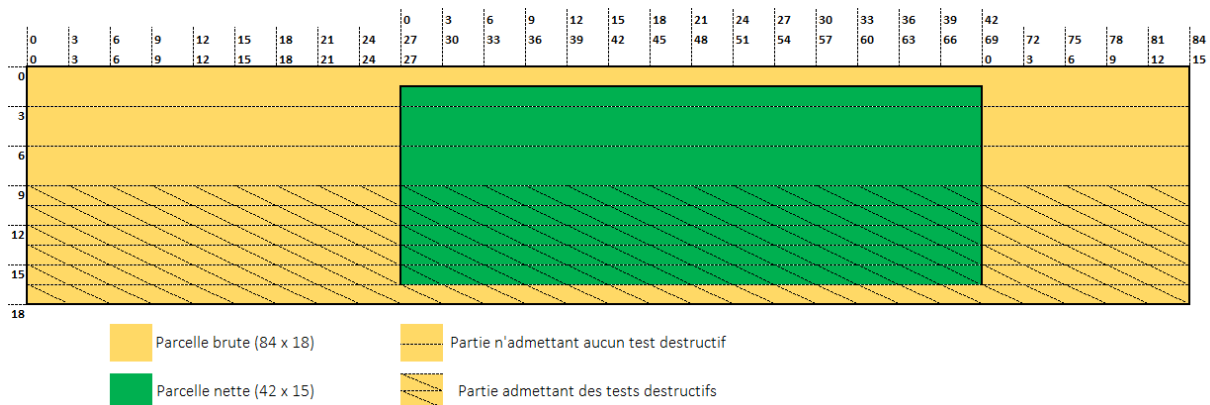


Figure 3 : Schéma d'une parcelle type du projet EcoFoodSystem.

IV.2. Contexte SOLRESIDU

Le projet « SOLRESIDU » est une expérience qui se centre sur une gestion plus durable des agroécosystèmes au travers de la gestion des résidus de culture et du travail du sol. Cet essai a débuté en 2008 et compare quatre stratégies croisant deux types de gestion des résidus de culture et deux types de travail du sol. Les gestions des résidus de culture diffèrent par la quantité de résidus restitués au sol, à savoir l'exportation ou l'incorporation des résidus tandis que le travail du sol met en opposition un travail réduit (10cm de profondeur) et un labour conventionnel (25cm de profondeur). Les différentes stratégies testées avec leurs abréviations sont reprises ci-dessous :

- Labour conventionnel avec incorporation des résidus de culture => Til_IN
- Labour conventionnel avec exportation des résidus de culture => Til_OUT
- Travail du sol réduit avec incorporation des résidus de cultures => No_Til_IN
- Travail du sol réduit avec exportation des résidus de cultures => No_Til_OUT

Dans cet essai, les opérations de désherbages sont réalisées chimiquement. Cette année les parcelles ont été cultivées avec du froment d'hiver.

IV.2.1. Dispositif expérimental

Le projet SOLRESIDU repose sur 1,7 ha de terre agricole. L'essai a été conçu comme une disposition en carré latin observant quatre répétitions. En effet, les deux types de travail du sol et de gestion des résidus sont croisés entre eux donnant quatre possibilités, lesquelles sont répétées quatre fois à travers l'essai pour un total de 16 parcelles expérimentales. Chaque parcelle de 15m x 40m est séparée par une bande de 3m dans la largeur et 16m dans la longueur comme illustré dans la figure 4. Une fois encore, les parcelles sont divisées dans le sens de la longueur en deux parties, une permettant des tests destructifs et l'autre ne le permettant pas (figure 3).



Figure 4 : Schéma de la disposition de parcelles de l'essai SOLRESIDU.

IV.3. Localisation des projets et situation météo

Le projet EcoFoodSystem et SOLRESIDU sont situés à Gembloux respectivement aux coordonnées (50°33'58.7"N 4°42'32.1"E) et (50°33'49,6"N, 4°42'45,0"E) dans la Hesbaye, en région agricole limoneuse. Selon la carte numérique des sols de Wallonie (Géoportail wallon), les parcelles des essais reposent sur un sol limoneux à drainage naturel favorable. Gembloux se situe dans une zone au climat tempéré océanique. Le début de l'année 2022 peut être considéré comme relativement sec en comparaison aux données météorologiques historiques (figure 5).

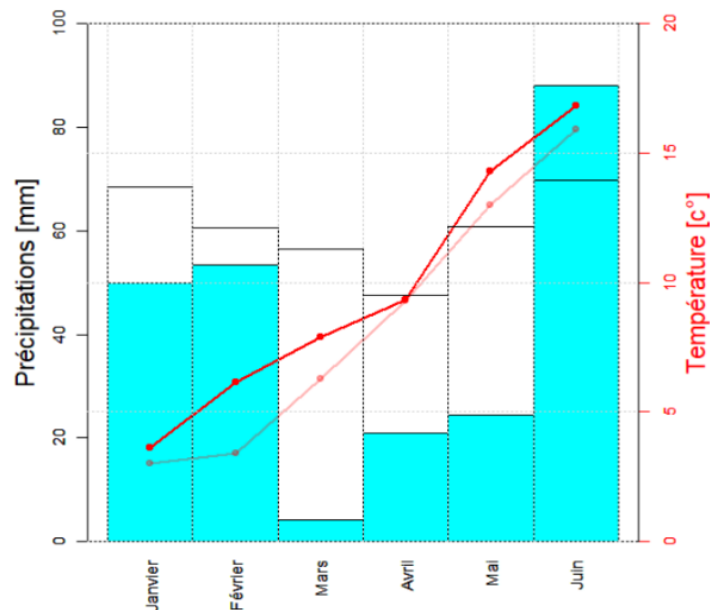


Figure 5 : Diagramme ombrothermique reprenant les données moyennes de Gembloux entre 1991 et 2020 (couleur blanche et rouge clair) et les données de 2022 (bleu et rouge foncé). Les données ne reprennent que les mois concernant l'expérience.

IV.4. Suivi de la flore potentielle

IV.4.1. Echantillonnage

L'échantillonnage ainsi que le nombre d'échantillons ont un impact substantiel sur l'estimation de la banque de graine et sa représentativité au champ (Mahe et al., 2020). En effet, la principale difficulté à décrire la banque de graine est l'hétérogénéité de la répartition des graines d'adventices dans le champ (Bigwood & Inouye, 1988; Dessaint, Chadoeuf, & Barralis, 1991; Plue & Hermy, 2012) et ce, malgré les zones où la végétation apparaît homogène (Gross, 1990).

Concernant le projet EcoFoodSystem, l'échantillonnage de sol a été réalisé le 14 janvier 2022 selon une stratégie de répartition dite en « W ». Dans chaque parcelle, cinq points d'échantillonnages ont été choisis, répartis selon un pas le plus régulier possible. Un quadrat de 0,5m x 0,5m (figure 6) placé à chacun de ces points a permis de prélever une carotte de sol en ses quatre coins. Les carottes ont été prélevées à l'aide d'une tarière de 2cm de diamètre et pouvant aller jusqu'à 25cm de profondeur. Au total, à raison de 5 points par parcelle, 160 points d'échantillonnage ont été prélevés.



Figure 6 : Quadrat utilisé afin d'effectuer l'échantillonnage (prélèvement aux quatre coins) et pour réaliser le relevé d'adventices.

Au niveau du projet SOLRESIDU, l'échantillonnage a été réalisé le 17 janvier 2022 selon une méthodologie identique au projet EcoFoodSystem. Cependant, étant donné les différentes modalités de profondeur de travail du sol entre les parcelles, l'échantillonnage a été réalisé en séparant l'horizon superficiel (0 – 10cm) de l'horizon en profondeur (10 – 25cm). A raison de cinq points par parcelle, 80 points d'échantillonnage ont été prélevés, séparés en deux pour les différents horizons, soit un total de 160 prélèvements.

Une fois terminé, les échantillons ont été stockés dans des sachets individuels et placés en chambre froide pour une durée de 15 jours. En effet, cette étape peut aider à briser la dormance des graines et augmenter le nombre de graines germées (Mahé et al., 2021).

IV.4.2. Dispositif expérimental

La méthode utilisée dans le cadre de ce travail afin d'estimer la banque de graine est la méthode d'émergence. La comparaison entre différentes études réalisant une estimation de la banque de graine a révélé que la méthode d'extraction se veut être la plus précise (Mesgaran et al. 2007) mais la méthode d'émergence lui est préférée pour son efficacité économique et son gain en temps (Kalamees et Zobel 2002 ; Ris Lambers et al. 2005 ; Clarke et Dorji 2008). Il est cependant à noter que la méthode d'émergence a tendance à sous-évaluer le stock semencier car il se peut que certaines dormances ne soient pas levées dans le délai de l'expérience (Guo et al. 1998).

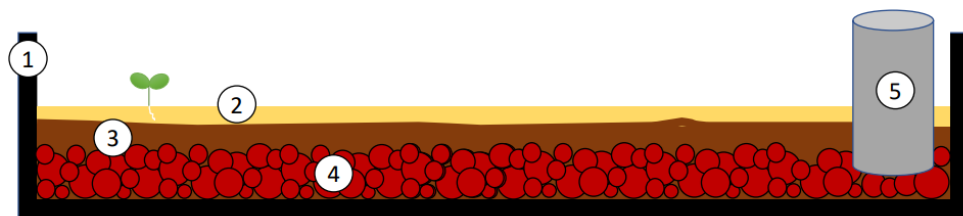


Figure 7 : Schéma du dispositif utilisé pour réaliser l'étude du stock semencier. (1) le bac non perforé, (2) l'échantillon de terre tamisée, (3) la couche de terreau, (4) la couche de billes d'argex, (5) le tube de PVC.

Une fois tamisés, les prélèvements de sols sont mis en culture dans des bacs non perforés et sont disposés sur une couche de terreau d'une épaisseur de 1cm et sur une couche de 1 à 2 cm de billes d'argex (figure 7 et 8). Un tube de PVC fait également la jonction entre la surface et le fond du bac afin de permettre un arrosage par le bas (figure 7 et 8). Le stock semencier a débuté le 02/02/2022 par un arrosage par le bas de tous les bacs et un arrosage par le haut au brumisateuseur.

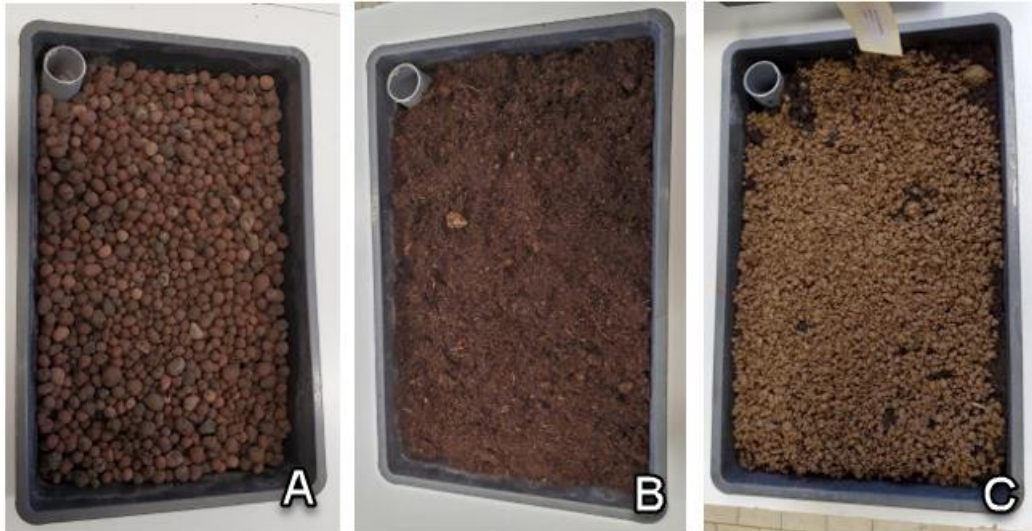


Figure 8 : Visualisation étape par étape de la réalisation du dispositif utilisé pour réaliser le stock semencier (A) couche d'argex, (B) couche de terreau, (C) couche d'échantillon tamisé.

IV.4.3. Suivi expérimental en laboratoire

Une fois par semaine, un arrosage par le bas (400ml) s'est avéré nécessaire afin de garder le terreau constamment humide. L'arrosage par brumisateuseur a été effectué ensuite un jour sur deux, de sorte que la surface ne soit, elle non plus, jamais asséchée. Selon plusieurs études réalisant un stock semencier, les taux d'émergence les plus élevés se produisent avec des sols continuellement humides ((Weise et Davis 1967 ; TerHeerdt et al. 1999). L'ensemble de l'approvisionnement en eau a été réalisé avec de l'eau issue du réseau de distribution de la ville de Gembloux. Au cours du suivi, un stress hydrique (arrêt de l'arrosage pendant 15 jours) a été appliqué entre le 08/04/22 et le 22/04/22 dans le but de stimuler la germination (Mahé et al., 2021).



Figure 9 : Laboratoire utilisé pour réaliser le suivi du stock semencier.

Une fois par mois, une réorganisation des bacs de manière aléatoire a permis de limiter le potentiel biais lié à l'hétérogénéité lumineuse au sein du laboratoire. Une fois par semaine, les adventices ayant atteint un stade de développement suffisant pour être identifiées ont été déracinées et comptabilisées dans la base de données.

IV.5. Suivi de la flore exprimée en champs

Dans un rayon de 3 m autour de chaque point d'échantillonnage (décrit dans la section « IV.4.1. »), un quadrat de 0,5m x 0,5m (figure 6) a été positionné et toutes les adventices présentes y ont été identifiées et comptées. Le quadrat était placé de sorte à inclure 4 lignes de semis de la culture. Le premier relevé de la flore adventice exprimée en champs a été effectué la première semaine de mars 2022 avant les premiers désherbages des deux projets. Un deuxième relevé a été effectué à floraison du froment ainsi qu'un prélèvement de biomasse de la culture et des adventices au sein des quadrats. La culture ainsi que les différentes espèces d'adventices présentes au sein des quadrats ont été séparées en sac et placées pendant 72h dans une étuve afin d'en obtenir une masse sèche. Avant d'être placée à l'étuve, le nombre d'épis et le nombre de tiges du froment ont été comptés.

IV.6. Description des communautés d'adventice

La diversité des communautés de mauvaises herbes a été caractérisée par quatre indices de biodiversité : la richesse en espèces (ou richesse spécifique), les indices de diversité de Shannon et Simpson et l'indice d'équitabilité de Pielou. De plus, l'abondance en adventices a également été étudiée, correspondant à la somme des individus présents dans un environnement donné.

IV.6.1. Richesse spécifique

La richesse en espèce (S) fait référence au nombre d'espèces différentes dans un milieu donné (Gardener, 2014). Il s'agira dans la pratique d'estimer la richesse grâce à la mesure du nombre d'espèces rencontrées lors de l'échantillonnage. Cette méthode a tendance à sous-évaluer la véritable richesse en espèce car il y a toujours une partie des espèces qui ne sont pas présentes dans l'échantillonnage (Palmer, 1990). Les méthodes paramétriques et courbes d'accumulations ont donc été utilisées car elles se révèlent être des méthodes efficaces pour évaluer le nombre d'espèces non détectées par l'échantillonnage (Colwell et Coddington, 1994).

La courbe d'accumulation d'espèces représente le nombre cumulé d'espèces en fonction du nombre d'individus recensé ou de l'effort d'échantillonnage comme le temps d'échantillonnage ou la surface échantillonnée (Colwell et Coddington, 1994). Ce graphique exprime une asymptote correspondant à un plateau auquel l'augmentation de l'effort apporte de moins en moins de nouvelles espèces. Une extrapolation de la valeur seuil de ce plateau correspond à l'estimation de la richesse totale en espèces (Colwell et Coddington, 1994). Il est à noter que l'ordre d'introduction des unités d'échantillonnages peut être rendu aléatoire de sorte qu'il n'influence pas l'allure de la courbe. En répétant cette manœuvre avec suffisamment d'itération, on obtient une courbe d'accumulation moyenne ou courbe de raréfaction (Dengler, 2009).

L'estimateur non paramétrique Chao1 est utilisé afin d'évaluer le nombre d'espèces non recensées par l'échantillonnage. Il se veut moins biaisé que l'estimateur Chao2 sous une intensité d'échantillonnage allant de faible à intermédiaire (Brose & Martinez, 2004).

$$S_1 = S_{obs} + \frac{a^2}{2b}$$

Équation 1 : Estimateur Chao 1

Avec S_{obs} , le nombre d'espèces observées, « a » le nombre d'espèces représentées par un seul individu et « b » le nombre d'espèces représentées par deux individus.

IV.6.2. Diversité alpha

La diversité alpha représente la diversité au sein d'une même communauté (Jost, 2007), autrement dit dans ce cas, au sein d'un même itinéraire agricole. Trois indices permettent de caractériser la diversité alpha. Tout d'abord, l'indice de Shannon-Weaver (H) qui se base sur la richesse spécifique (Shannon & Weaver, 1949) et se calcule comme suit :

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

Équation 2 : Indice de Shannon-Weaver (H)

Avec p_i la proportion relative des individus de l'espèce i dans une communauté comptant S espèces. Cet indice varie de 0 à $\log_2 S$. Un indice de Shannon plus faible indique que la communauté est dominée par une seule espèce.

Ensuite, l'indice de Simpson (SI) est déterminé par la probabilité que deux individus sélectionnés au hasard au sein de la communauté soient de la même espèce (Simpson, 1949). Cet indice attache plus d'importance aux espèces abondantes (Nagendra, 2002). Il s'avère être le moins biaisé selon Mouillot et Lepêtre (1999), bien qu'il sous-estime la population, tout comme l'indice de Shannon. Cet indice se calcule de la façon suivante :

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

Équation 3 : Indice de Simpson (SI)

Avec p_i la proportion relative des individus de l'espèce i dans une population comptant S espèces. L'indice de Simpson varie de 0 à 1 (Mouillot et Lepêtre, 1999), une valeur élevée signifiant que la communauté est diversifiée.

Enfin, l'indice d'équitabilité (E) de Pielou, ou indice d'équirépartition, mesure l'écart entre la distribution des individus parmi les espèces observées et une distribution uniforme (Mouillot et Lepêtre, 1999). L'équation est décrite ci-dessous :

$$E = \frac{H}{\log_2 S}$$

Équation 4 : Indice d'équitabilité de Pielou

Avec H l'indice de Shannon-Weaver (ou Simpson) et S la richesse spécifique. En fonction de l'indice de diversité utilisé, l'équitabilité accorde plus d'importance aux espèces rares (Shannon) ou abondantes (Simpson) (Grall et Coïc, 2005). Cet indice s'étend de 0 lorsqu'une espèce domine à 1 lorsqu'il y a une équirépartition de l'abondance entre les espèces. Il est à noter que l'équitabilité a tendance à être surestimée étant donné la tendance naturelle de la richesse à être sous-estimée.

IV.6.3. Diversité fonctionnelle

L'analyse de différents traits fonctionnels est réalisée afin de caractériser les stratégies d'adaptation des adventices face aux perturbations environnementales. D'une part, les traits morphologiques classiquement mesurés en écologie ont été étudiés, en particulier ceux associés au schéma L-H-S (Leaf-Height-Seed) proposé par Westoby (1998). D'autre part, étant donné la fréquence des perturbations agronomiques et le cycle de vie majoritairement annuel des adventices, certains traits phénologiques également importants pour leur survie ont été utilisés. Ces traits sont notamment liés à l'émergence, la production de graines ou encore la persistance des graines dans le sol (Hawes et al., 2005). Le tableau 1 ci-dessous reprend les différents traits fonctionnels utilisés et la base de données utilisée. Un tableau plus complet reprenant la signification de chaque trait est disponible à l'annexe 9.

Tableau 1 : Traits fonctionnels utilisés lors de l'analyse de la diversité fonctionnelle.

	Traits	Base de données
Traits morphologiques	Surface foliaire spécifique (SFS)	Bàrberi et al., 2018
	Hauteur de la plante (PLH)	Bàrberi et al., 2018
	Poids des graines (SWT)	Bàrberi et al., 2018
	Nombre de graines par plante (SN)	Leda
Traits phénologiques	Période de germination (SSG)	Bàrberi et al., 2018
	Début de période de floraison (BFF)	Bàrberi et al., 2018
	Durée de floraison (DFF)	Bàrberi et al., 2018
	Durée de vie de la banque de graines (SSB)	Bàrberi et al., 2018
	Affinité aux conditions nutritives du sol (SNC)	Bàrberi et al., 2018
	Méthode de pollinisation (PT)	Baseflor
	Support de pollinisateur (PSP)	Bàrberi et al., 2018
	Méthode de dissémination (DT)	Baseflor
	Grime's life strategy (GLS)	Bàrberi et al., 2018
Life span x regeneration form (LSR)	Bàrberi et al., 2018	
Autres	Indices d'Ellenberg	Ellenberg et al., 1992

De plus, les valeurs indicatrices d'Ellenberg (1992) ont été utilisées afin de déterminer si les conditions environnementales induites par l'itinéraire agricole permettent ou restreignent la présence d'espèces. Ces indicateurs peuvent également être utilisés comme un système numérique pour classer la niche d'habitat des espèces (Silvertown et al., 2006). Ils permettent donc d'évaluer la tolérance des espèces à différents paramètres écologiques (Ellenberg et al., 1992) : la lumière, l'humidité édaphique, le niveau d'acidité, l'azote et la salinité.

IV.8. Analyse statistique

L'analyse statistique suit les mêmes étapes pour les deux projets et s'est réalisée avec le logiciel Rstudio. Les packages suivants ont été nécessaires : lme4, ade4, dplyr, vegan, FactoMineR, emmeans.

Le projet EcoFoodSystem se centre sur l'impact des rotations et donc sur la succession des cultures. Dès lors, l'analyse a été effectuée sur chaque temporalité de manière séparée. De cette manière, en comparant les rotations de la temporalité 2, c'est l'impact du précédent de culture qui est étudié car les parcelles ne sont cultivées cette année qu'avec du froment. En comparant les rotations de la

temporalité 6 entre elles, c'est l'impact de la culture actuelle qui est étudié étant donné que les parcelles concernées n'ont été cultivées qu'avec du colza l'année précédente.

Un modèle linéaire à effet mixte (LMER) a été appliqué aux indices de biodiversité avec les rotations comme facteur fixe et le bloc comme facteur aléatoire. Des ANOVA ont été réalisées sur les LMER afin de comparer l'impact des rotations sur les indices de biodiversité. Une comparaison post-hoc avec le package « Emmeans » a permis de mettre en lumière les différences entre les rotations. Dans le but de comparer les rotations en fonction de leur communauté d'adventices, une analyse en coordonnées principales (PCoA) a été effectuée sur base des données de comptage pour le premier comptage de la flore exprimée et le stock semencier. En revanche, la PCoA caractérisant le deuxième comptage (à floraison) a été basée sur les données de biomasse des adventices et non sur les données de comptage. De cette manière, l'impact des adventices n'étant qu'à un stade juvénile est limité.

Concernant le projet SOLRESIDU, un modèle linéaire à effet mixte a également été appliqué sur les indices de biodiversité. Le type de travail du sol et le type de gestion des résidus constituent des facteurs fixes et le bloc est considéré comme un facteur aléatoire. L'analyse statistique a suivi les mêmes étapes (ANOVA, Emmeans et PCoA) que pour EcoFoodSystem.

L'analyse des traits fonctionnels a été réalisée pour le stock semencier et lors de comptage à floraison avec la méthode RLQ et à l'aide de l'analyse dite du « quatrième angle ». Cette analyse permet d'observer l'existence d'une relation entre les variations des traits biologiques des espèces et les variations des caractéristiques de l'environnement. En d'autres termes, elle permet de découvrir comment l'environnement filtre certains traits d'espèces. La méthode RLQ réalise une analyse de co-inertie entre trois matrices. La matrice R est une table « site x environnement » où les sites sont des lignes et les colonnes sont des descripteurs environnementaux. La matrice L est un tableau « site x espèces », où les lignes sont les sites et les colonnes sont les abondances d'espèces spécifiques. La matrice Q est un tableau espèce x trait, où les lignes sont les espèces et les colonnes sont les traits biologiques de ces espèces. Ensuite, l'analyse RLQ crée une matrice M « environnement x traits » sur laquelle une PCA est réalisée (figure 10). Finalement, la méthode du quatrième angle permet de mettre en lumière les relations significatives entre les traits d'espèces et les variations environnementales.

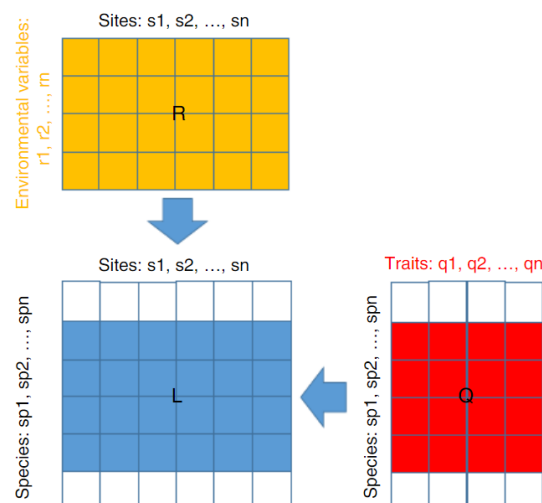


Figure 10 : Lien entre les différentes matrices de l'analyse RLQ (Gámez-Virués et al., 2015).

V. Résultats

V.1. Flore adventice exprimée

V.1.1. EcoFoodSystem (1^{er} comptage)

V.1.1.1. Echantillonnage

Afin d'évaluer l'exhaustivité de l'échantillonnage, des courbes de raréfaction ont été réalisées pour chaque rotation du projet EcoFoodSystem (figure 11). Elles expriment le nombre d'espèces cumulées en fonction de l'effort d'échantillonnage (nombre de quadrat). Il apparaît que la rotation dite « phyto » soit la seule à former un « plateau » signifiant que l'effort d'échantillonnage est suffisant. Le nombre d'espèces cumulées s'élève à 11 pour la rotation « phyto » et à 16 pour les rotations référence, agroécologique et vegan. La courbe de raréfaction à l'échelle de l'ensemble du projet atteint 24 espèces pour un effort d'échantillonnage de 160 quadrats.

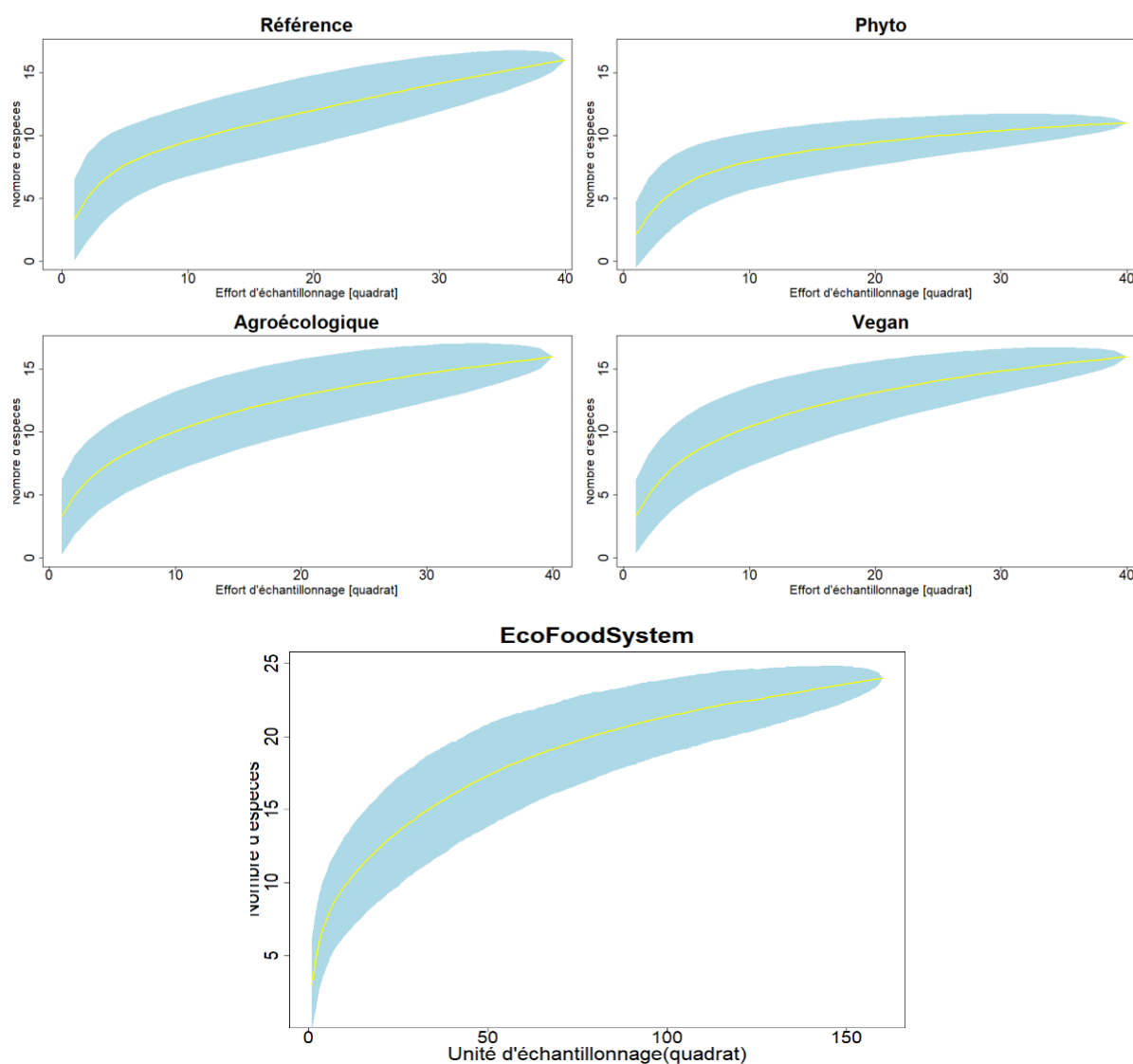


Figure 11 : Courbes de raréfaction exprimant le nombre d'espèces cumulées selon l'effort d'échantillonnage pour les quatre rotations de culture et à l'échelle du projet.

En complément des informations fournies par les courbes de raréfaction, le tableau 2 reprend pour chaque rotation ainsi que pour le projet dans sa globalité le nombre d'espèces échantillonnées et l'estimation de ce nombre donné par l'estimateur Chao 1. De plus, sont également repris le pourcentage d'espèces échantillonnées ainsi que l'écart-type de l'estimateur.

Tableau 2: Résultats de l'estimateur Chao 1 pour chaque rotation et pour le projet EcoFoodSystem dans son ensemble.

Rotation	Nombre d'espèces observées	Nombre d'espèces estimée par l'estimateur Chao 1	Ecart-type	Pourcentage d'espèces échantillonné
Référence	16	28	13	57,14%
Phyto	11	12	2	91,67%
Agro	16	28	17	57,14%
Vegan	16	20	5	80%
EcoFoodSystem	24	42	23	57,14%

La figure 12 présente, en fonction des rotations et des deux temporalités, la moyenne de la densité des espèces rencontrées. Pour plus de clarté, les espèces représentant moins de 5% de l'échantillonnage sont reprises dans la catégorie « Autres ». Les codes OEPP (code Bayer) sont utilisés pour faire référence aux adventices et leurs significations sont disponibles à l'annexe 1.

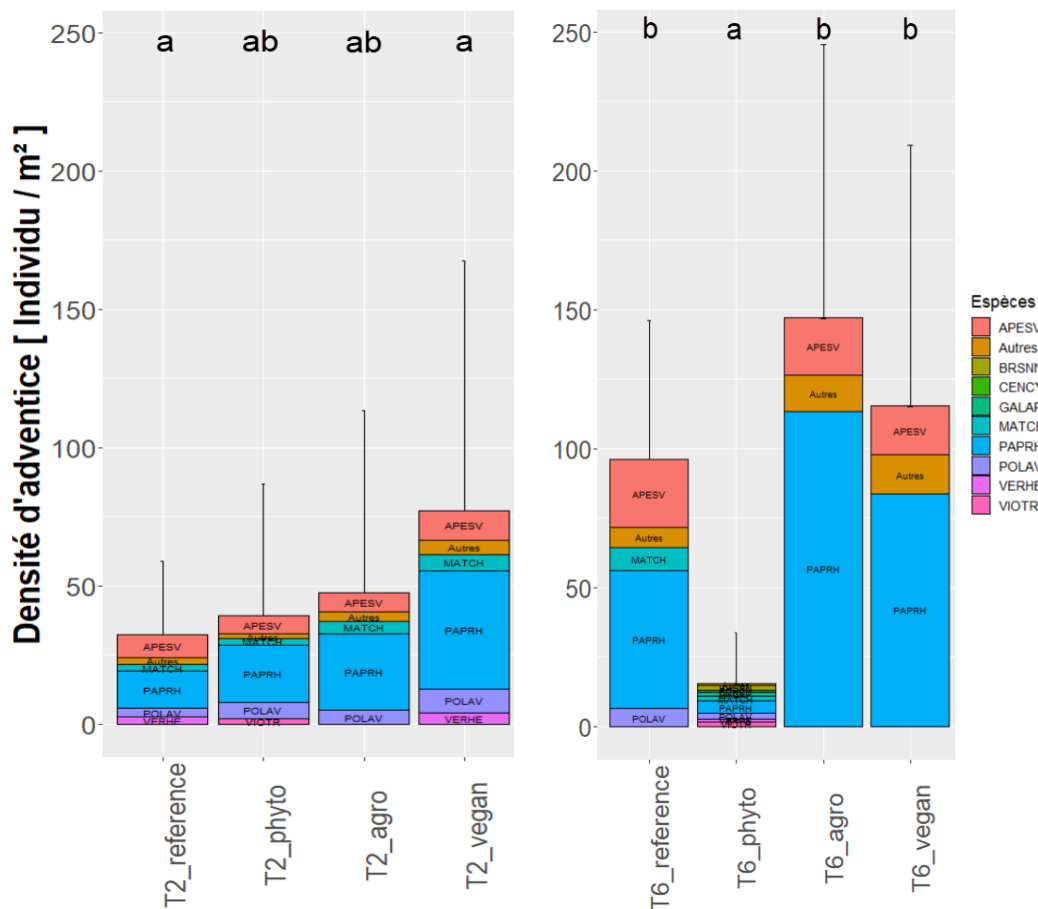


Figure 12 : Graphiques présentant les proportions en adventices en fonction des rotations pour la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite). Les espèces les plus présentes sont PAPRH (Papaver rhoeas L.) et APESV (Apera spica venti L.) représentant respectivement 57,57% et 16,56% de l'échantillonnage total, (EcoFoodSystem, 1^{er} comptage).

V.1.1.2. Indices de biodiversité

Le tableau 3 reprend le résultat des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations sur les indices de biodiversité. Il en ressort que les rotations au sein de la temporalité 2 ont impacté significativement l'abondance en adventices. En revanche, au sein de la temporalité 6, tous les indices ont été impactés significativement.

Tableau 3 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les indices de biodiversité pour l'essai EcoFoodSystem (1^{er} comptage). Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité	Abondance
Rotation (T2)	-	-	-	-	*
Rotation (T6)	***	***	*	**	*

Les figures suivantes (13, 14, 15 et 16) reprennent l'ensemble des indices impactés de manière significative par les rotations en fonction des deux temporalités. Les lettres correspondent au résultat du test « Emmeans » permettant de générer des groupes. La rotation phyto est systématiquement associée au groupe « a » associé aux valeurs basses des différents indices à l'exception de l'abondance en adventice en temporalité 2. Le détail des résultats de la flore exprimée du projet EcoFoodSystem est disponible à l'annexe 4

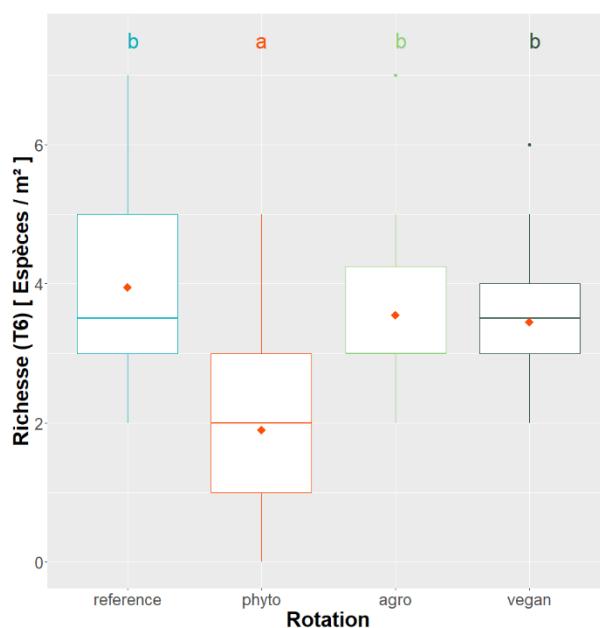


Figure 13 : Graphique présentant l'influence des rotations sur la richesse en espèces au sein de la temporalité 6 de l'essai (EcoFoodSystem, 1^{er} comptage).

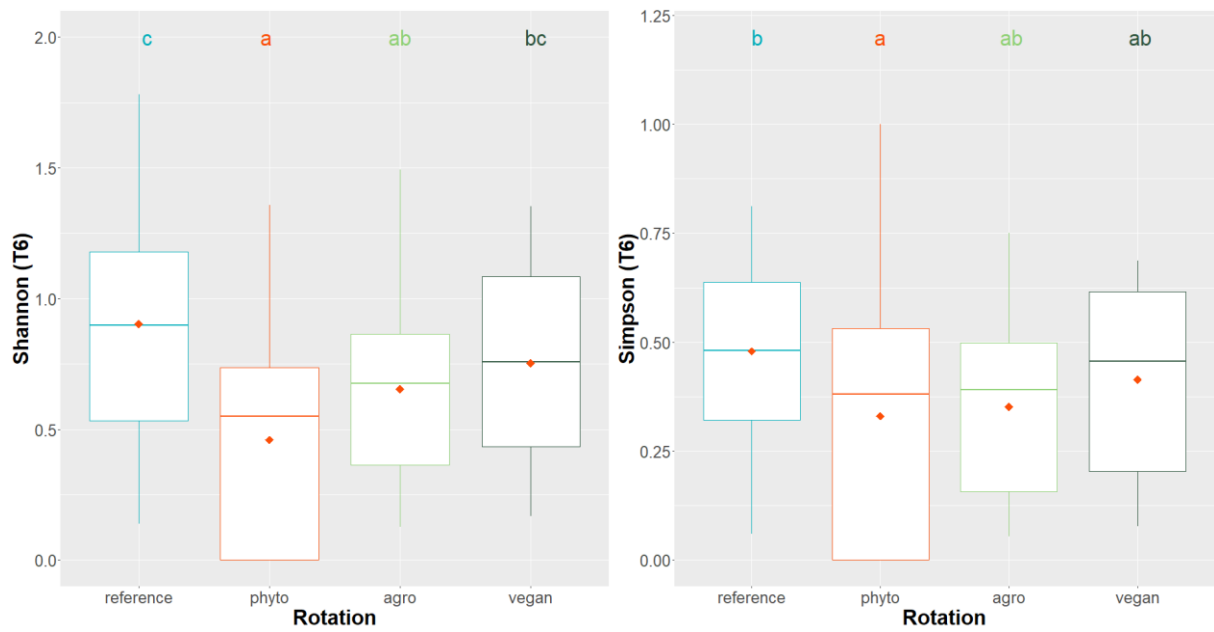


Figure 14 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la diversité de Shannon (gauche) et la diversité de Simpson (droite) au sein de la temporalité 6 (EcoFoodSystem, 1er comptage).

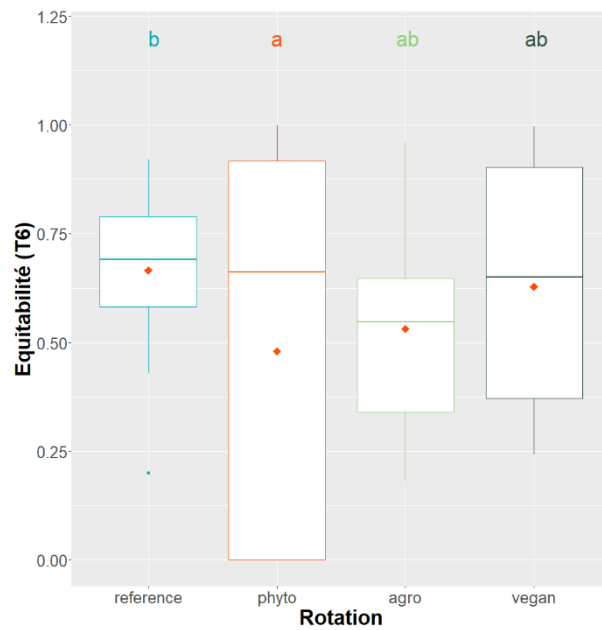


Figure 15 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'équitabilité au sein de la temporalité 6 (EcoFoodSystem, 1er comptage).

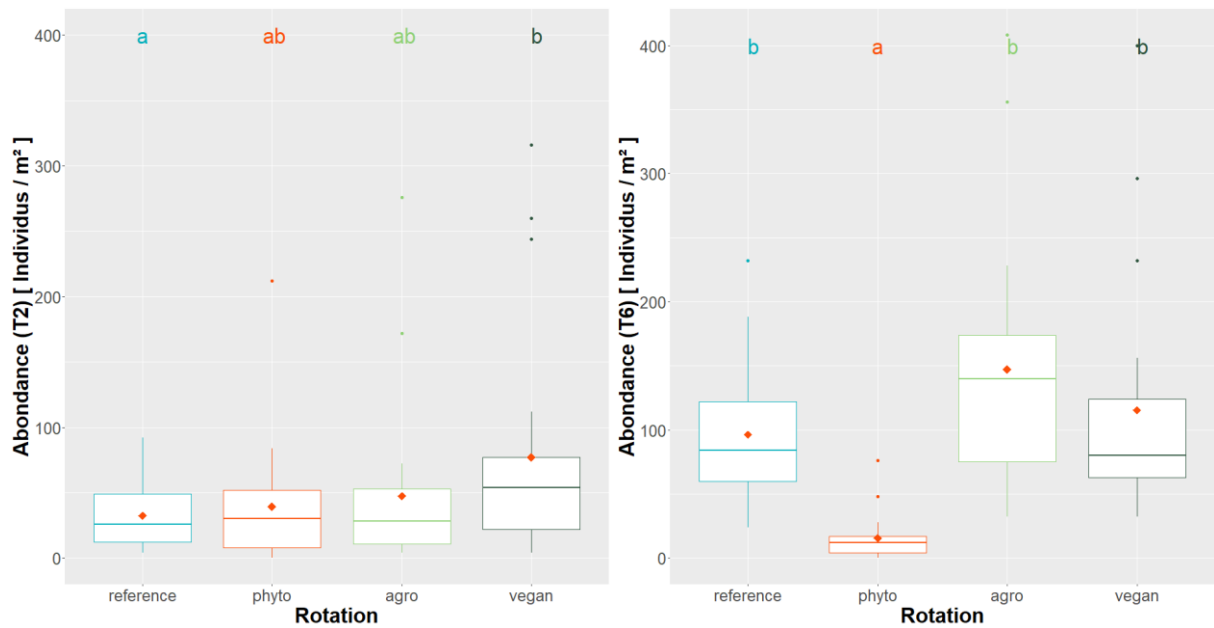


Figure 16 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'abondance en espèces au sein de la temporalité 2 (gauche) et de la temporalité 6 (droite) (EcoFoodSystem, 1^{er} comptage).

V.1.1.3. Analyse en coordonnées principales (PCoA)

La figure 17 présente l'analyse en coordonnées principales du premier comptage pour les deux temporalités. Le jeu de couleur fait référence aux rotations et les clusters mettent en avant l'effet des blocs. Ce dernier est particulièrement présent quel que soit la temporalité. En effet, l'analyse des centroïdes des clusters « bloc » (PERMANOVA) révèle une p-valeur inférieure à 0,001 pour la temporalité 2 et inférieure à 0,05 pour la temporalité 6, traduisant une différence significative entre les blocs. Les centroïdes des clusters « rotations » n'ont quant à eux pas révélé de différence significative.

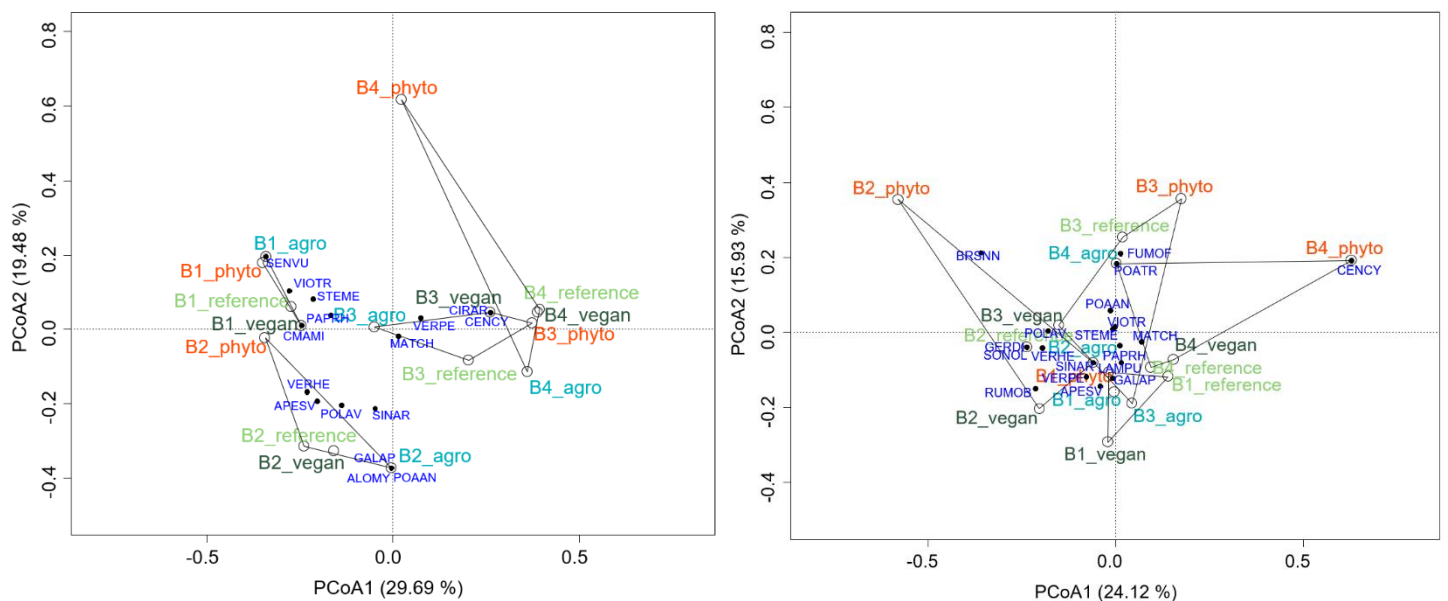


Figure 17 : Analyse en coordonnées principales de la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite) (EcoFoodSystem, 1^{er} comptage).

V.1.2. EcoFoodSystem (2^{ème} comptage)

V.1.2.1. Echantillonnage

La figure 18 reprend les courbes de raréfaction réalisées pour les rotations et pour l'ensemble du projet lors du comptage à floraison de la culture. Le plateau est atteint pour les rotations dite « Référence », « Phyto » et « Agroécologique » signifiant que l'effort d'échantillonnage de 40 quadrats a été suffisant. Ce constat est également visible à l'échelle du projet dans son ensemble.

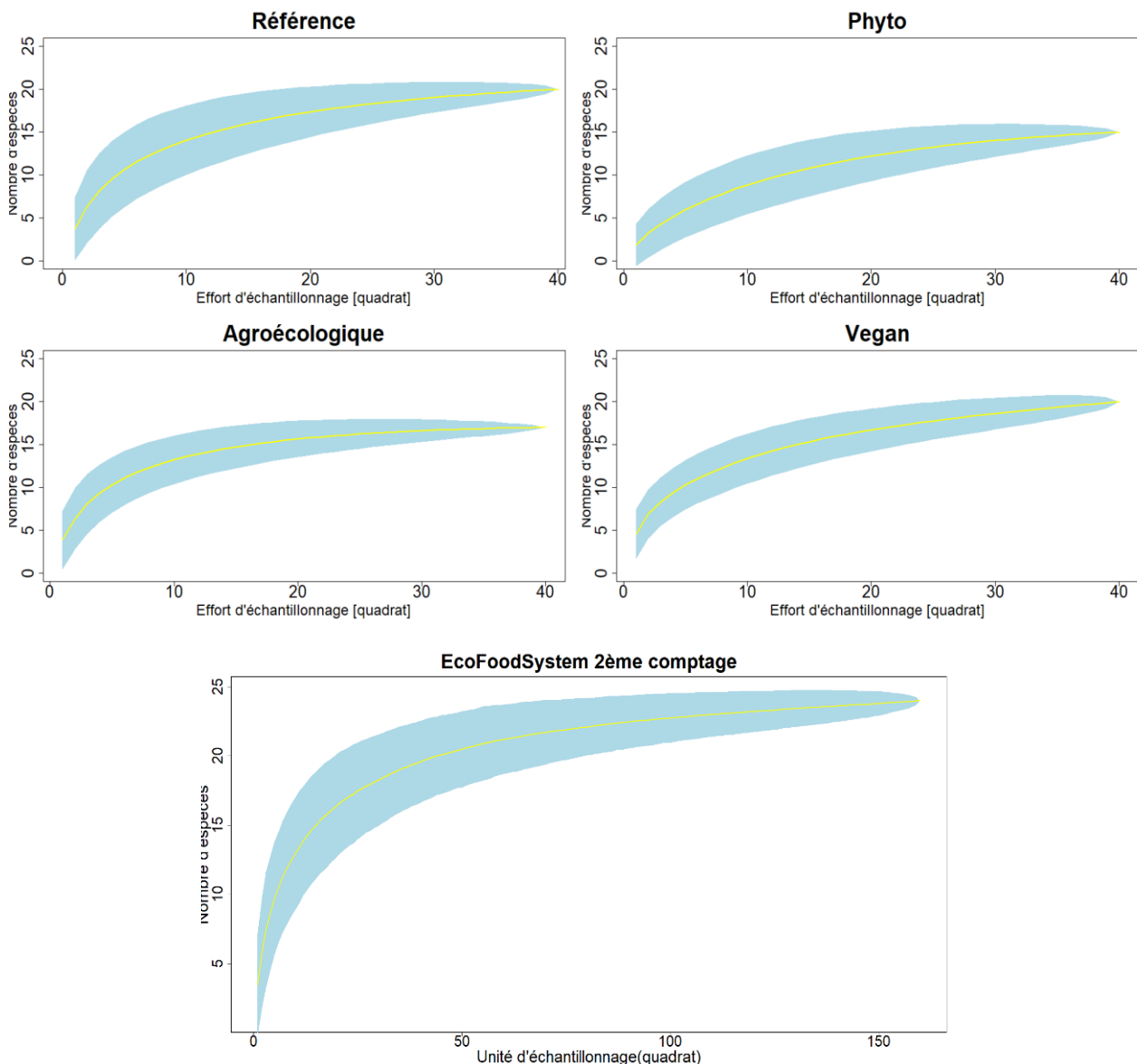


Figure 18 : Graphiques présentant les courbes de raréfaction réalisées sur les différentes rotations et pour le projet dans son ensemble, (EcoFoodSystem, 2^{ème} comptage).

La qualité de l'échantillonnage peut également être discutée à l'aide de l'estimateur Chao 1 dont les résultats sont repris au tableau 4. Effectivement, le nombre d'espèces qui n'ont potentiellement pas été recensées lors de l'échantillonnage est compris entre 0 et 3 pour les rotations de référence, phyto et agroécologique mais également à l'échelle du projet.

Tableau 4 : Résultats de l'estimateur Chao 1 pour chaque rotation et pour le projet EcoFoodSystem dans son ensemble lors du deuxième comptage.

Rotation	Nombre d'espèces	Nombre d'espèces estimé par l'estimateur Chao 1	Ecart-type	Nombre d'espèces manquées lors de l'échantillonnage
Référence	20	21	2	95,23%
Phyto	15	16	2	93,75%
Agro	17	17	1	100%
Vegan	20	26	7	76,92%
EcoFoodSystem	24	27	5	88,88%

La figure 19 présente la proportion moyenne des espèces rencontrées lors du deuxième comptage, en fonction des rotations et des deux temporalités. Seules les espèces représentant minimum 5% de l'échantillonnage sont représentées.

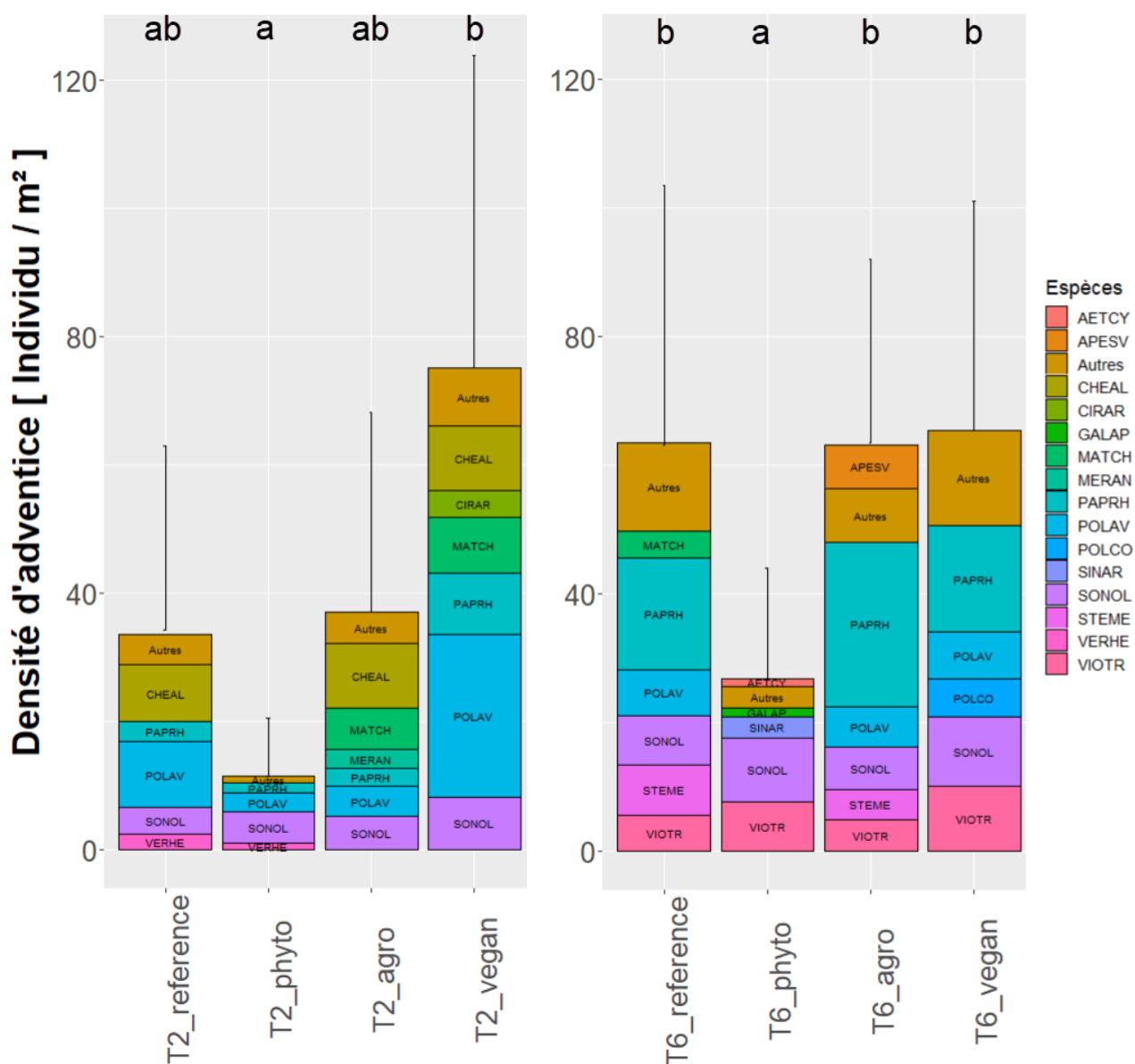


Figure 19: Graphiques présentant les proportions d'adventices pour la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2^{ème} comptage). PAPRH représente 27,33% des adventices en temporalité 6. POLAV représente 27,48% en temporalité 2.

V.1.2.2. Indices de biodiversité

Le tableau 5 reprend les niveaux de significativité des ANOVA réalisées pour caractériser l'effet des rotations sur les indices de biodiversité lors du deuxième comptage de l'essai EcoFoodSystem. Il en ressort que la richesse, la diversité de Shannon et de Simpson ainsi que l'abondance en adventices sont impactées de manière significative par les rotations de culture au sein des deux temporalités.

Tableau 5 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les indices de biodiversité de l'essai EcoFoodSystem (2^{ème} comptage). Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité	Abondance
Rotation (T2)	***	***	-	**	*
Rotation (T6)	**	*	-	**	*

Seuls les indices présentant des différences significatives (tableau 5) en fonction de la rotation de culture sont présentés aux figures suivantes (figures 20, 21, 22 et 23).

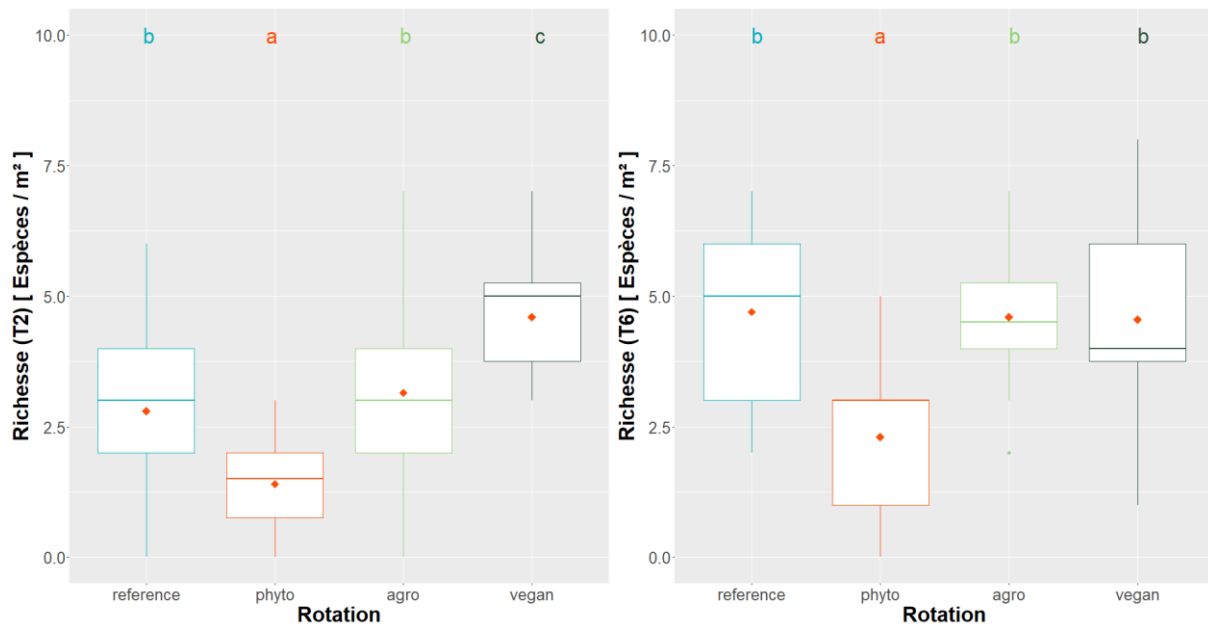


Figure 20 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la richesse en espèce en temporalité 2 (gauche) et 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2^{ème} comptage).

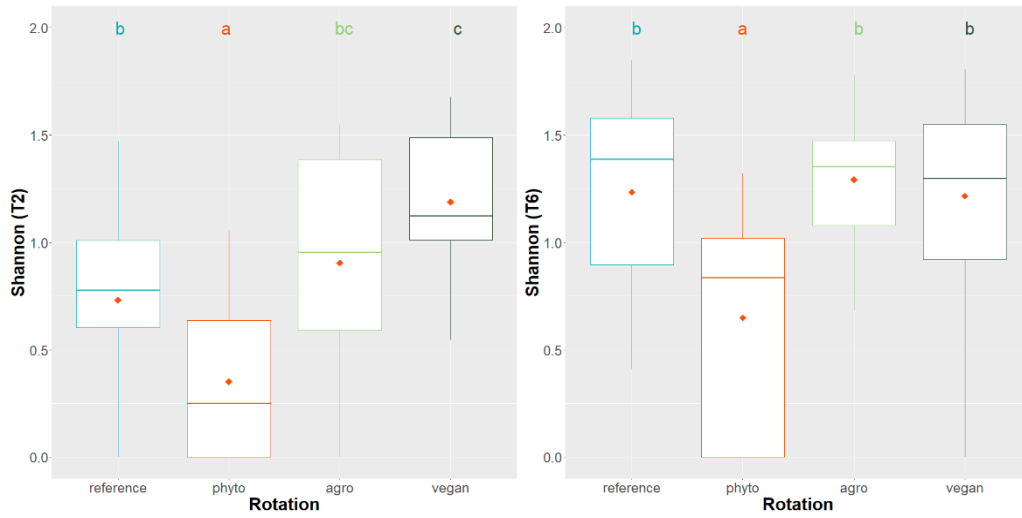


Figure 21 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'indice de Shannon en temporalité 2 (gauche) et 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2ème comptage).

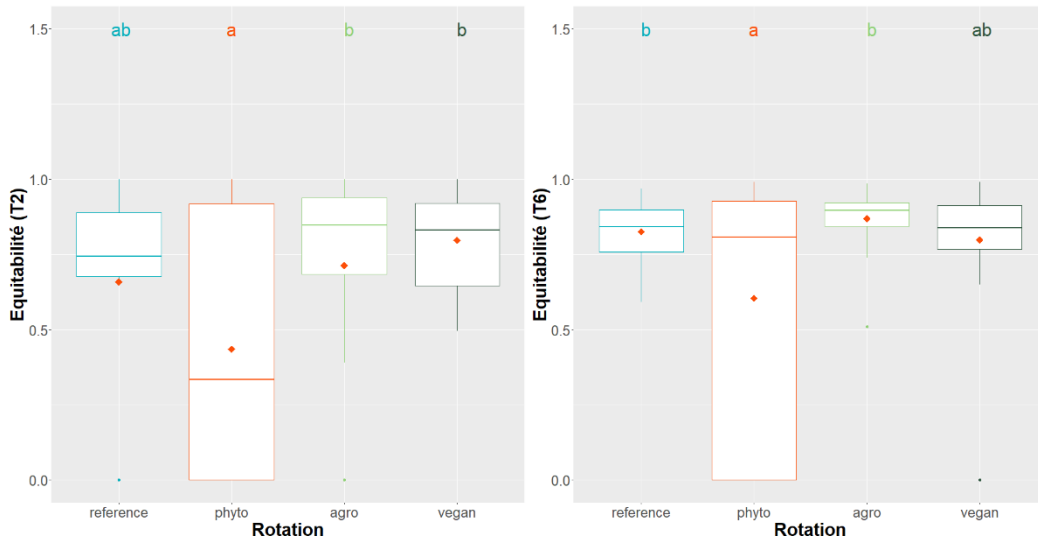


Figure 22 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'équitabilité de Pielou en temporalité 2 (gauche) et 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2ème comptage).

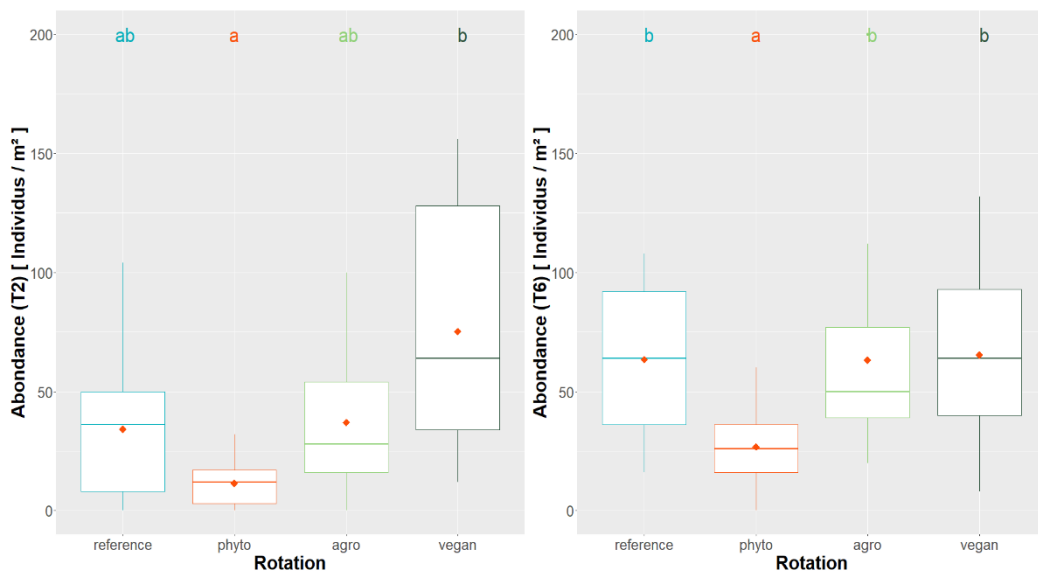


Figure 23 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur l'abondance en adventices pour la temporalité 2 (gauche) et 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2ème comptage).

V.1.2.3. Biomasse

La figure 24 représente les mêmes graphiques que ceux de la figure 19 à la différence que la densité est ici exprimée en biomasse (g/m^2) et non en individus ($\text{Individu}/\text{m}^2$). Les adventices présentes en temporalité 2 sont réparties de manière plus homogène qu'en temporalité 6 où *Papaver rhoeas L.*, 1753 (PAPRH) et *Rumex obtusifolius L.*, 1753 (RUMOB) prennent le dessus quand ils sont présents.

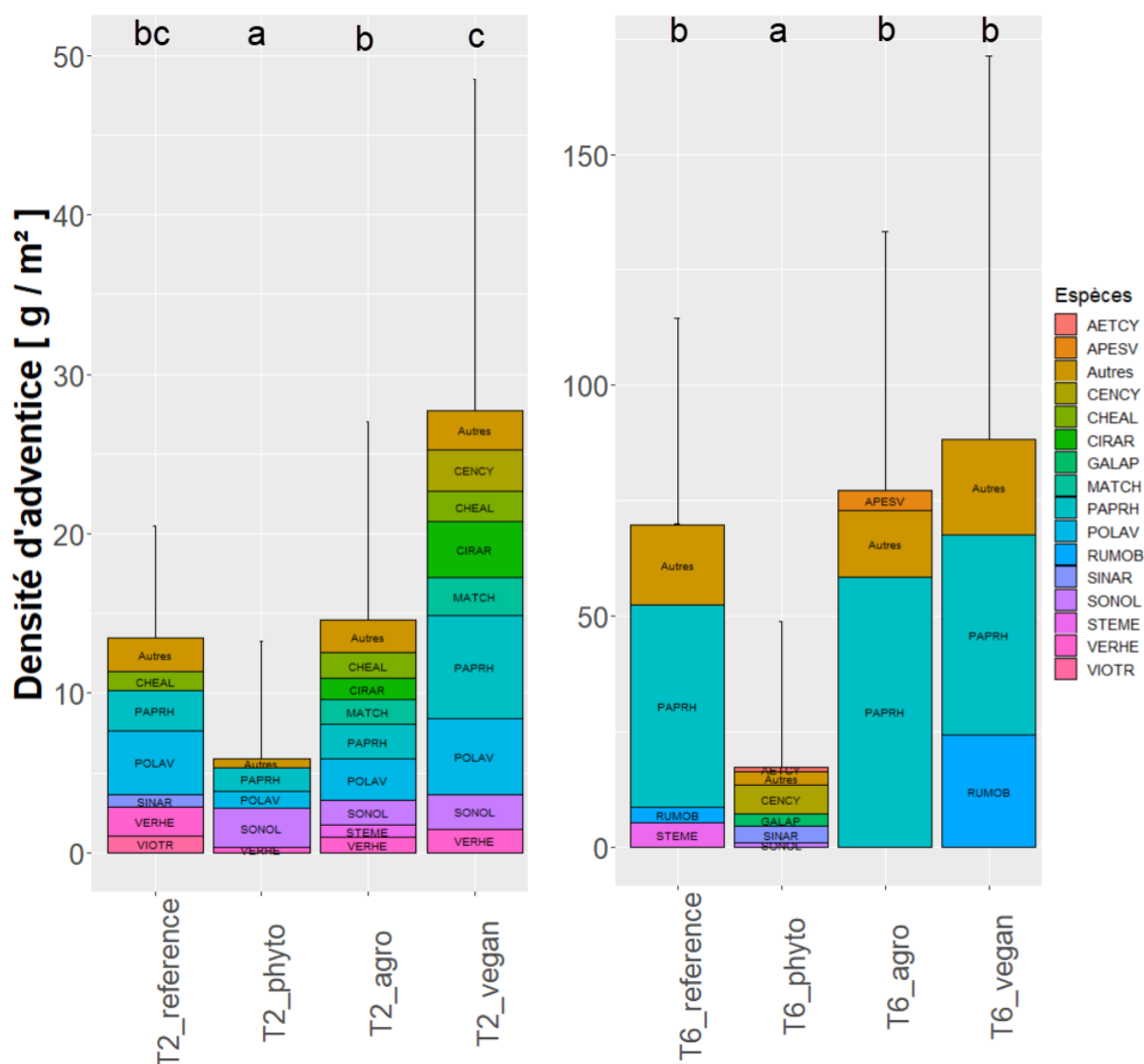


Figure 24 : Graphique présentant la proportion en espèces (en biomasse) en fonction de la rotation pour la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite) de l'essai EcoFoodSystem. PAPRH représente 57,74% de la biomasse en temporalité 6 et 20,5% en temporalité 2.

Le tableau 6 reprend une synthèse des niveaux de significativité obtenus par ANOVA réalisée pour caractériser l'influence des rotations sur les biomasses des cultures et des adventices. Il est à noter que l'indice d'équitabilité de Pielou est également concerné par cette analyse car il est ici calculé selon les données de biomasse des espèces d'adventices et non sur les données de comptage comme précédemment (tableau 2 et 4).

Tableau 6 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les indices de biodiversité (calculés avec les données de biomasse des adventices) ainsi que la biomasse des cultures (EcoFoodSystem, 2^{ème} comptage). Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

Biomasse	Equitabilité (biomasse)	Adventices	Froment	Pois	Culture
Rotation (T2)	**	***	***	/	/
Rotation (T6)	-	**	-	**	**

La figure 25 correspond aux graphiques traduisant l'influence des rotations sur la biomasse en adventices et sur celle de la culture de froment au sein de la temporalité 2.

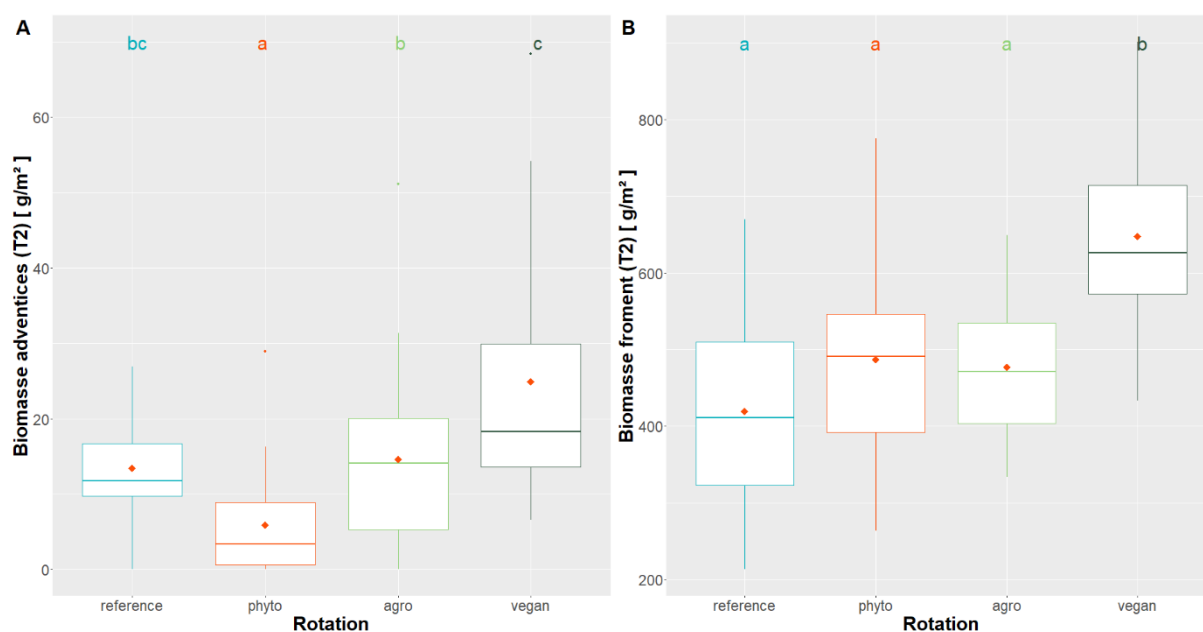


Figure 25 : Graphiques présentant l'influence de la rotation sur (A) la biomasse d'adventices et (B) la biomasse de froment (EcoFoodSystem, temporalité 2).

La figure 26 expose l'influence des rotations de la temporalité 6 sur la biomasse en adventices et sur la biomasse de la culture. A l'inverse de la temporalité 2 constituée uniquement de culture de froment, la temporalité 6 dispose d'une culture associée de froment-pois pour les rotations dites « référence », « phyto » et « Agroécologique » et d'une culture de froment pour la rotation dite « vegan ». De ce fait, les biomasses du pois n'ont été comparées qu'entre les rotations en contenant (tableau 6). Concernant la biomasse dite « de la culture » il s'agit de la somme de la biomasse de froment et de pois calculée (tableau 6) sur chaque rotation.

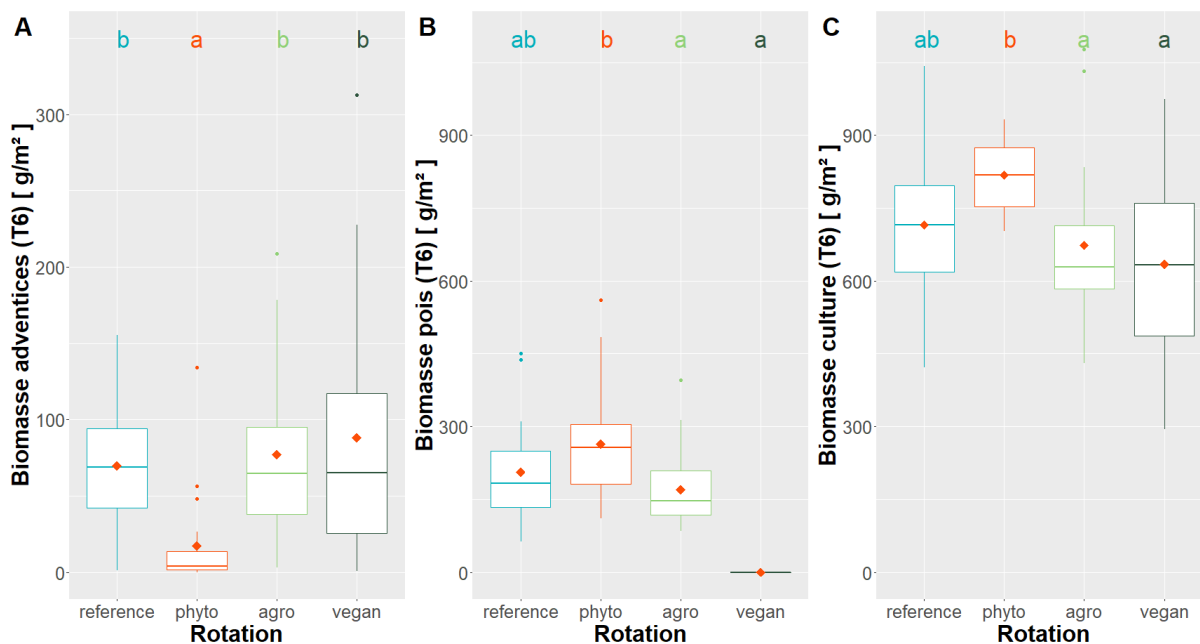


Figure 26 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la biomasse d'adventices (A), de pois (B) et de la culture totale (C) au sein de la temporalité 6 (EcoFoodSystem, 2^{ème} comptage).

Le tableau 7 reprend une synthèse des niveaux de significativité des ANOVA réalisées entre les différents indices de biodiversité et la biomasse en adventices et des cultures de froment et froment-pois. La mention « (biomasse) » signifie que l'indice est calculé grâce aux données de biomasse et non de comptage. Dans ce cas, l'indice d'abondance en adventice calculé grâce aux données de biomasse des adventices n'est autre que la biomasse totale en adventice.

Tableau 7 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des indices de biodiversité sur la biomasse des cultures et d'adventices (EcoFoodSystem, 2^{ème} comptage). Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité (biomasse)	Abondance (biomasse)
Temporalité 2					
Adventices (T2)	***	***	-	***	1
Froment (T2)	***	**	-	-	*
Temporalité 6					
Adventices (T6)	*	-	-	**	1
Froment (T6)	-	-	-	-	-
Pois (T6)	***	***	*	-	*
Froment + Pois (T6)	-	-	-	-	***

Les figures 27 et 28 illustrent les relations entre les indices de biodiversité et la biomasse en adventice et des cultures ayant un impact significatif (tableau 6) au sein de la temporalité 2. Une seule droite de régression construite selon un modèle linéaire simple (lm) est présente quand les rotations expriment la même tendance. En revanche, si la relation s'avère être significativement différente entre les rotations, elles apparaissent toutes au sein du graphique correspondant (figure 28, graphique C). De plus, les équations des droites de régression sont présentes sur les graphiques ainsi que le R² et la p-valeur.

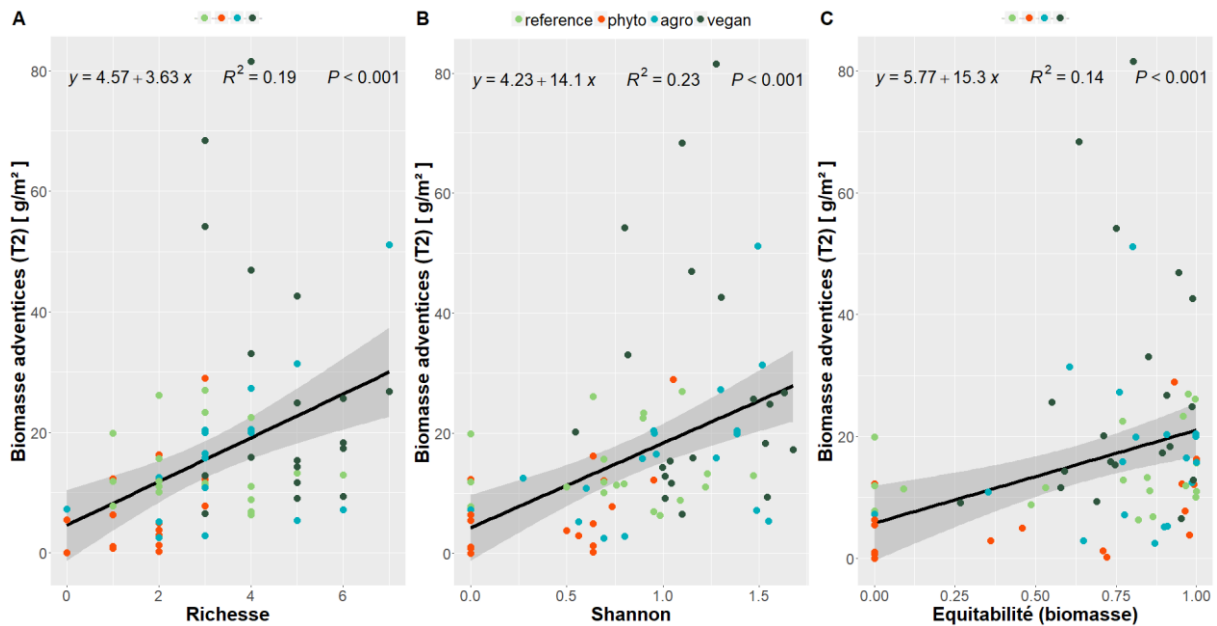


Figure 27 : Graphiques présentant l'influence (A) de la richesse, (B) l'indice de Shannon et (C) de la régularité (calculé selon la biomasse) sur la biomasse en adventices (EcoFoodSystem, temporalité 2).

Le constat est que la biomasse d'adventices augmente avec l'augmentation de la richesse, de la diversité de Shannon et avec l'équitabilité. Le résultat est le même concernant la biomasse du froment avec la richesse et la diversité de Shannon. En revanche, la biomasse du froment tend à diminuer avec le développement des adventices au niveaux de la rotation dite de « référence » alors que cette relation n'est pas significative pour les autres rotations (figure 28 C).

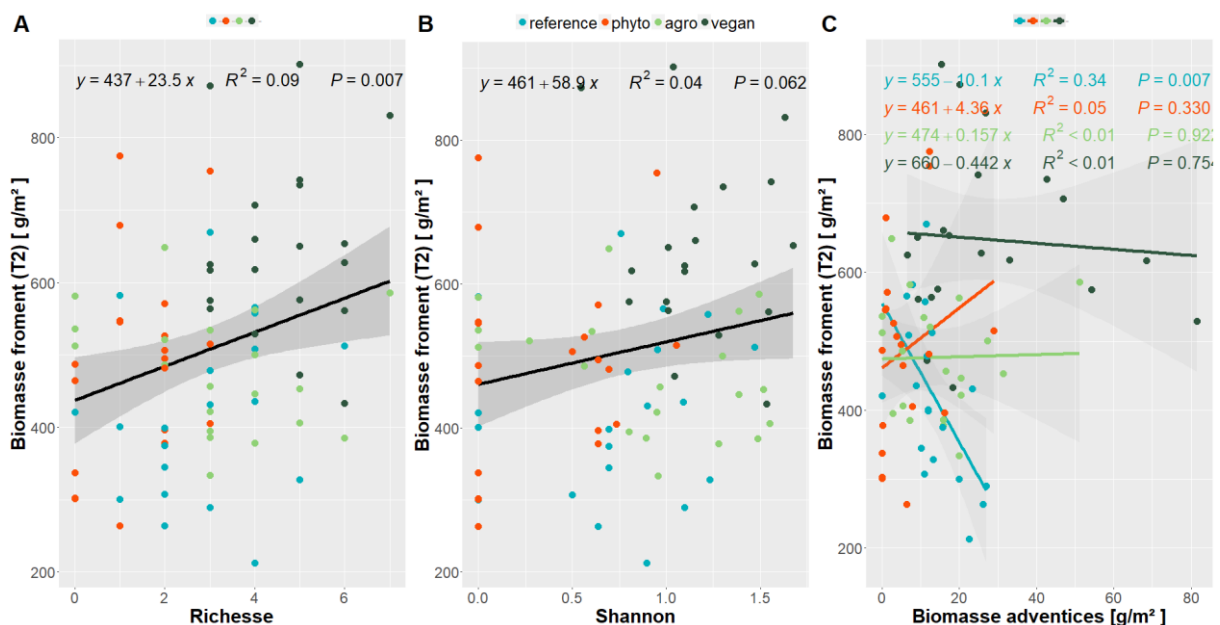


Figure 28 : Graphiques présentant l'influence de (A) la richesse, (B) l'indice de Shannon et (C) de l'abondance en adventices (calculées selon la biomasse) sur la biomasse du froment (EcoFoodSystem, temporalité 2).

Ensuite, les figures suivantes (figures 29, 30 et 31) expriment les relations qui résident entre les indices de biodiversité et la biomasse de la culture au sein de la temporalité 6. La biomasse de la

culture et des adventices diminuent systématiquement avec une évolution croissante des indices de biodiversité.

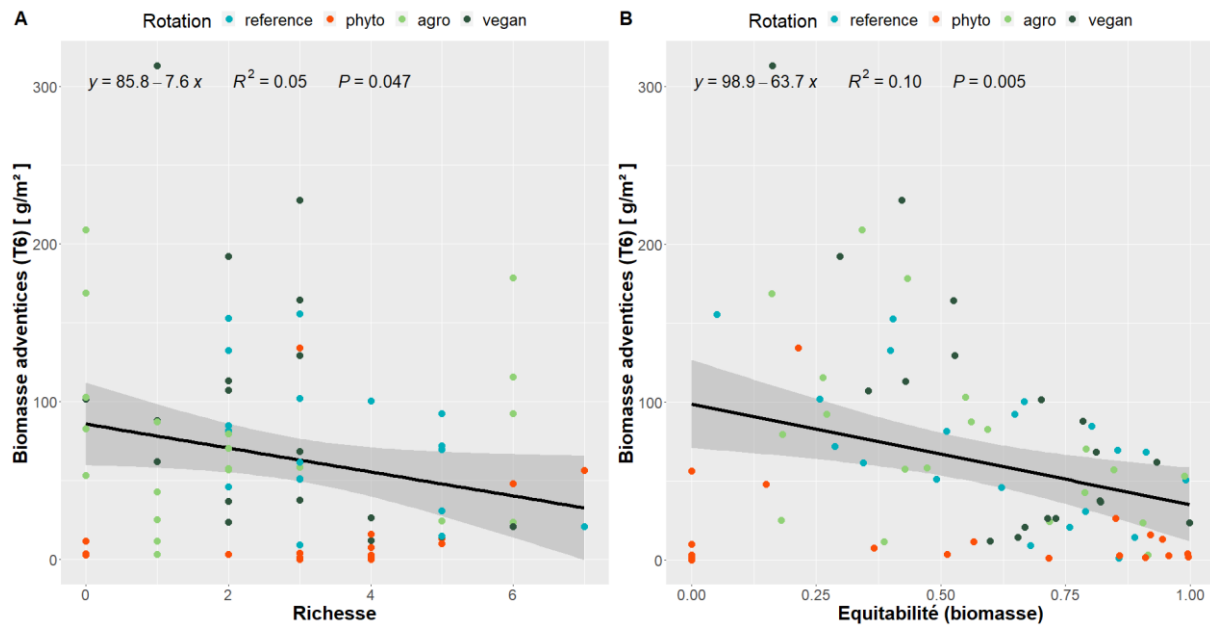


Figure 29 : Graphiques représentant l'influence de la richesse (A), l'équitabilité (calculées selon la biomasse) (B) sur la biomasse en adventices (EcoFoodSystem, temporalité 6).

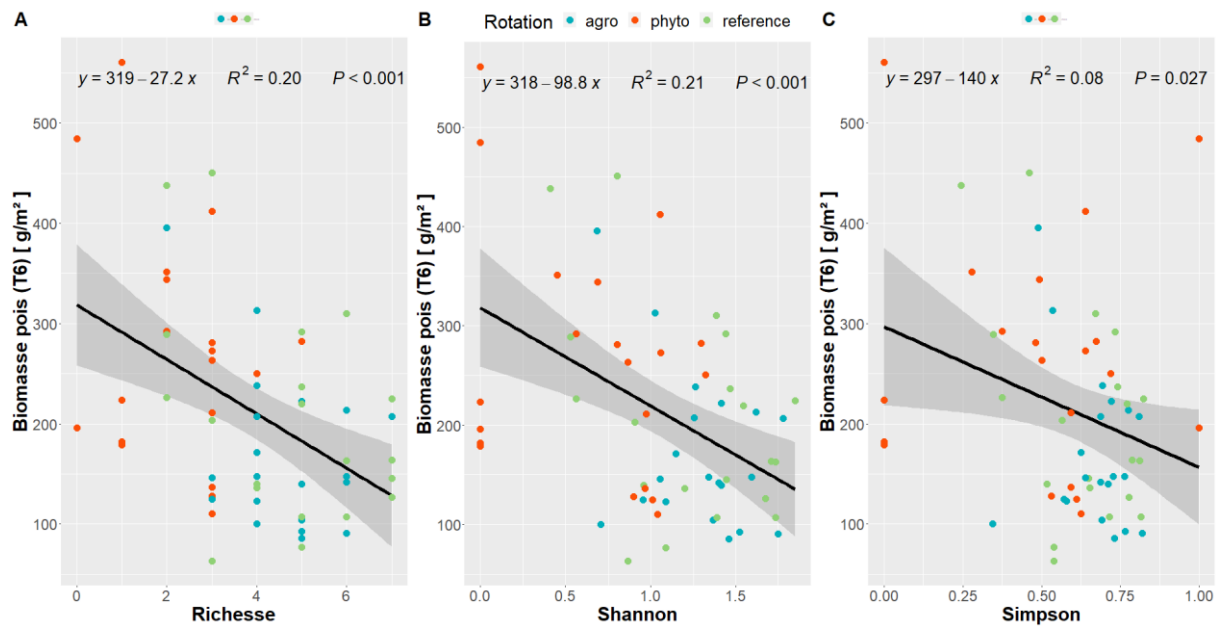


Figure 30 : Graphiques représentant l'influence de la richesse (A), la diversité de Shannon (B) et la diversité de Simpson (C) sur la biomasse du pois (EcoFoodSystem, temporalité 6).

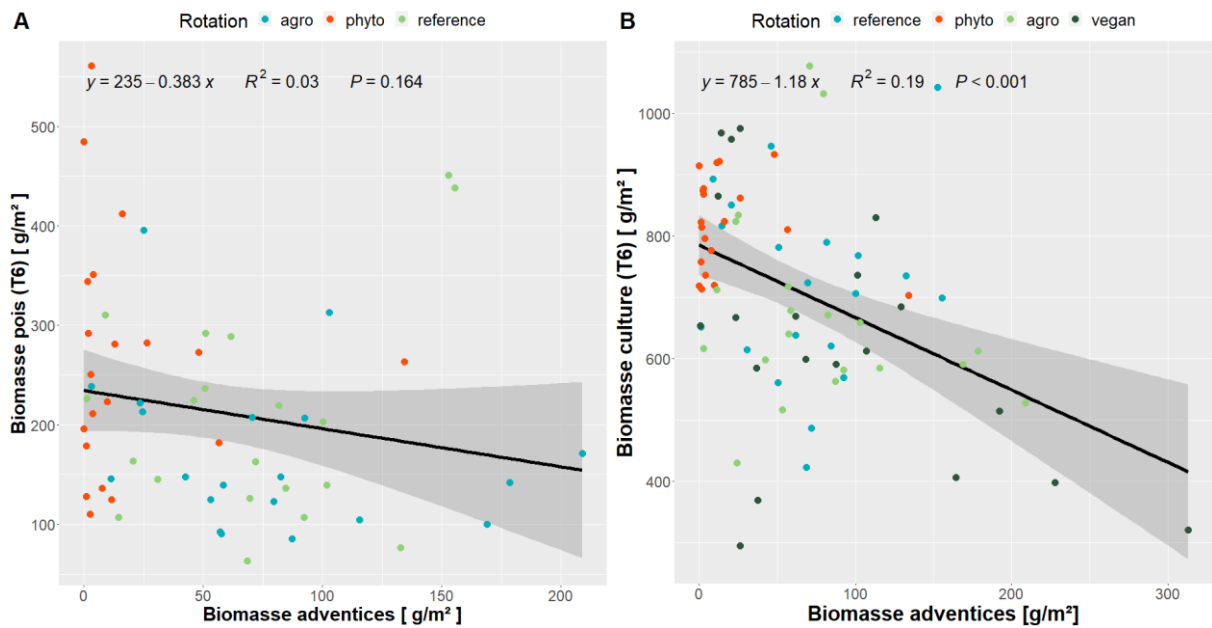


Figure 31 : Graphiques représentant l'influence de la biomasse d'adventices sur la biomasse du pois (A) et de la culture totale (B) (EcoFoodSystem, temporalité 6).

V.1.2.4. Analyse en coordonnées principales

En figure 32 apparaissent les analyses en coordonnées principales au sein des deux temporalités du deuxième comptage de l'essai EcoFoodSystem. Le code couleur correspond aux quatre rotations et les clusters aux blocs. Bien que la rotation dite « phyto » soit discernable des autres, selon une analyse PERMANOVA, les centroïdes des clusters « rotation » ne sont pas significativement différents, quelle que soit la temporalité. Les clusters « bloc » ne montrent également aucune différence significative mais il est cependant possible de constater que certaines espèces se retrouvent préférentiellement dans certains blocs. C'est notamment le cas du bloc 2 de la temporalité 6 avec SINAR, TRFSU, FUMOF, SENVU et RUMOB.

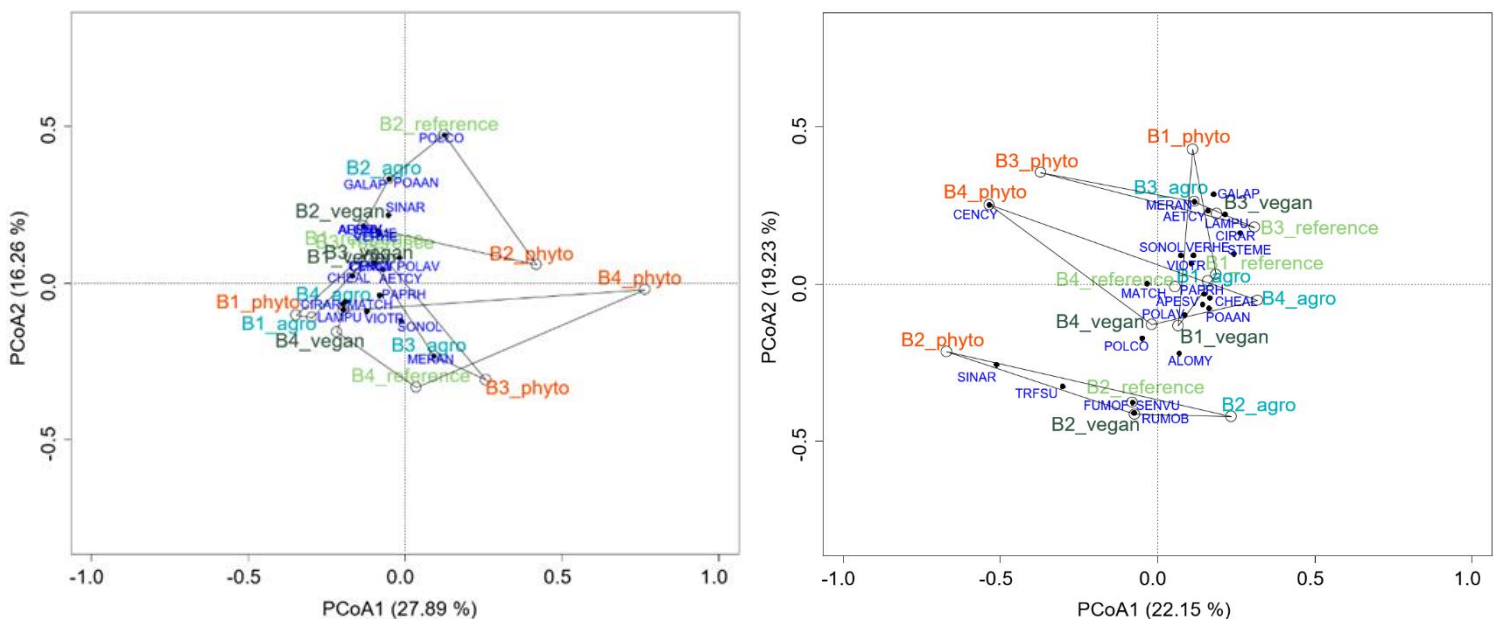


Figure 32 : Analyses en composantes principales basées sur les données de biomasse des adventices avec la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite), (EcoFoodSystem, 2ème comptage).

V.1.2.5. Traits fonctionnels

La figure 33 représente le résultat de l'analyse RLQ des traits fonctionnels. Les associations environnement x traits significativement positives sont représentées en rouge, les associations significativement négatives en bleu et les non significatives en gris. Dans le cas de ce comptage, aucune relation n'est significative.

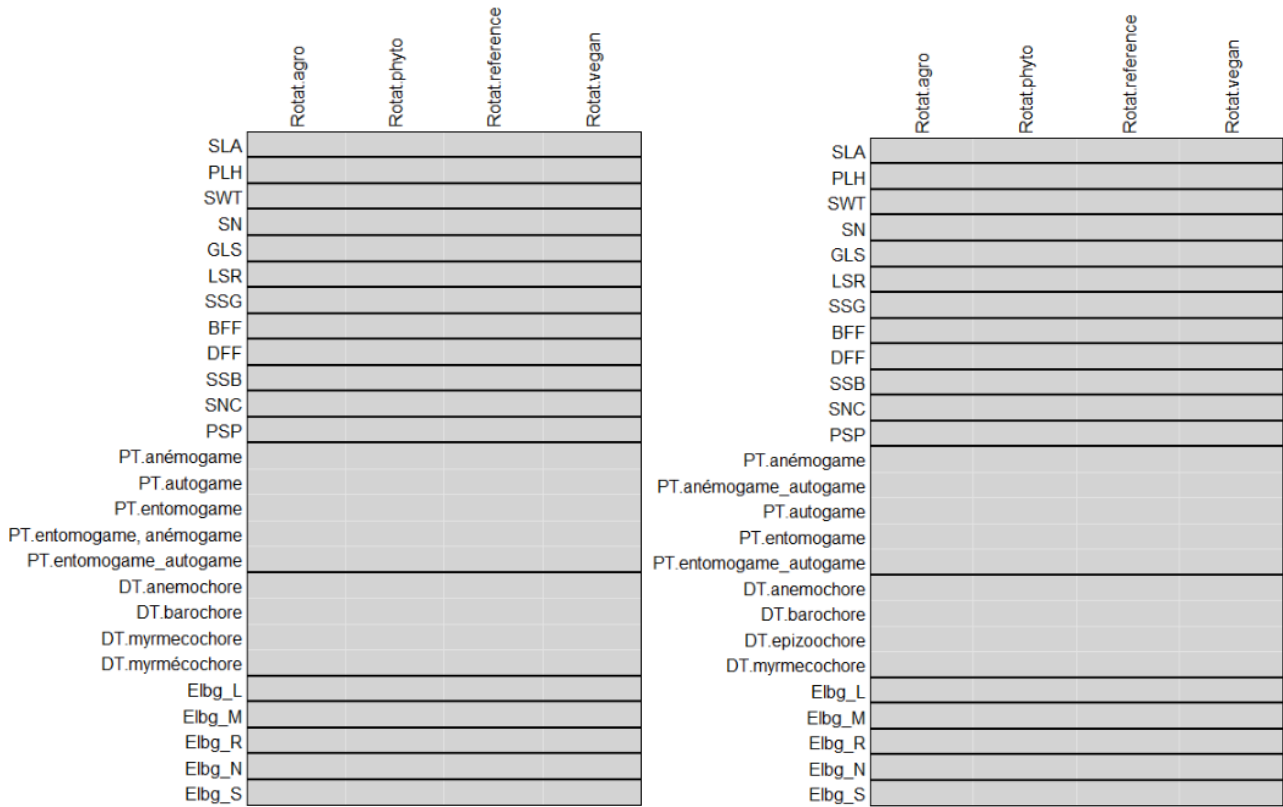


Figure 33 : Analyse RLQ réalisée sur le deuxième comptage de l'essai EcoFoodSystem sur base des données de biomasse en temporalité 2 (Gauche) et la temporalité 6 (droite). Les relations significatives positives sont en rouge, les significatives négatives en bleu et les non significatives en gris.

V.1.3. SOLRESIDU (1^{er} comptage)

V.1.3.1. Evaluation de l'échantillonnage et richesse spécifique

La figure 34 reprend les courbes de raréfactions exprimant le nombre d'espèces cumulées en fonction de l'effort d'échantillonnage pour les quatre stratégies de culture. Le nombre d'espèces cumulées s'élève à 8 pour les parcelles "Ti_IN", 5 pour les parcelles "Ti_OUT" et à 11 pour les parcelles qui ne sont pas en labour conventionnel "No_Ti_IN" et "No_Ti_OUT". Seules les stratégies « Ti_OUT » et « No_Ti_IN » atteignent un palier. A l'échelle de l'ensemble du projet, la courbe de raréfaction est également proche d'atteindre un palier avec 14 espèces recensées.

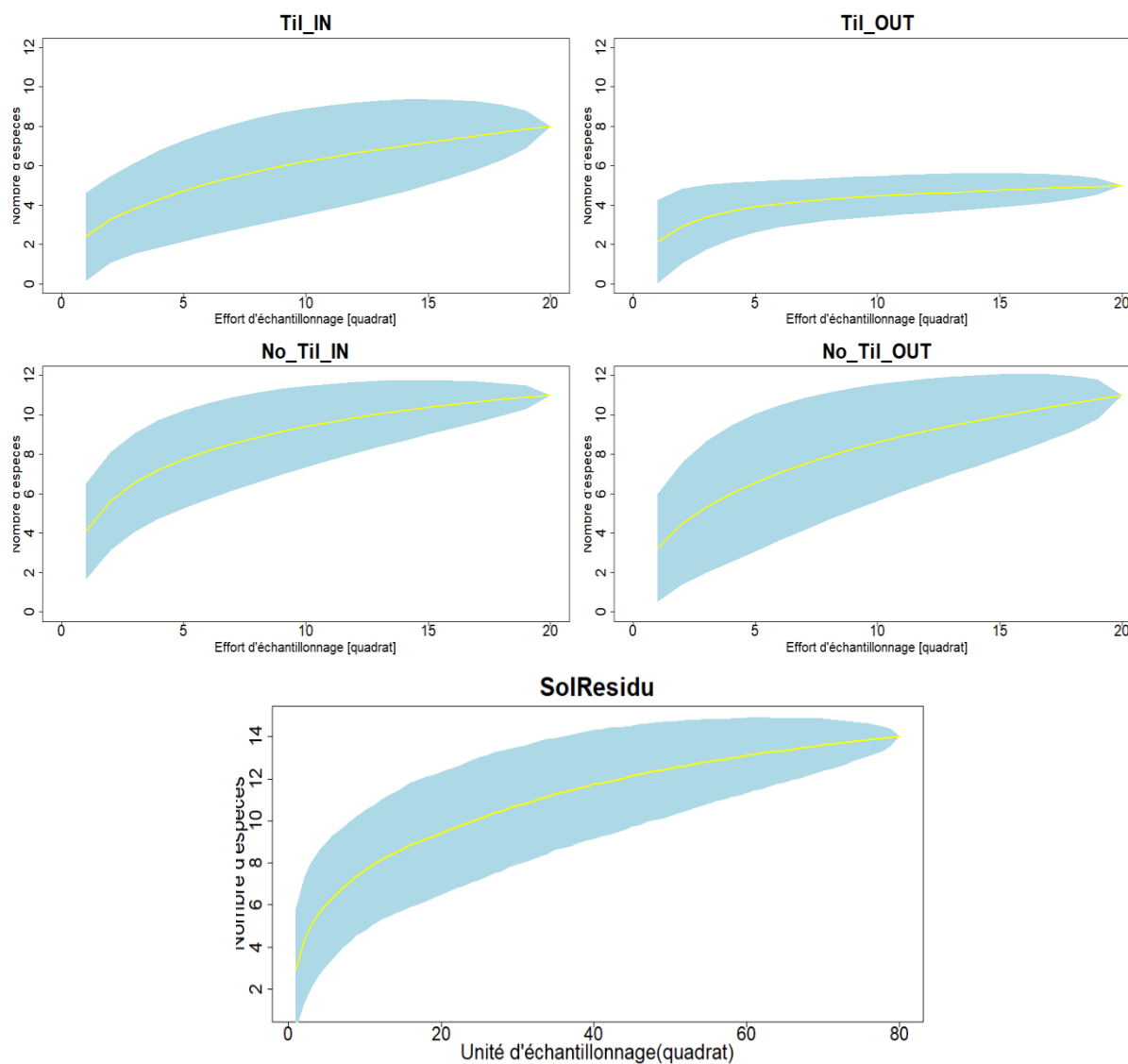


Figure 34 : Courbes de raréfaction exprimant le nombre d'espèces cumulées selon l'effort d'échantillonnage pour les quatre stratégies de culture du projet SOLRESIDU ainsi que pour l'ensemble du projet (SOLRESIDU, 1^{er} comptage).

Pour compléter les informations apportées par les courbes de raréfactions, le tableau 8 reprend le résultat de l'estimateur Chao 1 pour les 4 stratégies de culture et l'ensemble du projet SOLRESIDU.

Tableau 8 : Résultats de l'estimateur Chao 1 lors du premier comptage pour chaque stratégie de culture et pour le projet SOLRESIDU dans son ensemble.

Stratégie	Nombre d'espèces	Nombre d'espèces estimé par l'estimateur Chao 1	Ecart-type	Pourcentage d'espèces échantillonnées
Til_IN	8	12	7	66,67%
Til_OUT	5	5	1	100%
No_Til_IN	11	12	2	91,67%
No_Til_OUT	11	19	11	57,89%
SOLRESIDU	14	16	3	87,50%

La figure 35 permet de visualiser la proportion d'espèces présentes au sein des quatre stratégies de culture. Seules les espèces représentant au minimum 1% de l'échantillonnage au sein de chaque stratégie sont mentionnées. *Alopecurus myosuroides* (Hudson., 1762) et *Matricaria chamomilla* (L., 1753) respectivement « ALOMY » et « MATCH », représentent la majorité des espèces recensées quelle que soit la stratégie de culture utilisée.

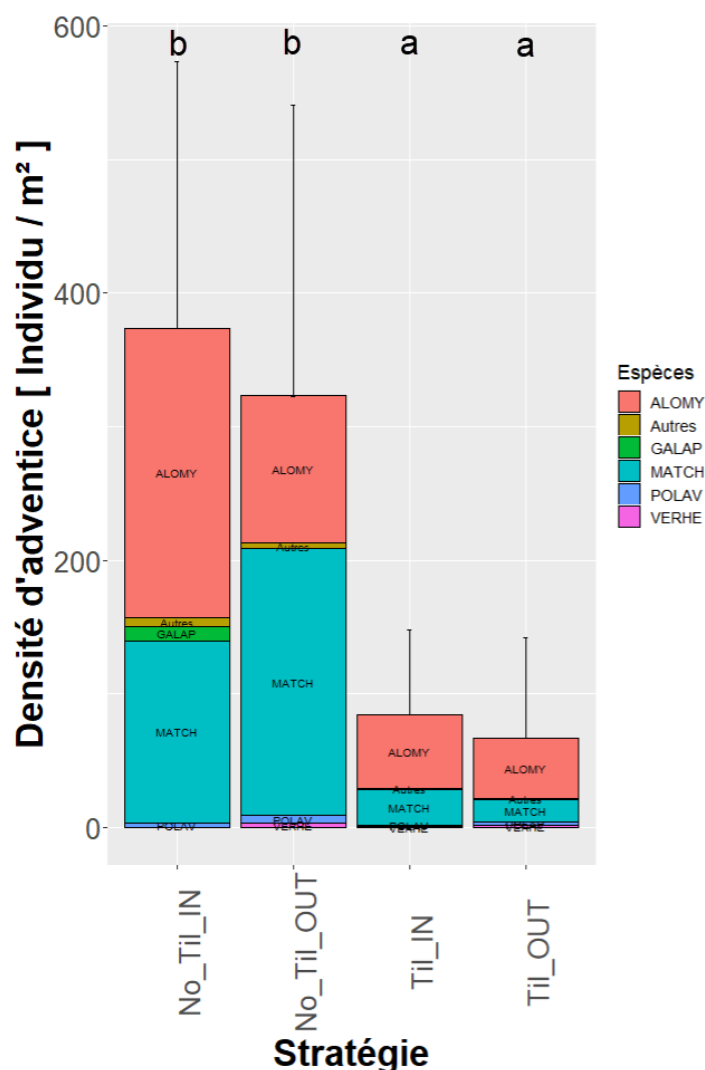


Figure 35 : Graphique présentant les proportions en adventices en fonction des stratégies de culture (1^{er} comptage, SOLRESIDU).

Le tableau 9 reprend l'ensemble des résultats des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des stratégies de culture sur les indices de biodiversité. Le travail du sol révèle avoir un impact significatif sur la richesse en espèces et sur l'abondance. Le mode de gestion des résidus impacte significativement la richesse en espèces. En revanche, l'interaction entre les facteurs fixes n'a aucun impact sur les indices.

Tableau 9 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les indices de biodiversité alpha pour l'essai SOLRESIDU (1^{er} comptage). Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité	Abondance
Travail du sol	***	-	-	-	***
Résidu	*	-	-	-	-
Travail du sol * Résidu	-	-	-	-	-

Les figures 36 et 37 présentent les graphiques des interactions significatives entre les facteurs et les indices de biodiversité (tableau 9). Le labour conventionnel diminue significativement la richesse en espèces et l'abondance des adventices tandis que l'incorporation des résidus de culture augmente la richesse en espèces. Le détail des résultats de la flore exprimée du projet SOLRESIDU est disponible à l'annexe 5

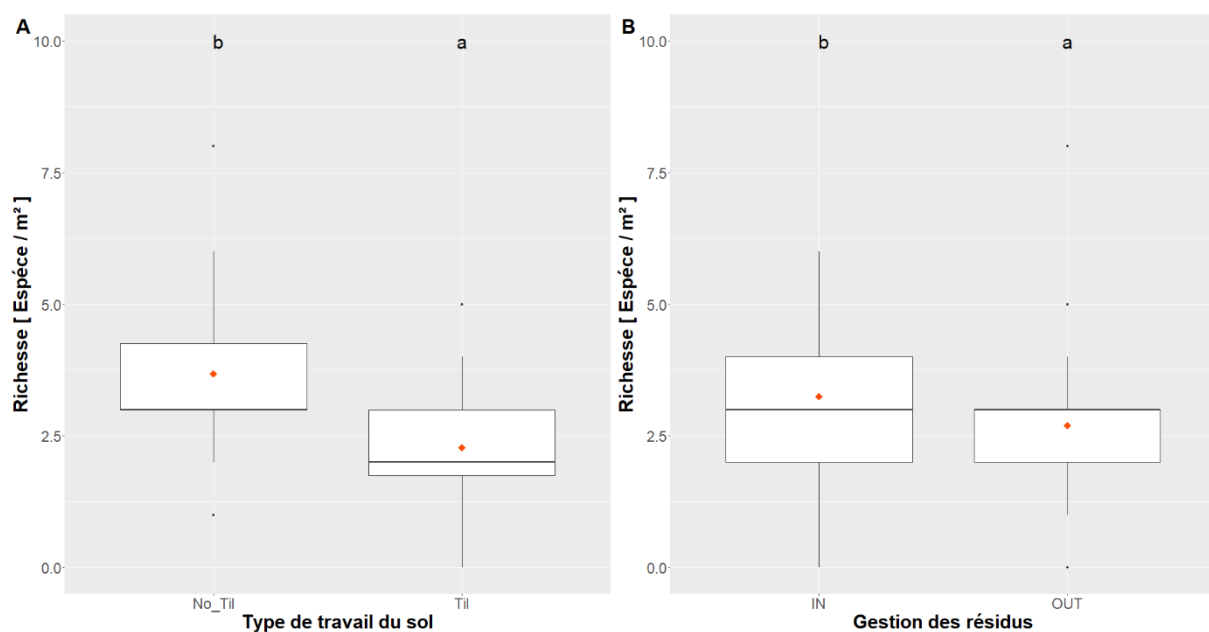


Figure 36 : Graphiques présentant l'influence du type de travail du sol sur la richesse en espèces (SOLRESIDU, 1^{er} comptage).

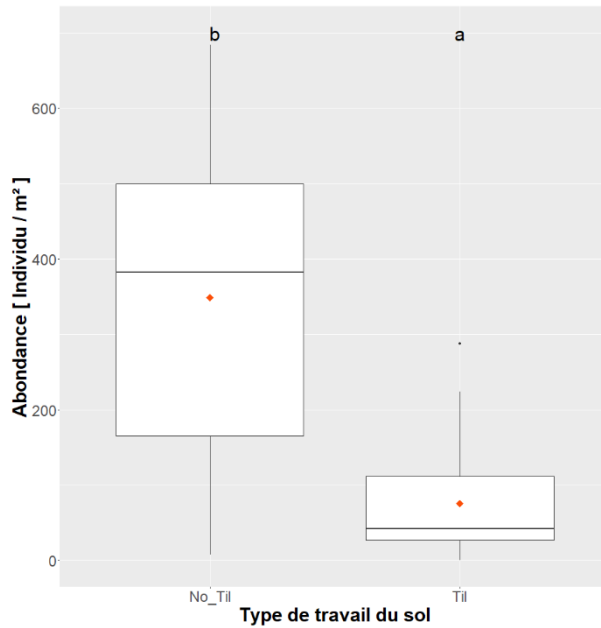


Figure 37 : Graphique présentant l'influence du type de travail du sol sur l'abondance en adventices (SOLRESIDU, 1^{er})

V.1.3.3. Analyse en coordonnées principales

La figure 38 présente le résultat de l'analyse en coordonnées principales laquelle reprend 51,12% de l'information sur ses deux premiers axes. Le graphique de gauche permet de distinguer le long de son premier axe, les deux types de travail du sol. En effet, les centroïdes des clusters de type de travail du sol sont significativement différents avec une p-valeur < 0,05 obtenue par l'analyse PERMANOVA. Les

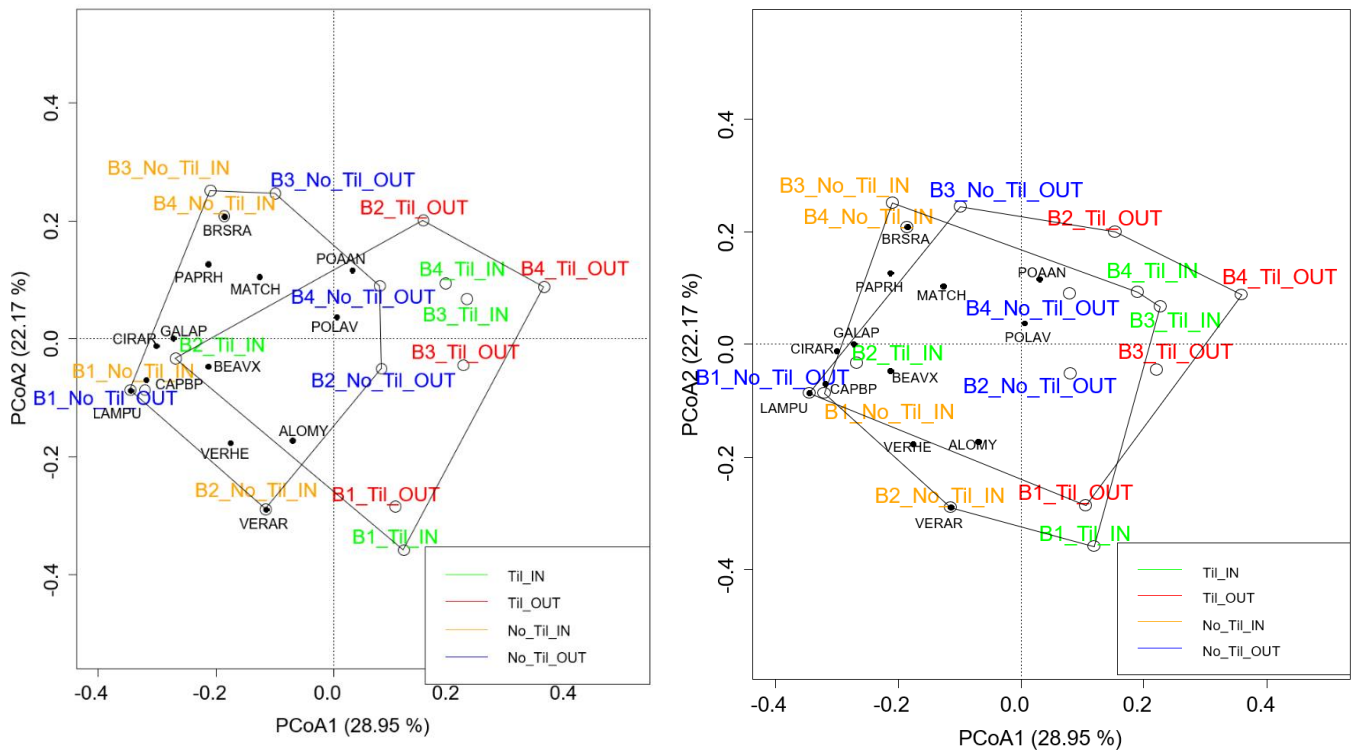


Figure 38 : Analyse en coordonnées principales basée sur les données du premier comptage de l'essai SOLRESIDU. Le graphique de gauche correspond à un cluster sur le type de gestion de résidus de culture et à droite sur les types de travail du sol. L'ensemble des stratégies de culture sont représentés par un code couleur.

valeurs positives de l'axe reprennent majoritairement les parcelles en labour conventionnel et les valeurs négatives les parcelles en labour réduit. Le graphique de droite quant à lui présente un cluster basé sur le mode de gestion des résidus, il confirme l'absence de différence significative révélée par la PERMANOVA et ne permet pas de distinguer clairement les deux modalités de ce facteur.

V.1.4. SOLRESIDU (2^{ème} comptage)

V.1.4.1. Evaluation de l'échantillonnage

La figure 39 reprend les courbes de raréfaction pour les quatre stratégies de culture lors du deuxième comptage. Le nombre d'espèces cumulées s'élève à 7 pour les parcelles "Til_IN", 6 pour les parcelles "Til_OUT" et à respectivement 10 et 8 pour les parcelles qui ne sont pas en labour conventionnel "No_Til_IN" et "No_Til_OUT". Quelle que soit la stratégie, les courbes de raréfaction atteignent ou sont proches d'atteindre un palier. Le constat est le même à l'échelle du projet dans son ensemble avec une courbe atteignant 12 espèces recensées.

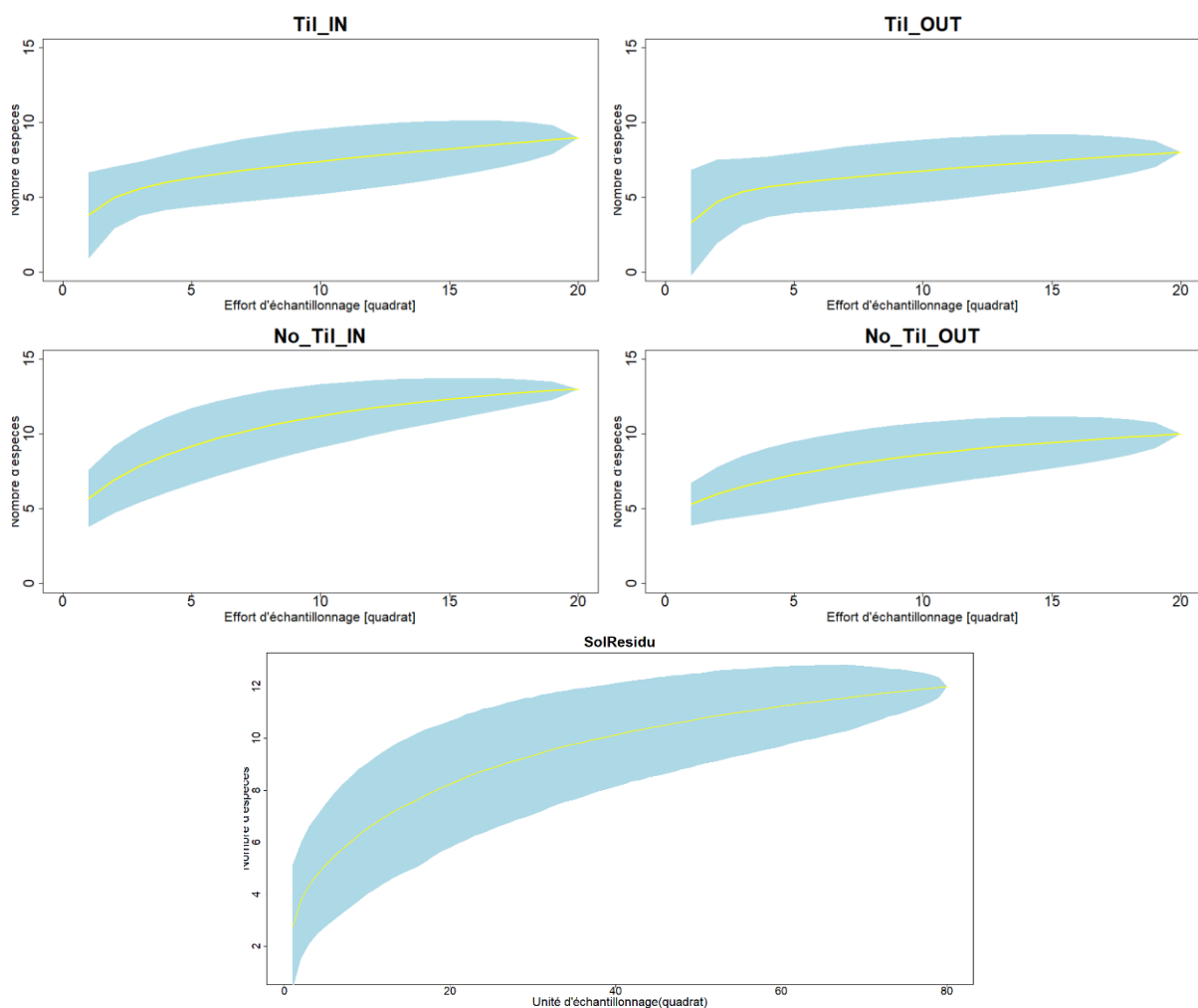


Figure 39 : Courbes de raréfaction exprimant le nombre d'espèces cumulées selon l'effort d'échantillonnage pour les quatre stratégies de culture et pour l'ensemble du projet (SOLRESIDU, 2^{ème} comptage).

Pour compléter les informations apportées par les courbes de raréfactions, le tableau 10 reprend le résultat de l'estimateur Chao 1 pour les 4 stratégies de culture du projet SOLRESIDU ainsi que pour l'ensemble du projet.

Tableau 10 : Résultats de l'estimateur Chao 1 lors du premier comptage pour chaque stratégie de culture et pour le projet SOLRESIDU lors du 2ème comptage dans son ensemble.

Stratégie	Nombre d'espèces	Nombre d'espèces estimée par l'estimateur Chao 1	Ecart-type	Pourcentage d'espèces échantillonnées
Til_IN	7	10	1	70%
Til_OUT	6	8	1	75%
No_Til_IN	10	11	1	90,91%
No_Til_OUT	8	10	1	80%
SOLRESIDU	12	15	4	80%

Les proportions de la densité en espèces échantillonnées lors du deuxième comptage sont visibles à la figure 40. Les espèces mentionnées correspondent au minimum à 1% des espèces recensées au sein des différentes stratégies de culture. ALOMY et MATCH sont majoritairement présents, représentant respectivement 66,88 et 24,31% de l'échantillonnage.

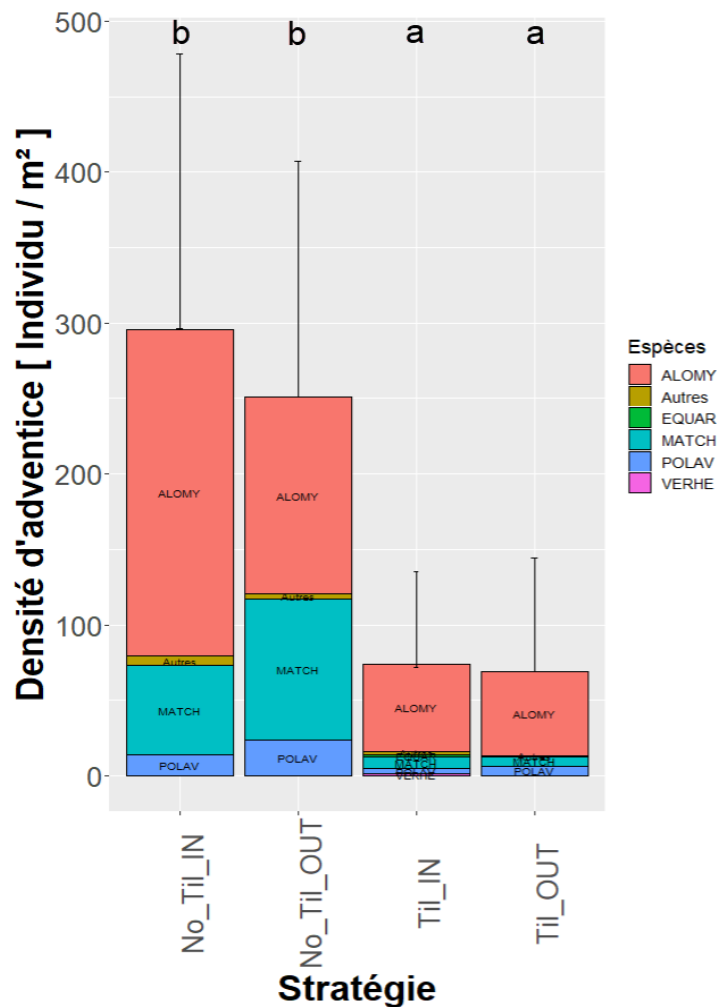


Figure 40 : Graphique présentant les proportions d'adventices en fonction des stratégies de culture, (SOLRESIDU, 2ème comptage).

V.1.4.2. Indices de biodiversité

Le tableau 11 reprend une synthèse des ANOVA réalisées afin de caractériser l'influence des stratégies de culture sur les indices de biodiversité lors du comptage effectué à floraison du froment sur l'essai SolRésidu. Il en ressort que la richesse en espèces, la diversité de Shannon et l'abondance sont impactées significativement par le type de travail du sol. Dès lors, seuls ces derniers seront détaillés dans la suite de cette section.

Tableau 11 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les indices de biodiversité alpha pour l'essai SOLRESIDU (2^{ème} comptage) comptage). Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité	Abondance
Travail du sol	***	*	-	-	***
Résidu	-	-	-	-	-
Travail du sol * Résidu	-	-	-	-	-

La figure 41 représente l'influence du type de travail du sol sur les indices significativement impactés par le type de travail du sol. Le labour conventionnel diminue de manière significative ces trois indices.

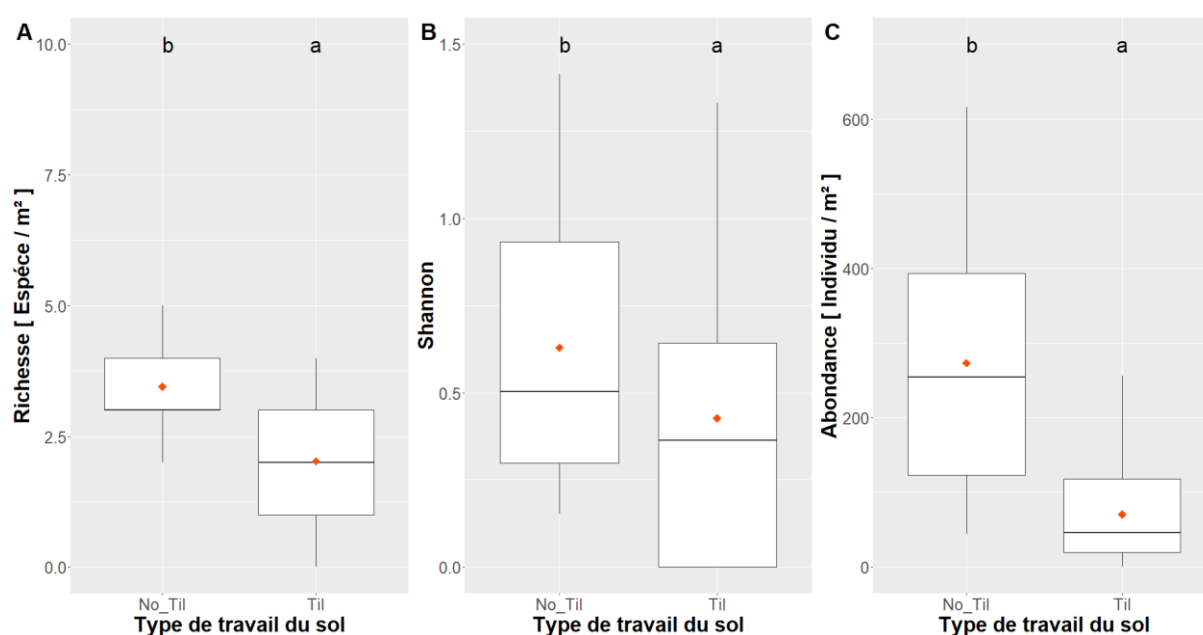


Figure 41 : Graphiques présentant l'influence du type de travail du sol sur (A) la richesse en espèces, (B) la diversité de Shannon, (C) l'abondance en adventices (SOLRESIDU, 2^{ème} comptage).

V.1.4.3. Biomasse

La figure 42 représente les mêmes graphiques que ceux disponibles à la figure 40, à la différence que la densité est ici exprimée en biomasse (g/m²) et non en individus (Individu/m²). Le constat s'avère être identique avec ALOMY et MATCH représentant respectivement 82,35 et 11,23% de la biomasse échantillonnée.

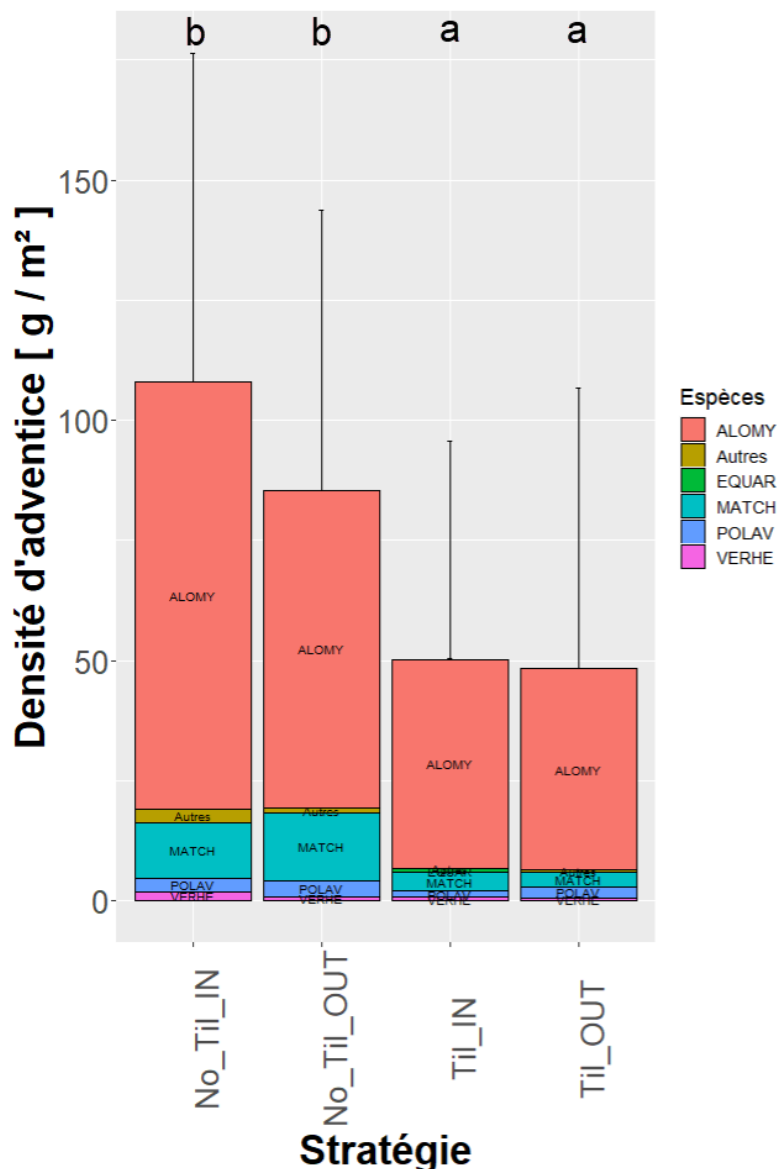


Figure 42 : Graphique présentant les proportions d'adventices en densité de biomasse (SOLRESIDU, 2^{ème} comptage).

Le tableau 12 reprend les différentes ANOVA réalisées afin de caractériser l'influence des stratégies sur la biomasse de la culture et des adventices. Ces dernières se voient être impactées de manière significative par le travail du sol. De plus, l'indice d'équitabilité de Pielou, calculé selon les données de biomasse des adventices et non de comptage, est également testé mais n'est pas impacté significativement.

Tableau 12 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des stratégies sur la biomasse de la culture et des adventices. La mention « (biomasse) » signifie que l'indice est basé sur les données de biomasse et non de densité. Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

	Equitabilité (biomasse)	Biomasse froment	Biomasse adventices
Travail du sol	-	*	***
Résidu	-	-	-
Travail du sol * Résidu	-	-	-

La figure 43 présente l'impact du type de travail du sol sur la biomasse du froment et des adventices. Il en ressort une diminution de la biomasse en adventices et une augmentation de celle du froment quand les parcelles sont labourées.

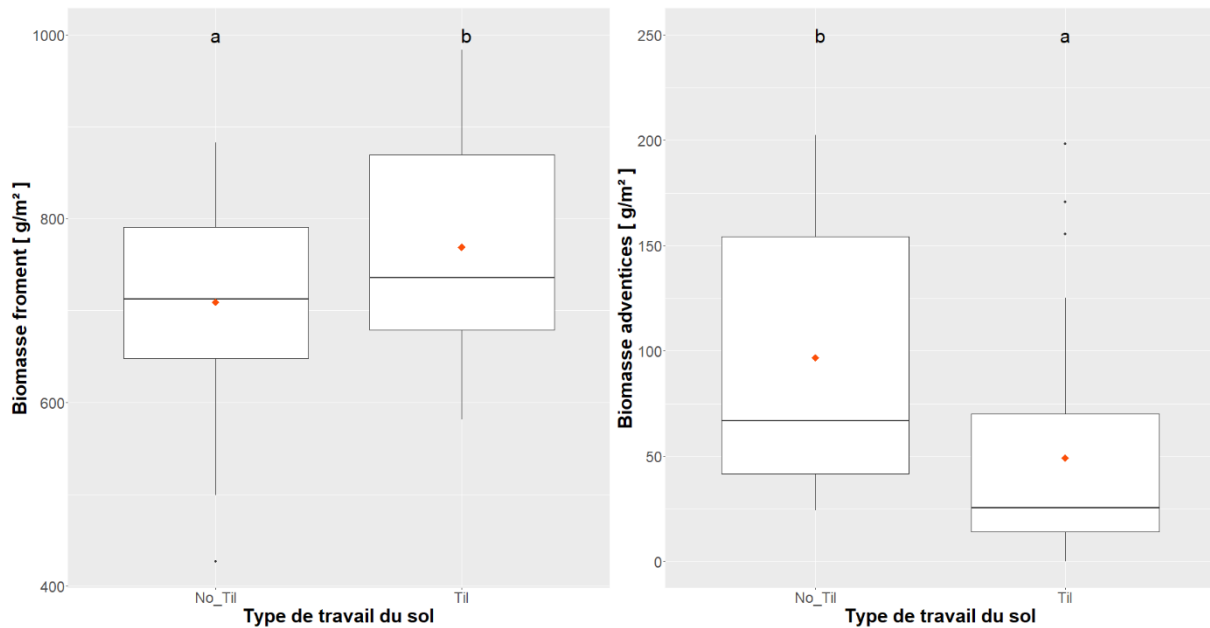


Figure 43 : Biomasse du froment et des adventices en fonction du type de travail du sol (SOLRESIDU, 2^{ème} comptage).

Le tableau 13 reprend la synthèse des ANOVA caractérisant la relation entre les indices de biodiversité et la biomasse de la culture et des adventices. Il est à noter que l'indice d'abondance en adventices calculé selon des données de biomasse n'est autre que la biomasse en adventice.

Tableau 13 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser la relation entre les indices de biodiversité et la biomasse de froment et des adventices lors du deuxième comptage de l'essai SOLRESIDU. La mention « (biomasse) » signifie que l'indice est basé sur les données de biomasse et non de densité. Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité (biomasse)	Abondance (biomasse)
Biomasse froment	-	-	-		***
Biomasse adventices	-	*	***	**	1

La figure 44 présente la relation entre la biomasse du froment et la biomasse en adventice et il en ressort que la biomasse du froment diminue avec l'augmentation de la biomasse d'adventices.

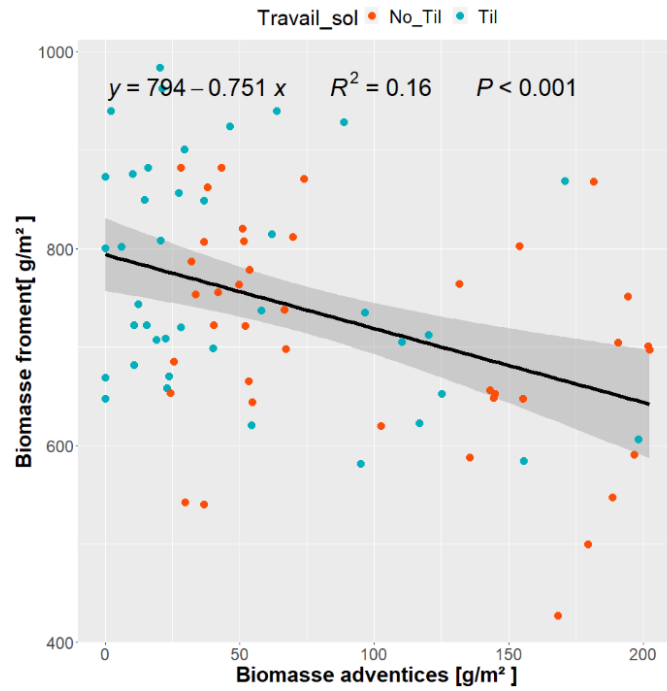


Figure 44 : Graphiques présentant la biomasse du froment en fonction de la biomasse des adventices (SOLRESIDU, 2ème

La figure 45 présente la relation entre les indices de biodiversité de Shannon, Simpson et l'équitabilité (basée sur la biomasse) et la biomasse en adventices. La relation est identique pour les trois indices à savoir, une diminution de la biomasse en adventices avec une augmentation des valeurs des indices.

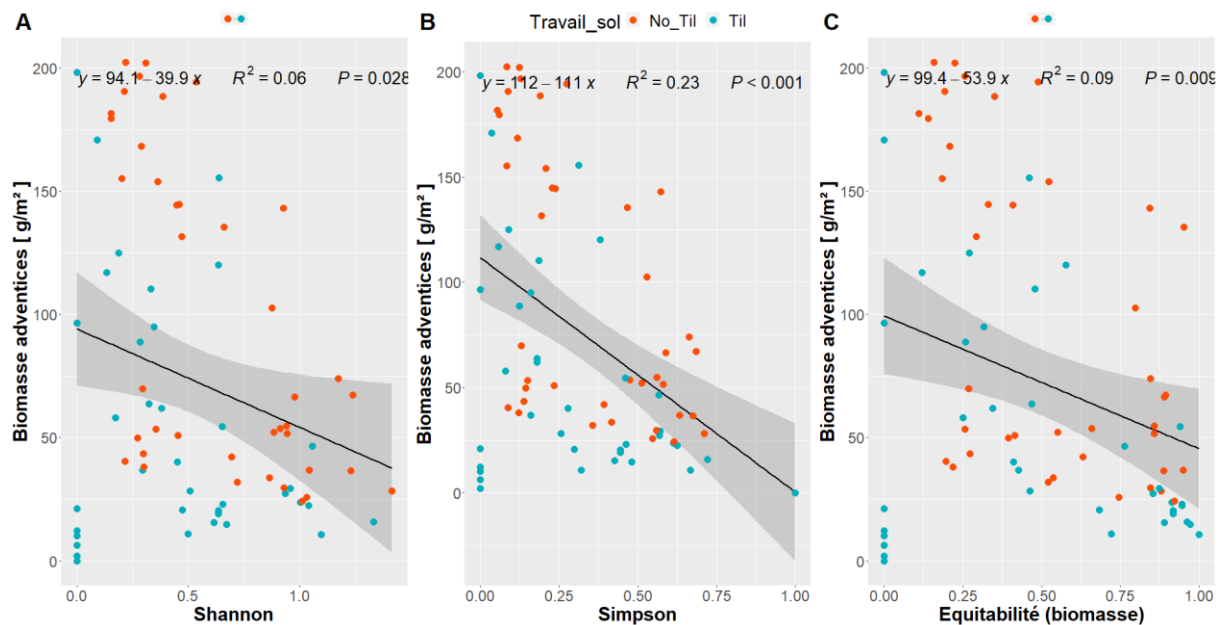


Figure 45 : Graphiques présentant l'influence de la diversité de Shannon, de Simpson et de l'équitabilité sur la biomasse en adventices (SolRésidu 2ème comptage).

V.1.4.4. Analyse en coordonnées principales

La figure 46 présente le résultat de l'analyse en coordonnées principales basée sur les données de biomasse en adventices. Les deux premiers axes reprennent 45,68% de l'information. Sur le graphique de gauche, le cluster permet de distinguer les deux types de travail du sol. Ces derniers ne sont pas pour autant significativement différents selon le test PERMANOVA. Cependant, une séparation des parcelles différant par leur type de travail du sol est observable selon l'axe 2, lequel reprend 21,88% de l'information. Les valeurs positives de l'axe reprennent majoritairement les parcelles en labour réduit et les valeurs négatives les parcelles en labour conventionnel. Il est à noter que les parcelles « B2_Til_OUT » ; B2_No_Til_IN ; B4_No_Til_OUT » n'ont pas réagi selon leur modalité. Le graphique de droite met en avant des clusters « bloc », lesquels sont significativement différents (p -valeur < 0,001). Concernant les espèces d'adventices, elles sont toutes présentes (excepté AQUAR) dans le cluster du travail réduit du sol.

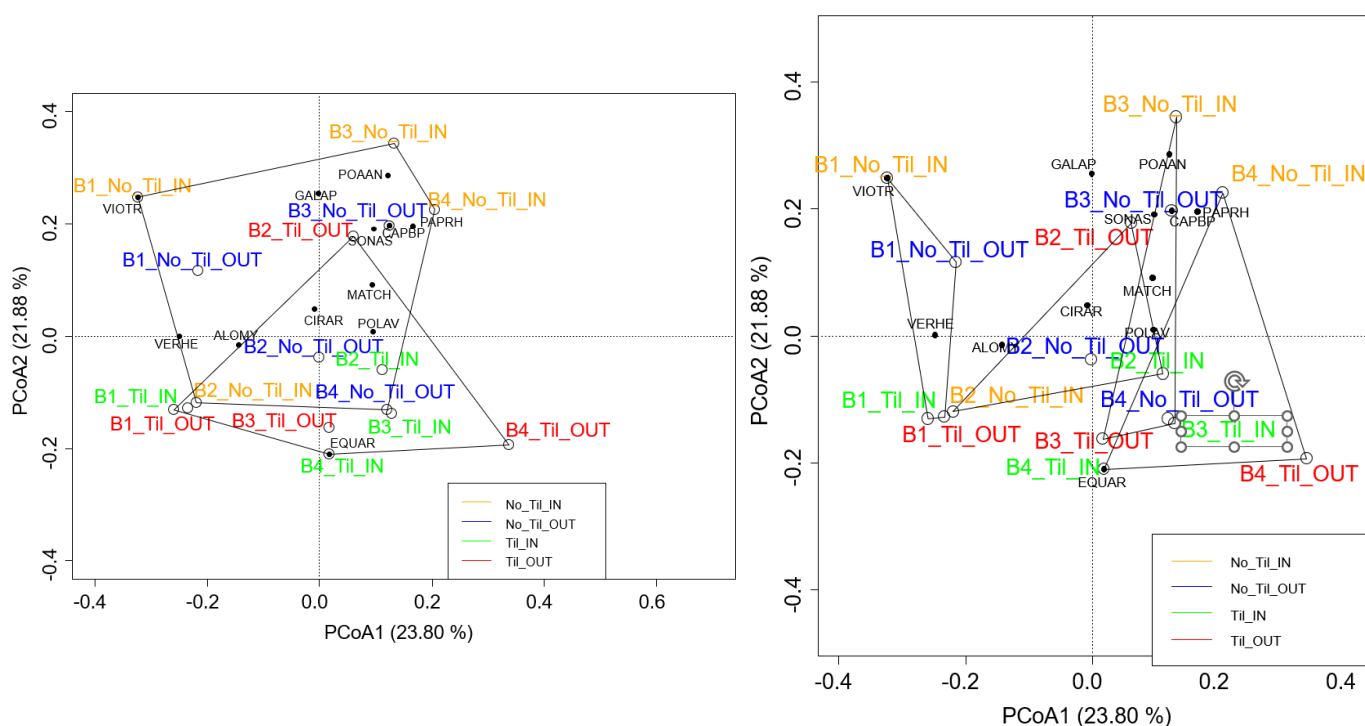


Figure 46 : Analyse en coordonnées principales basée sur les données de biomasse des adventices. Le graphique de gauche présente un cluster sur le type de travail du sol et à droite sur le type de gestion des résidus. Les quatre stratégies de culture sont représentées par un code couleur.

V.1.4.5. Analyse des traits fonctionnels

L'analyse des traits fonctionnels est représentée à la figure 47 et permet notamment de constater une relation significative entre le trait SCN et le mode de gestion des résidus.

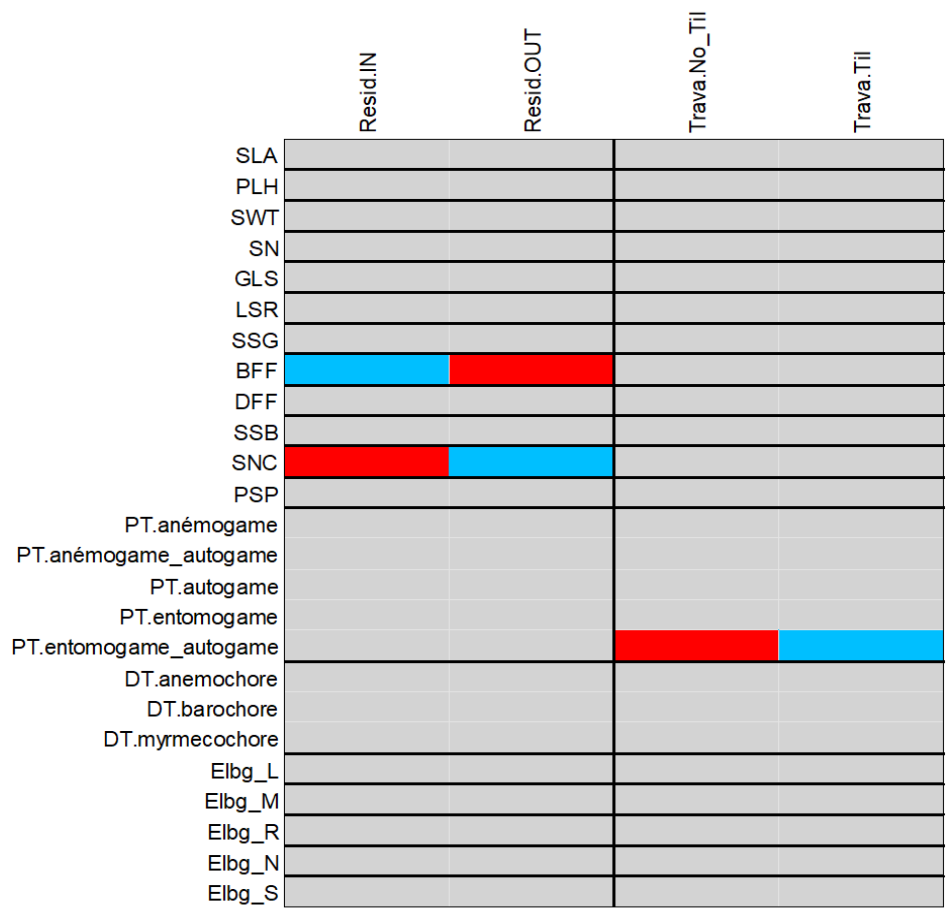


Figure 47 : Analyse RLQ réalisée à l'aide des données de biomasse lors du deuxième comptage de l'essai SOLRESIDU. Les relations significatives positives sont en rouge et les significatives négatives en bleu.

V.2. Flore adventice potentielle

V.2.1. EcoFoodSystem

V.2.1.1. Echantillonnage

La figure 48 reprend les courbes de raréfaction pour les quatre rotations et pour l'ensemble de l'essai au niveau du stock semencier. Hormis la rotation dite « agro », aucune des autres courbes n'est marquée par un palier. Le nombre d'espèces cumulées recensées pour les rotations « référence », « phyto », « agroécologique », « vegan » et pour l'ensemble de l'essai s'élèvent respectivement à 26, 20, 22 et 36.

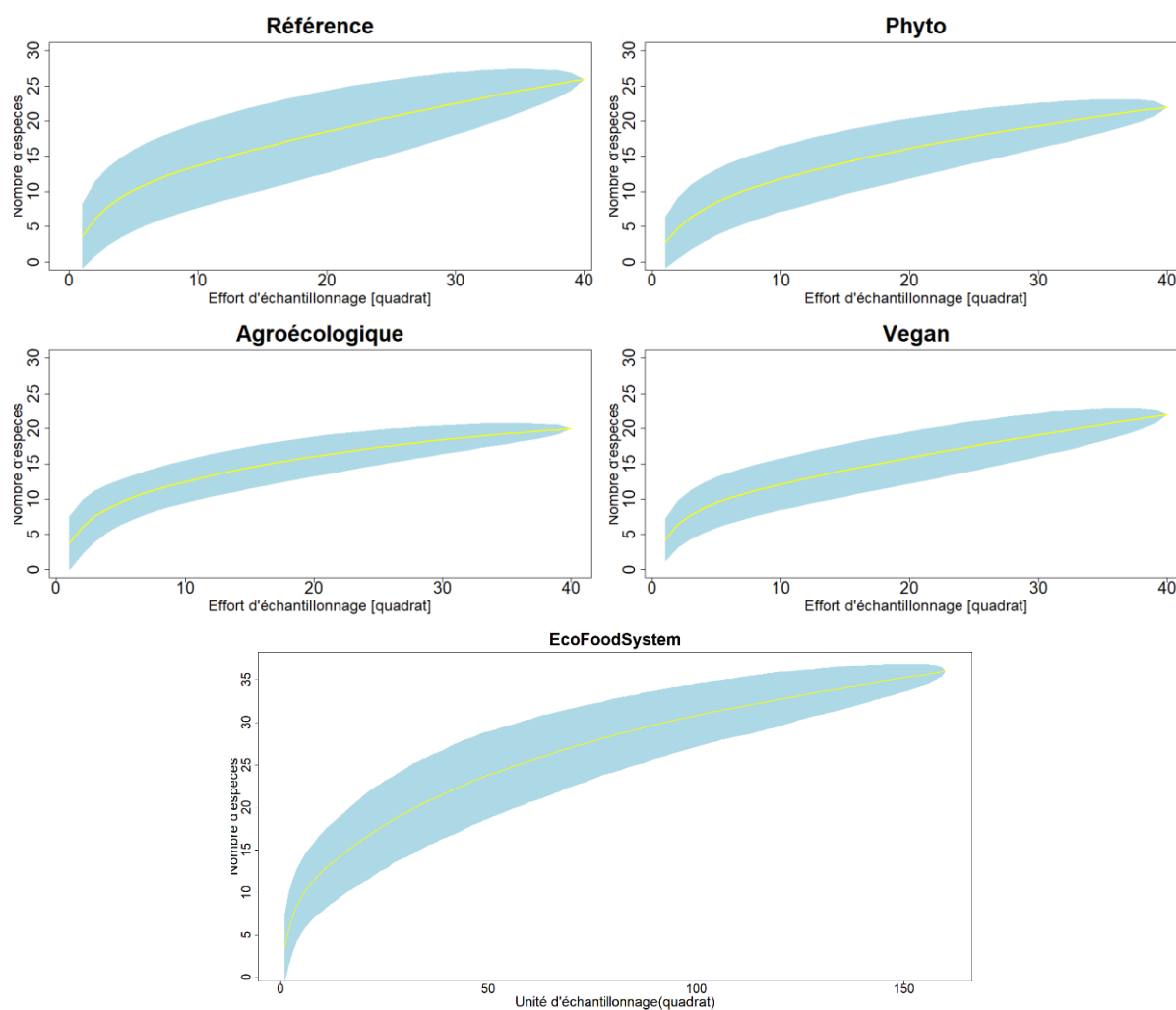


Figure 48 : Courbes d'accumulation réalisées pour les quatre rotations et l'ensemble du projet (EcoFoodSystem, stock semencier).

Pour compléter l'information fournie par les courbes de raréfaction, le tableau 14 reprend le résultat de l'estimateur Chao 1. Ce dernier révèle que le nombre d'espèces potentiellement manquées pour la rotation « agroécologique » s'élève à 2 et qu'elle se situe entre 21 et 29 pour les autres et l'ensemble du projet.

Tableau 14 : Résultats de l'estimateur Chao 1 pour les quatre rotations et pour l'ensemble du projet EcoFoodSystem au niveau du stock semencier.

Rotation	Nombre d'espèces	Nombre d'espèces estimé par l'estimateur Chao 1	Ecart-type	Pourcentage d'espèce échantillonnées
Référence	26	47	16	55,32%
Phyto	22	46	24	47,82%
Agro	20	22	3	90,91%
Vegan	22	51	28	43,14%
EcoFoodSystem	36	60	20	60%

Le figure 49 permet de visualiser la proportion des espèces présentes au sein des rotations en fonction des temporalités.

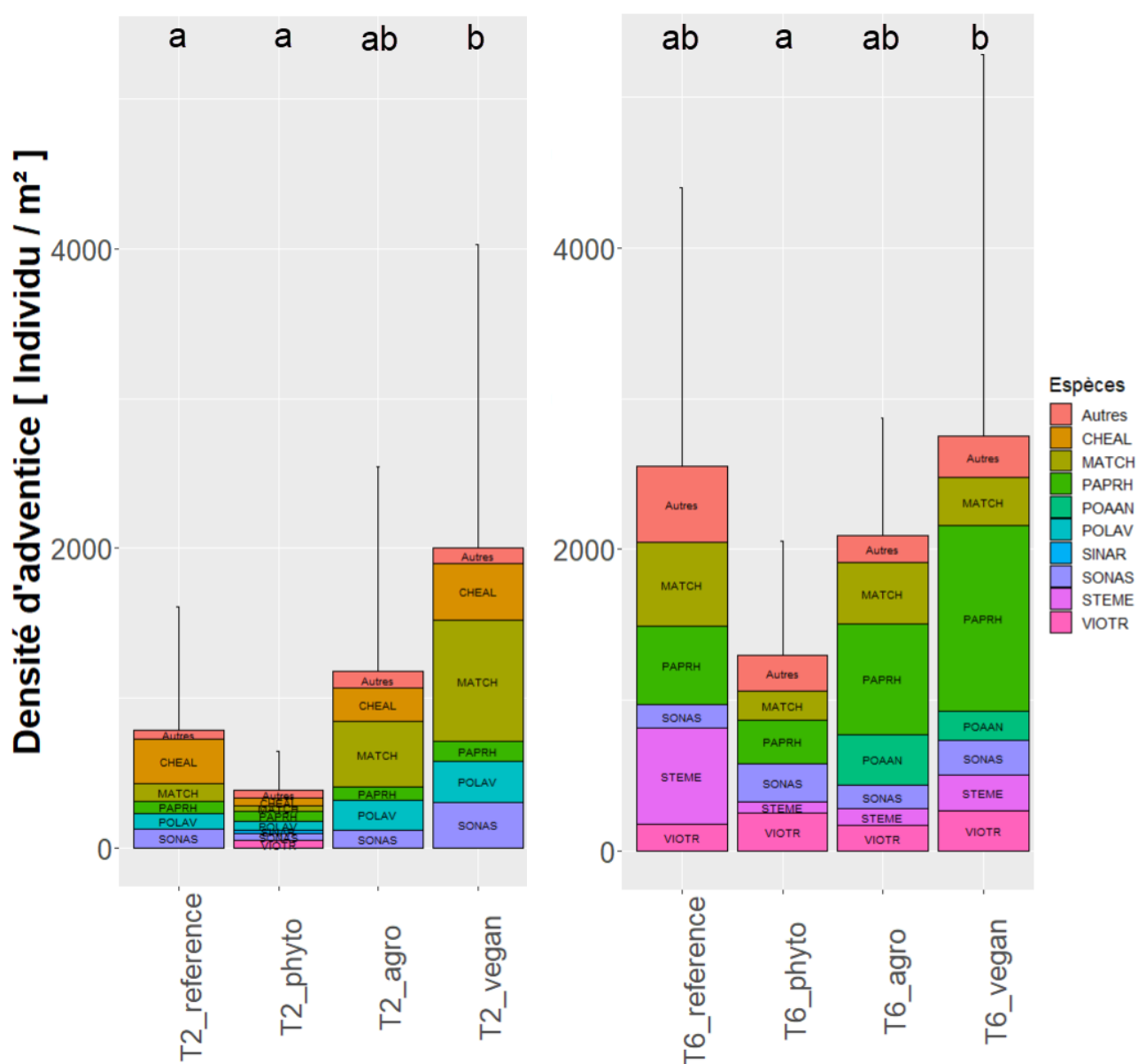


Figure 49 : Graphiques présentant les proportions d'adventices par m² en fonction des rotations pour des deux temporalités EcoFoodSystem, stock semencier).

V.2.1.2. Indices de biodiversité

Le tableau 15 reprend une synthèse des ANOVA réalisées pour caractériser l'influence des rotations sur les indices de biodiversité au niveau du stock semencier de l'essai EcoFoodSystem. En temporalité 2, tous les indices excepté la diversité de Simpson sont significativement impactés. Concernant la temporalité 6, seules la richesse en espèces et l'abondance en adventices permettent d'observer des différences significatives en fonction des rotations.

Tableau 15 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les indices de biodiversité du stock semencier de l'essai EcoFoodSystem selon les deux temporalités. Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité	Abondance
Rotation (T2)	***	**	-	*	***
Rotation (T6)	*	-	-	-	*

Les figures 50, 51 illustrent les relations entre les indices de biodiversité impactés significativement par les rotations au niveau de la temporalité 2. Les indices sont impactés de la même manière. On retrouve des valeurs hautes avec la rotation « vegan », des valeurs intermédiaires avec la rotation « agroécologique » et des valeurs basses avec les rotations « phyto » et « référence ». Le détail des résultats de la flore potentielle du projet EcoFoodSystem est disponible à l'annexe 6.

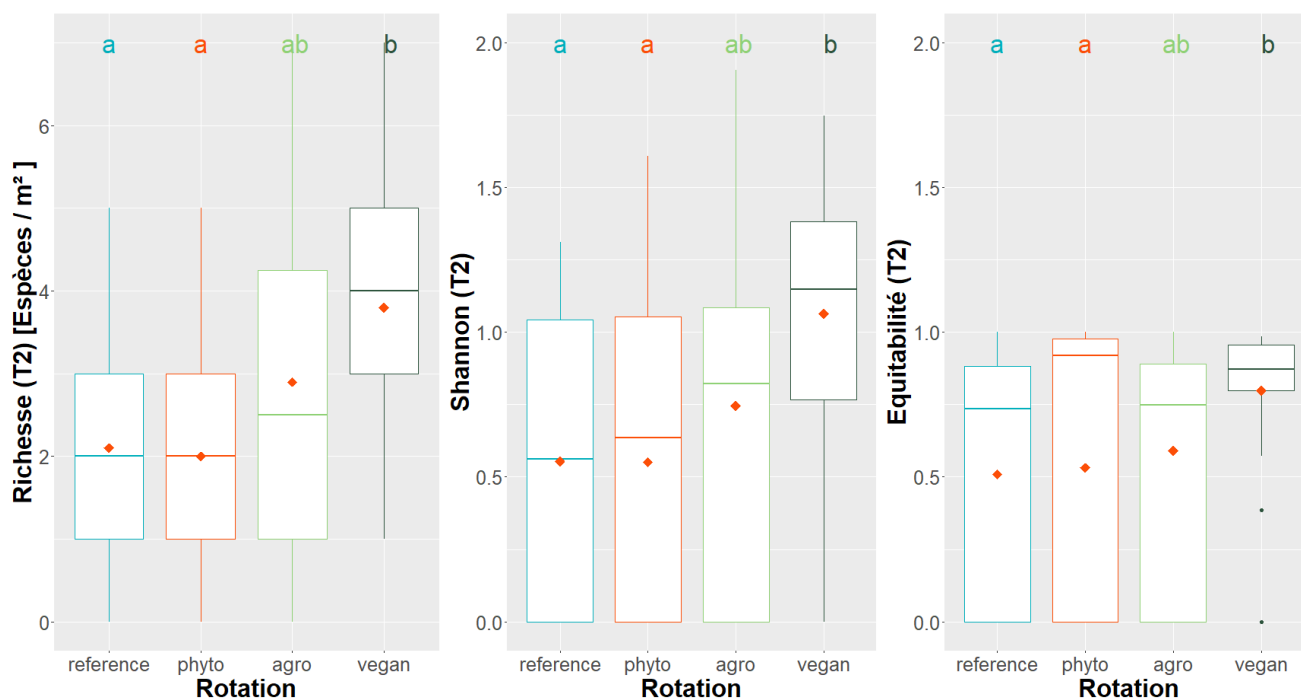


Figure 50 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la richesse (gauche), l'indice de Shannon (centre) et l'équitabilité (droite) de la temporalité 2 du stock semencier du projet EcoFoodSystem.

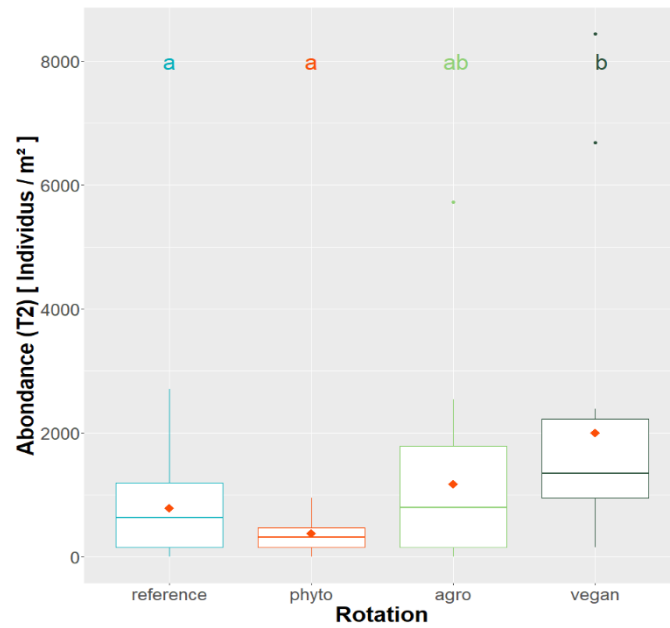


Figure 51 : Graphique présentant l'influence des rotations sur l'abondance en adventices de la temporalité 2 pour le stock semencier du projet EcoFoodSystem.

La figure 52 correspond aux graphiques traduisant l'influence des rotations de la temporalité 6 sur la richesse en espèces et sur l'abondance en adventices.

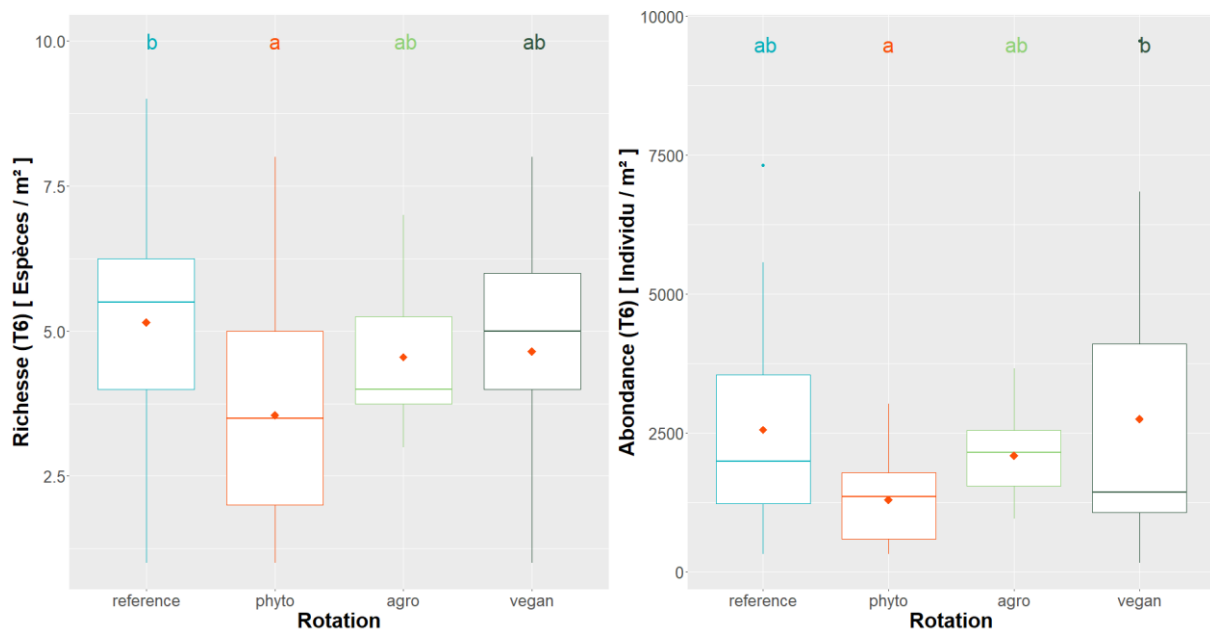


Figure 52 : Graphiques présentant l'influence des rotations sur la richesse (gauche) et l'abondance en adventices (droite) pour la temporalité 6 du stock semencier du projet EcoFoodSystem.

V.2.1.3. Analyse en coordonnées principales

La figure 53 reprend l'analyse en coordonnées principales des adventices recensées grâce au stock semencier de l'essai EcoFoodSystem. Le jeu de couleur correspond aux rotations et les clusters aux blocs. L'analyse PERMANOVA indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les centroïdes des clusters « bloc » et « rotation » quel que soit la temporalité. Au niveau de la temporalité 2 (gauche) dont les deux premiers axes reprennent 36,76 % de l'information, la rotation phyto est nettement dissociable des autres et se caractérise par la présence de SINAR et LAMPU. La temporalité 6 est d'avantage impactée par l'effet des blocs (bien que les différences ne soient pas significatives). Ces derniers s'expriment le long du premier axe, lequel reprend 28,05% de l'information.

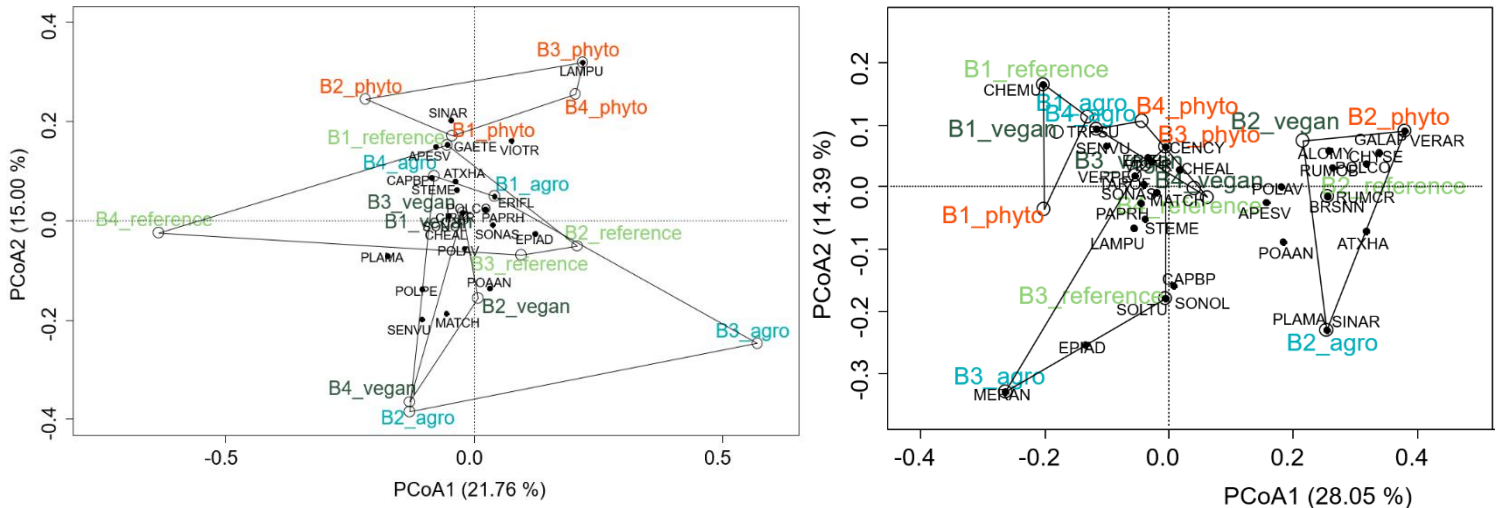


Figure 53 : Analyse en coordonnées principales réalisée sur la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite) du stock semencier du projet EcoFoodSystem.

V.2.1.4. Traits fonctionnels

L'analyse RLQ des traits fonctionnels est disponible à la figure 54.

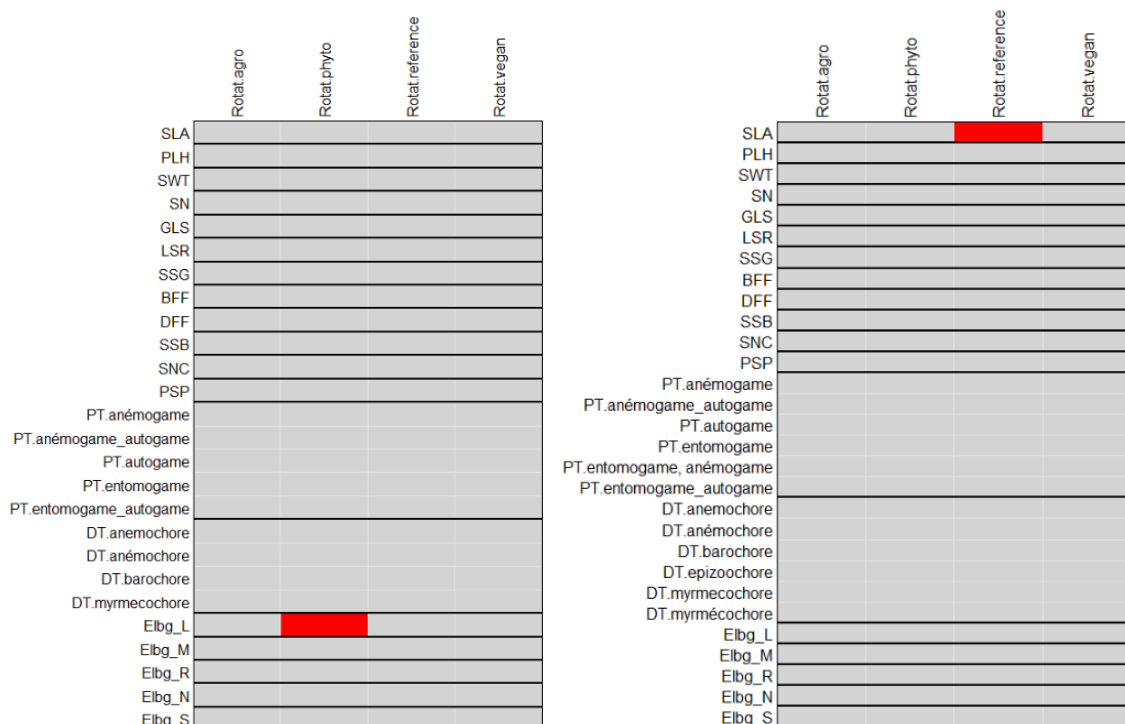


Figure 54 : Analyse RLQ sur le stock semencier du projet EcoFoodSystem selon la temporalité 2 (gauche) et la temporalité 6 (droite). Les relations significatives positives sont en rouge et les significatives négatives en bleu.

V.2.2. SOLRESIDU

V.2.2.1. Echantillonnage

La figure 55 reprend les courbes de raréfaction pour les différentes stratégies de culture et pour le projet SOLRESIDU dans son ensemble. Aucune des courbes n'atteint de palier, signifiant que l'effort d'échantillonnage n'a pas été suffisant pour recenser l'ensemble des espèces

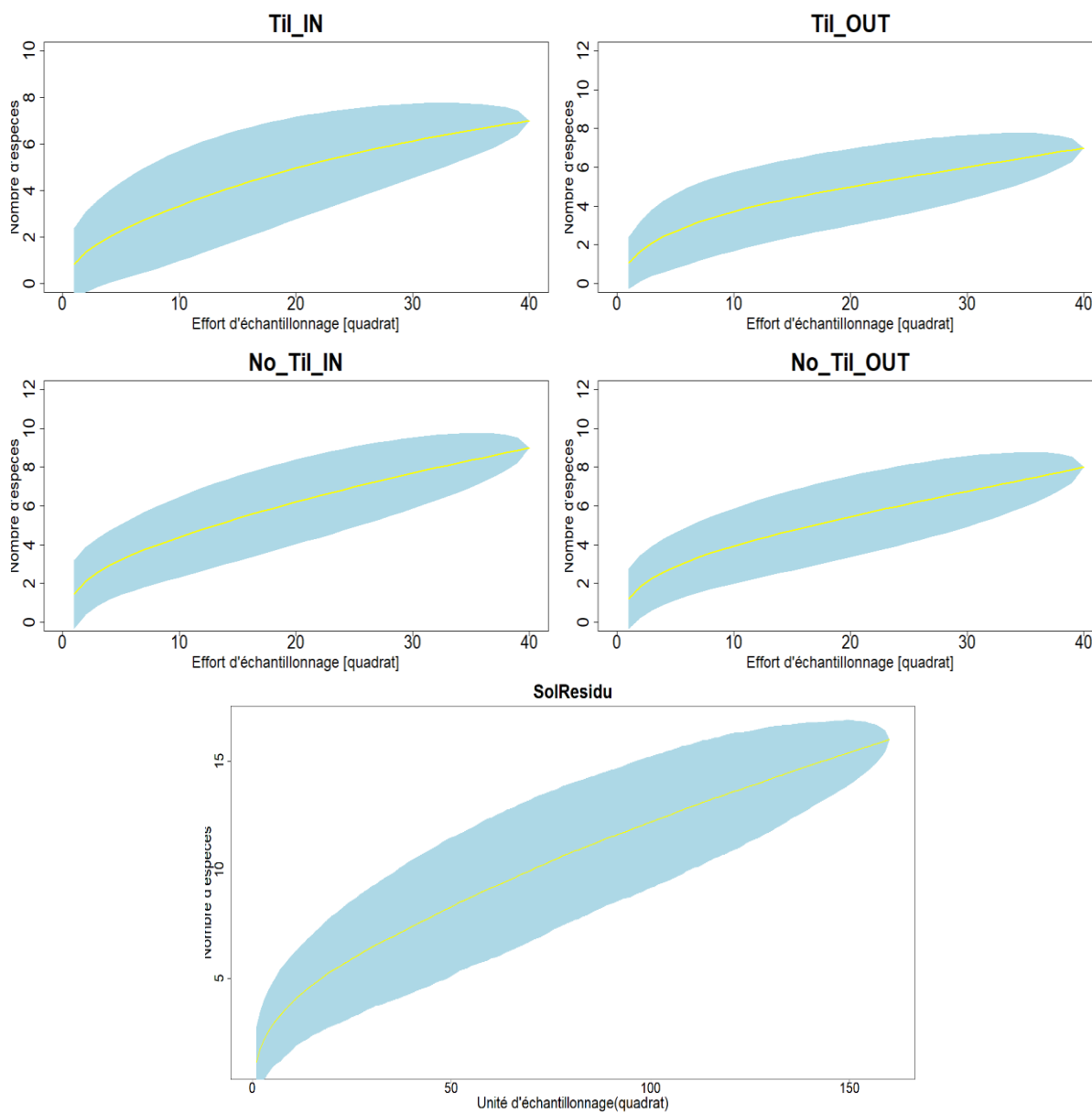


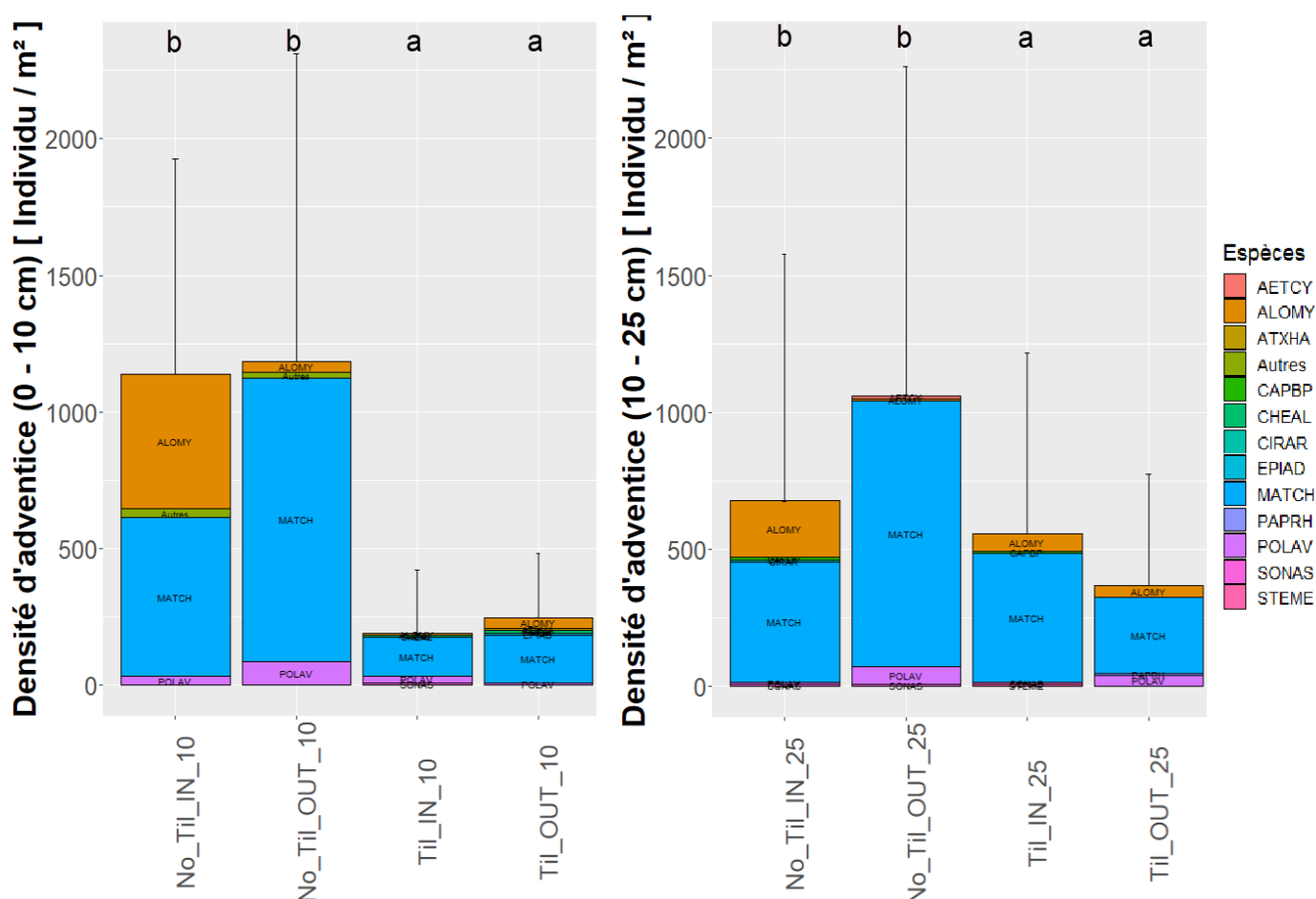
Figure 55 : Courbes d'accumulation réalisées sur les quatre stratégies de cultures et à l'échelle du projet dans son ensemble (SOLRESIDU, stock semencier).

Afin de compléter les informations sur l'échantillonnage apportées par les courbes de raréfaction, le tableau 16 reprend les résultats de l'estimateur Chao 1.

Tableau 16 : Résultats de l'estimateur Chao 1 pour le stock semencier selon chaque stratégie et pour le projet SOLRESIDU dans son ensemble.

Stratégie	Nombre d'espèces	Nombre d'espèces estimé par l'estimateur Chao 1	Ecart-type	Pourcentage d'espèces échantillonnées
Til_IN	7	9	2	77,78%
Til_OUT	7	13	7	53,85%
NoTil_IN	9	21	17	42,85%
NoTil_OUT	8	18	10	44,44%
SOLRESIDU	16	36	20	44,44%

Les proportions de la densité en espèces recensées avec le stock semencier sont visibles à la figure 56. Les espèces mentionnées correspondent au minimum à 1% des espèces recensées au sein des différentes stratégies de culture. ALOMY et MATCH s'y retrouvent majoritairement et représente respectivement 16,59% et 75,48% de l'échantillonnage total.



V.2.2.2. Indices de biodiversité

Le tableau 17 reprend une synthèse des ANOVA réalisées afin de caractériser l'influence des stratégies de culture sur les indices de biodiversité selon les deux horizons considérés. Au niveau de l'horizon de surface, une interaction entre les deux facteurs fixes est présente et impacte significativement la

richesse en espèces, la diversité de Shannon, l'équitabilité de Pielou et l'abondance en adventices. Au niveau de l'horizon en profondeur, le type de travail du sol se voit être un facteur significativement impactant de l'abondance en adventices.

Tableau 17 : Synthèse des différentes ANOVA réalisées pour caractériser les indices de biodiversité pour l'essai SOLRESIDU selon différentes profondeurs d'échantillonnage de sols (Stock semencier). Les symboles (*) renseignent le niveau de significativité. *** : p-valeur < 0,001 ; ** : p-valeur < 0,01 ; * : p-valeur < 0,05.

0 - 10 cm					
	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité	Abondance
Travail du sol	***	***	-	**	***
Résidu	-	-	-	-	-
Travail du sol * Résidu	*	*	-	*	*
10 - 25 cm					
	Richesse	Shannon	Simpson	Equitabilité	Abondance
Travail du sol	-	-	-	-	*
Résidu	-	-	-	-	-
Travail du sol * Résidu	-	-	-	-	-

La figure 57 révèle que les stratégies de culture influencent de manière semblable la richesse en espèces, l'indice de Shannon et l'équitabilité sur les premiers 10 cm de sol. Des valeurs faibles sont observées au niveau des parcelles en labour conventionnel (Til), les valeurs intermédiaires en non-labour avec exportation des résidus de culture (No_til_OUT) et les valeurs élevées en non-labour avec l'incorporation des résidus (No_til_IN). Le détail des résultats de la flore potentielle du projet SOLRESIDU est disponible à l'annexe 7.

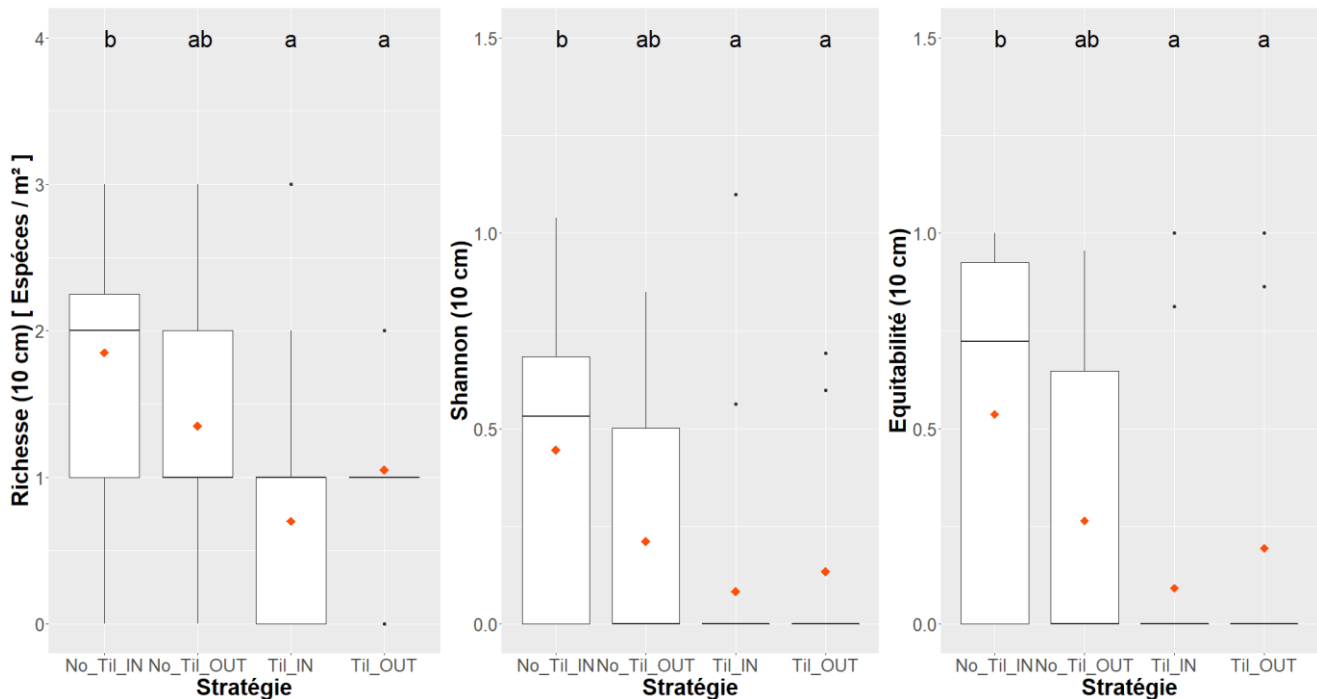


Figure 57 : Graphiques présentant l'influence des stratégies de culture sur la richesse (Gauche) l'indice de Shannon (centre) et l'équitabilité (droite) pour les premiers 10 cm du sol (SOLRESIDU, stock semencier).

La figure 58 présente l'impact des stratégies de culture sur l'abondance en adventices à l'horizon de surface. Il en ressort une densité en adventices plus importante dans les parcelles avec un travail réduit du sol.

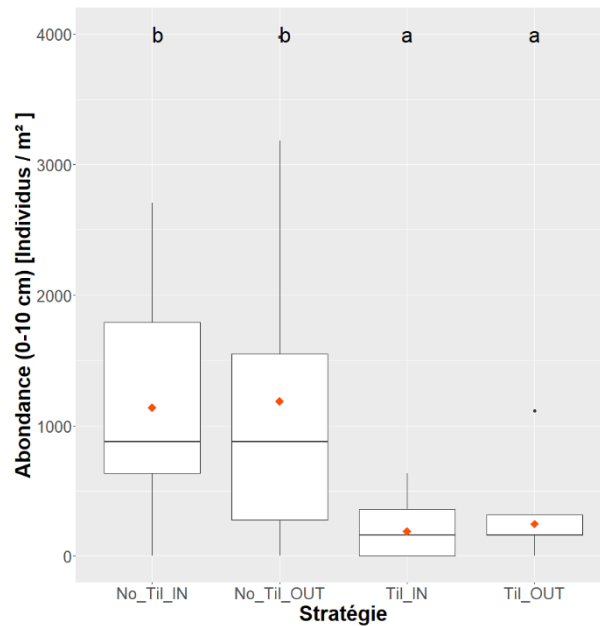


Figure 58 : Graphique présentant l'influence des stratégies de culture sur l'abondance en adventices sur les premiers 10 cm du sol (SOLRESIDU, stock

La figure 59 illustre l'impact du type de travail du sol sur l'abondance en adventices dans l'horizon de surface. La densité en adventices y est plus élevée dans les parcelles en labour réduit.

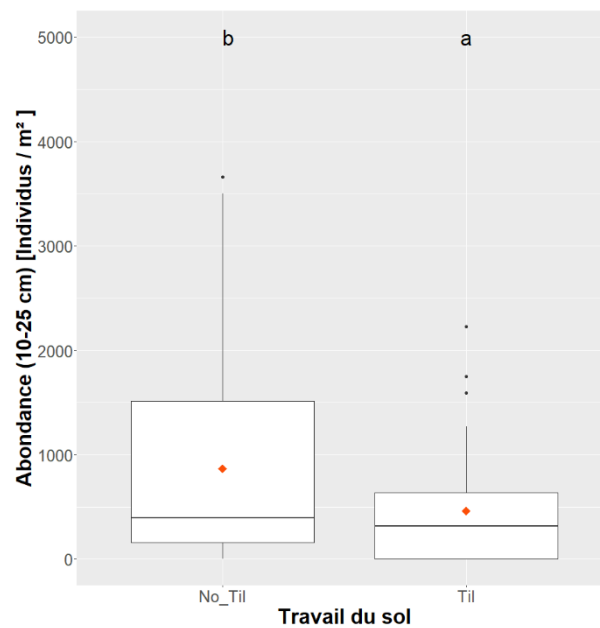


Figure 59 : Graphique présentant l'influence du type de travail du sol sur l'abondance en adventices dans le stock semencier entre 10 et 25 cm de profondeur pour le projet SOLRESIDU.

V.2.2.3. Analyse en coordonnées principales

La figure 60 présente l'analyse en coordonnées principales des données de comptage en adventices du stock semencier selon deux profondeurs de sol. Le jeu de couleur fait référence aux quatre stratégies de culture qui sont également représentées par les clusters. Le graphique de droite correspond à l'horizon de surface et les deux premiers axes de la PCoA reprennent 48,11% de l'information. La PERMANOVA réalisée sur les centroïdes des clusters « stratégies » ne révèle pas de différence significative. Cependant, le travail du sol semble être représenté par le deuxième axe avec le non-labour majoritairement dans les valeurs positives et le labour dans les valeurs négatives. Le graphique de droite concerne l'horizon en profondeur avec ses deux premiers axes expliquant 50,76% de l'information. Le premier axe semble refléter le facteur de gestion des résidus de culture avec l'exportation dans les valeurs négatives et l'incorporation dans les valeurs positives. De plus, la PERMANOVA appliquée sur les résidus de culture révèle qu'il y a bien une différence significative avec une p-valeur < 0,05.

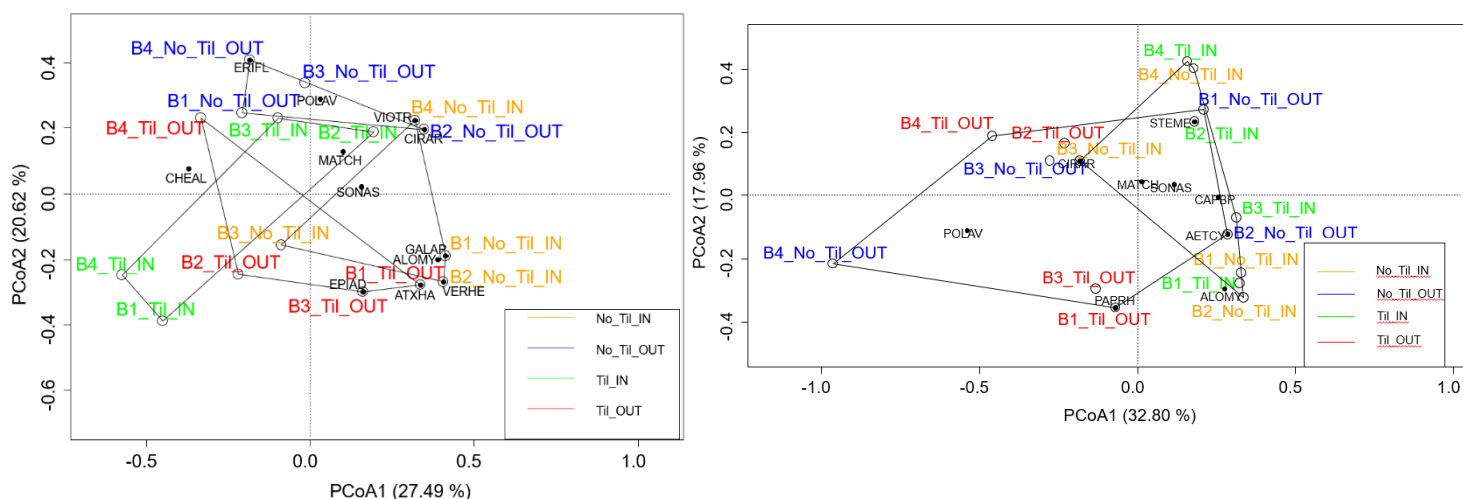


Figure 60 : Analyse en coordonnées principales du stock semencier l'horizon de surface entre 0 et 10 cm (gauche) et entre 10 et 25 cm (droite) pour le stock semencier du projet SOLRESIDU. Les clusters ainsi que le code couleur de ces deux graphiques correspondent aux aux différentes stratégies de culture.

V.2.2.4. Traits fonctionnels

L'analyse RLQ est présente à la figure 61 et comporte le même code couleur que les précédents. Etant donné que l'interaction entre les facteurs s'est révélée significative pour l'horizon de surface (tableau 17), l'environnement considéré dans l'analyse RLQ de cet horizon est constitué de cette interaction.

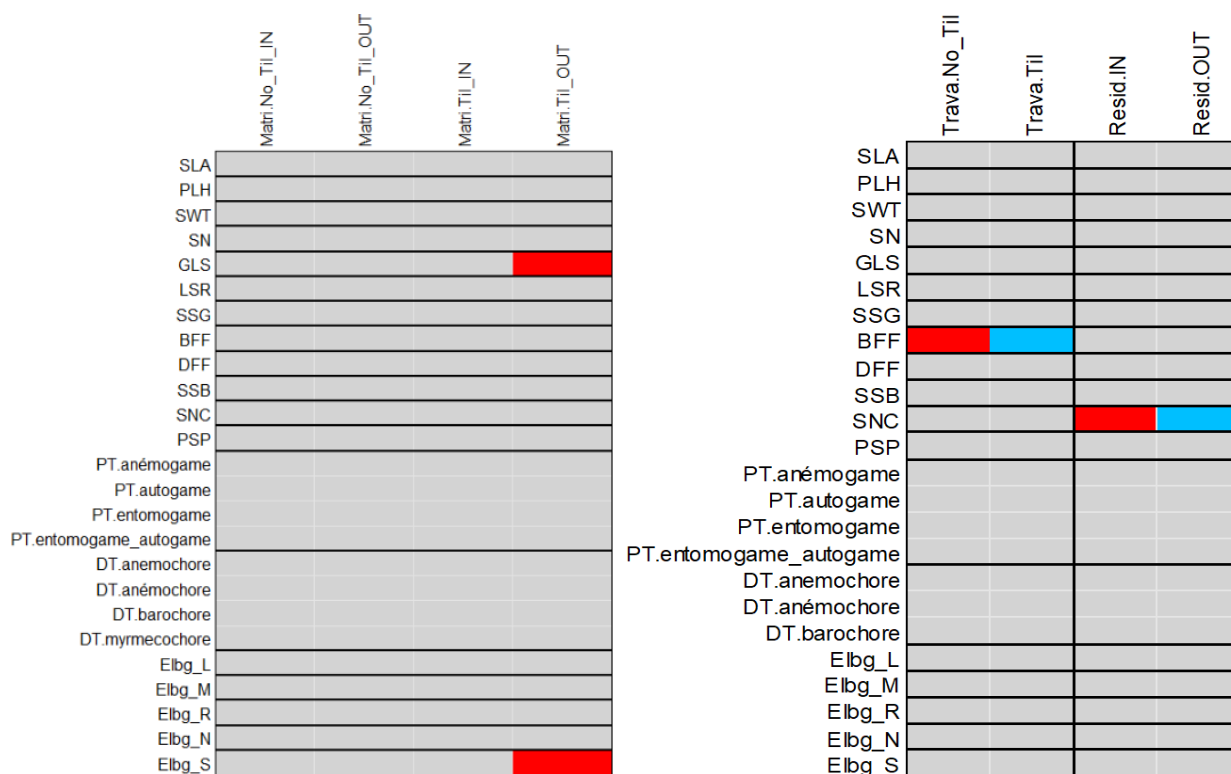


Figure 61 : Analyse RLQ sur le stock semencier en considérant les échantillons reprenant les 10 premiers centimètres du sol (gauche) et l'horizon en profondeur entre 10 et 25 cm (droite) pour le projet SOLRESIDU. Les relations significatives positives sont en rouge, les significatives négatives en bleus et les non significatives en gris.

VI. Discussion

VI.1. Critique de l'échantillonnage

Concernant le stock semencier, seuls 60% des espèces ont été recensés (tableau 14). L'effort d'échantillonnage n'est pas la seule cause de ce faible pourcentage. Le recensement des espèces du stock semencier s'étant arrêté le 24 juin, une partie des espèces germant préférentiellement en été n'a pas pu être identifiée. En effet, la méthode d'émergence a tendance à sous-évaluer le stock semencier car il se peut que certaines dormances ne soient pas levées dans le délai de l'expérience (Guo et al. 1998).

Au niveau de la flore exprimée, l'effort d'échantillonnage du premier comptage du projet EcoFoodSystem s'est avéré être insuffisant. Bien que l'estimateur Chao 1 révèle un faible nombre d'espèces manquées pour les rotations « phyto » et « vegan », seuls 57,14% des espèces ont potentiellement été échantillonnées sur l'ensemble du comptage (tableau 2).

Le deuxième comptage s'est quant à lui avéré plus représentatif de la richesse réelle. Alors que le nombre d'espèces échantillonnées est le même qu'au premier comptage, selon l'estimateur, 88,88% des espèces auraient été recensées. Ce phénomène pourrait notamment être dû au nombre plus important d'espèces représentées par un seul individu lors du premier comptage, ce qui surestime l'estimateur Chao 1 (équation 1).

Concernant le stock semencier du projet SOLRESIDU, moins de la moitié des espèces auraient été recensées. Les raisons de ce faible pourcentage semblent être les mêmes que pour le stock semencier du projet EcoFoodSystem, évoquées précédemment.

Au niveau de la flore exprimée, le premier comptage a permis de recenser 14 espèces sur les 16 estimées par Chao 1, soit une performance de 87,50% d'espèces échantillonnées (tableau 8). Deux stratégies de culture sont moins bien représentées (Til_IN et No_Til_OUT). Cependant, à l'échelle du projet, l'effort d'échantillonnage peut être considéré comme suffisant.

Le comptage à floraison de la culture s'est avéré plus représentatif que le premier. Bien que le pourcentage d'espèces échantillonnées de 80% soit plus faible que lors du premier comptage, les stratégies de culture sont mieux représentées avec un minimum de 70% d'espèces recensées. Les courbes de raréfaction atteignent toutes un palier, traduisant un effort d'échantillonnage satisfaisant. De la même manière que pour le projet EcoFoodSystem, la différence entre le premier et le deuxième comptage serait principalement causée par le nombre d'espèces représentées par un seul individu. Ce nombre, étant généralement plus élevé lors du premier comptage, induit un indice de Chao 1 plus élevé.

VI.2. Effet des rotations

VI.2.1. Impact de la culture précédente (EcoFoodSystem, T2)

L'analyse du stock semencier a permis d'identifier des différences notables de la flore adventice entre les rotations de la temporalité 2 et de ce fait, entre les précédents de culture. Les indices de richesse en espèces, de Shannon, d'équitabilité et d'abondance varient de la même manière au sein des rotations (figure 50 et 51). L'absence de différence aux niveaux des indices de biodiversité entre la rotation « phyto » et « référence » est probablement due à la jeunesse du projet. Etant donné que l'expérience n'a commencé qu'en 2020-2021, l'effet du désherbage chimique ne se fait probablement pas encore ressentir au niveau du stock semencier. Ces deux rotations ayant été cultivées avec la même culture (betterave) la première année, les caractéristiques de la flore adventices se veulent être impactées de la même manière. Les valeurs intermédiaires des indices de biodiversité sont associées à la rotation agroécologique, laquelle a été cultivée avec une culture de maïs la première année. Le maïs étant une culture à inter-rang élevé (plus élevé que la betterave), son niveau de compétition avec les adventices est moins important, ce qui permet un niveau d'infestation plus grand. Cet élément peut être en partie à l'origine de la différence des indices de biodiversité avec la rotation de référence. La rotation « vegan » quant à elle, cultivée avec de la caméline la première année, montre des valeurs systématiquement plus élevées des indices. En effet, la caméline est une culture agronomiquement peu exigeante (besoin de peu de nutriment) et dispose de racines pivotantes lui permettant d'aller chercher les nutriments en profondeur (Berti et al., 2016). La caméline a donc laissé derrière elle un sol riche (particulièrement en surface) en éléments nutritifs propices au bon développement des adventices.

L'analyse des traits fonctionnels révèle une relation significativement positive entre la rotation « phyto » et l'indice d'Ellenberg_L, signifiant un développement préférentiel des espèces ayant besoin de beaucoup de lumière (figure 54). Le niveau plus faible d'infestation dans la rotation « phyto » pourrait induire un taux de recouvrement du sol moins important laissant pénétrer davantage de lumière ce qui aurait pour conséquence de favoriser les espèces héliophiles. Cependant, la rotation « référence » ayant des indices de biodiversité similaires à la rotation « phyto » devrait théoriquement observer la même relation. Un dernier élément à prendre en considération est la méthode même de l'expérience. En effet, les adventices ont germé dans des bacs de culture où le taux de recouvrement du sol était nul favorisant par conséquent les espèces héliophiles.

Lors du premier comptage de l'essai EcoFoodSystem, l'influence de la culture précédente n'est pas vraiment perceptible. Seule l'abondance en adventices s'est révélée être significativement différente avec une faible densité pour la rotation de référence, une densité intermédiaire pour la rotation

« phyto » et « agroécologique » et une densité élevée pour la « vegan » (tableau 3 et figure 16). Deux éléments peuvent expliquer ce résultat. Premièrement, la non-exhaustivité de l'échantillonnage n'est pas à négliger, avec près de la moitié des espèces potentiellement non recensées (tableau 2). Deuxièmement, la temporalité 2 est soumise à un effet important du bloc (figure 17). En effet, avant la mise en place du projet EcoFoodSystem, les blocs 2 et 3 reposaient sur le même champ agricole ce qui explique leurs similitudes au niveau de la flore adventice (figure 2). Il est à noter que l'effet du facteur bloc présent sur l'essai EcoFoodSystem a été constaté dans une précédente étude (Decruyenaere, 2021). Les blocs 1 et 2 se trouvaient anciennement dans des parcelles agricoles distinctes. Il est par conséquent possible de distinguer trois communautés d'adventices sur la PCoA (figure 17). Cette différence inter-blocs peut également expliquer en partie le manque de différence intra-bloc sensé être exprimé par l'impact des rotations.

L'impact de la culture précédente semble se révéler plus tard dans la saison culturale. Le comptage à floraison de la culture révèle un impact relativement similaire entre les rotations « agro » et « référence » sur les indices de biodiversité (figures 20, 21, 22 et 23). Cette similitude peut être expliquée par le fait que les précédents de cultures (betterave et maïs) disposent (à l'inverse de la cameline) d'un inter-rang élevé ce qui induit un niveau relativement similaire de compétition avec les adventices. La rotation « phyto » révèle les valeurs systématiquement les plus basses des indices de biodiversité. Ce résultat est principalement causé par le désherbage chimique propre à cette rotation. Les produits phytosanitaires utilisés en lutte contre les adventices provoquent une forte réduction de la biodiversité se traduisant par une baisse de la richesse spécifique et de l'abondance des taxons (Benton et al., 2003). Le désherbage chimique a notamment engendré une nette diminution de la densité de *Chenopodium album* et *Polygonum aviculare* en comparaison avec la rotation « référence » (figure 19). La rotation « vegan » disposant d'un précédent de cameline est associée aux valeurs systématiquement les plus hautes des indices de biodiversité. Ce résultat correspond à celui observé avec le stock semencier et peut être expliqué également par le caractère peu exigeant de la cameline au niveau de ses besoins en nutriments.

Concernant l'évaluation de la biomasse, les rotations « référence », « phyto » et « agroécologique » ne sont pas marquées par une différence significative de la biomasse du froment (figure 25). Pourtant, étant donné une abondance en adventices moins élevée pour la rotation « phyto » induisant une compétition moins importante pour les ressources (figure 23), la biomasse de la culture devrait être plus élevée que celle de la rotation « référence » et « agroécologique ». Cette abondance en adventices plus importante présente dans les rotations « référence » et « agroécologique » est compensée par une richesse en espèce et une diversité de Shannon plus élevées (figure 20 et 21). En effet, la biomasse de la culture est significativement corrélée à ces indices confirmant qu'une plus grande diversité fonctionnelle permet une réduction des « traits d'effet » compétitifs qui ont un impact négatif sur le rendement des cultures (Navas, 2012; Adeux et al., 2019). Le niveau de biomasse observé dans la rotation « vegan » correspond aux caractéristiques de son précédent de culture évoquées précédemment. Le sol, étant laissé plus riche en surface par la cameline, a potentiellement permis le bon développement des adventices mais également du froment. En effet, ce dernier puise ses nutriments (notamment l'azote) dans les reliquats de la culture précédente présents dans les couches supérieures du sol (Livre Blanc, n.d). Ces éléments expliquent que cette rotation dispose de manière assez contre intuitive du niveau le plus élevé de biomasse en adventices et en froment.

L'analyse des traits fonctionnels montre que les rotations ne constituent pas un environnement favorable à un trait en particulier (figure 33). Ce résultat témoigne de la diversité fonctionnelle que procure une succession de culture diversifiée (figure 24). A l'inverse, les successions culturales simplifiées et la monoculture, en raison de la stabilité des cycles culturaux, favorisent le développement

d'espèces spécialistes (Fried et al., 2011). Ces dernières sont plus difficiles à réguler avec les systèmes de désherbage alternatifs et par conséquent plus impactantes.

VI.2.2. Effet de la culture actuelle (EcoFoodSystem, T6)

Les parcelles en temporalité 6 ont toutes été cultivées avec du colza la première année de l'expérience. L'analyse du stock semencier révèle pourtant des différences au niveau de la richesse en espèces et de l'abondance en adventices (figure 52). Les valeurs basses de ces indices associées à la rotation « phyto » peuvent être expliquées par le désherbage chimique qui est particulièrement impactant en termes de richesse des taxons et d'abondance (Benton et al., 2003). Quant aux différences entre les trois autres rotations qui ont la même méthode de désherbage (mécanique), elles peuvent être en lien avec plusieurs éléments. Le premier est la non-exhaustivité de l'échantillonnage avec près de 40% d'espèces potentiellement non recensées (tableau 14). Ensuite, l'effet du bloc est particulièrement marqué au niveau de la temporalité 6, ce qui peut influencer les différences intra-bloc et de ce fait les rotations (figure 53).

L'analyse des traits ne révèle pas de différence significative des traits propres aux rotations. Bien qu'une corrélation positive soit observable entre le trait « SLA » et la rotation de référence, il s'avère difficilement concevable que ce trait soit spécifique à cette rotation. Le manque d'exhaustivité de l'échantillonnage ainsi que la jeunesse du projet sont à mettre en avant pour expliquer ce résultat.

Le premier comptage révèle une influence des rotations sur les indices de biodiversité venant principalement de la rotation « phyto » qui présente les valeurs les plus faibles certainement associées à la méthode de désherbage (figure 13, 14, 15 et 16). Les trois autres rotations sont identiques au regard de la richesse en espèces et de l'abondance, ce qui est probablement dû à la similitude du précédent de culture (colza) mais également à l'impact de la rotation « phyto » qui, par son désherbage chimique, marque une différence trop importante masquant potentiellement les différences significatives entre les autres rotations. Une différence pourrait être attendue au niveau de la rotation « vegan » qui est la seule cultivée avec du froment pur et non en association froment-pois. La différence de densité de semis et l'absence de légumineuse ne semble pas avoir impacté de façon claire cette rotation. Le froment étant particulièrement compétitif dans son utilisation de l'azote minéral, pousse la légumineuse (pois) à fixer plus d'azote atmosphérique pour subvenir à ses besoins, ce qui freine en théorie le développement des adventices par manque de ressources azotées (Vallavieille-Pope et al., 2006). Par conséquent, les différences peuvent être expliquées par la non-exhaustivité de l'échantillonnage. Il est à noter que pour la temporalité 6, l'effet du bloc est moins marqué au niveau du premier comptage (figure 17), ce qui empêche de l'associer de façon évidente à l'analyse.

Les indices de biodiversité calculés sur base du deuxième comptage montrent tous une attitude similaire au regard des rotations. La seule différence observable réside dans le mode de désherbage et non dans la culture actuelle (figure 20, 21, 22, 23). Le même raisonnement est transposable sur les résultats concernant le relevé de la biomasse de la culture et des adventices. En effet, la biomasse en adventices s'avère être moins importante avec un désherbage chimique alors qu'elle est identique dans les rotations en désherbage mécanique. De la même manière, une biomasse plus importante du pois et de la culture totale (froment + pois) est observée avec un désherbage chimique. Ce résultat est propre à ce mode de désherbage qui réduit drastiquement le niveau de compétition des adventices permettant de meilleures performances pour la culture (figure 31). La biomasse en adventices peut également être influencée par l'effet du bloc. Le bloc 2 comporte notamment une communauté d'adventice qui lui est propre et est notamment composé de *Rumex obtusifolius* L., qu'on ne retrouve nulle part ailleurs dans l'échantillonnage (figure 32). La biomasse de la culture révèle être également impactée par la diversité (Shannon et Simpson) et la richesse en espèce. Cependant, alors qu'en temporalité 2 la biomasse du

froment augmente avec la diversité et la richesse (figure 28), la temporalité 6 montre une tendance inversée avec le pois (figure 30). De plus, il s'avère que les deux temporalités ont un niveau de diversité et de richesse correspondant aux mêmes ordres de grandeur. Ce constat trouve son explication dans la différence de répartition de la biomasse en adventices au sein des temporalités. Alors que la temporalité 2 exprime un nombre d'espèces et une diversité relativement semblables à la temporalité 6, la biomasse en adventices y est de plus, équitablement répartie (figure 24). A l'inverse, la temporalité 6 voit sa biomasse en adventices être dominée par *Papaver rhoeas* représentant 57,74% de la biomasse totale en adventices. La diversité, au regard de la biomasse, est par conséquent plus faible en temporalité 6. Concernant l'analyse des traits, les rotations ne semblent pas constituer des environnements favorables à des traits spécifiques (figure 33). En effet, les rotations diversifiées ont tendance à favoriser les espèces généralistes au détriment des espèces spécialistes (Fried et al., 2011). De plus, il faut souligner que pour cette temporalité, les successions de culture ont été presque identiques entre les rotations (colza, froment-pois) ce qui favorise les similitudes de la flore adventice.

Au niveau des espèces présentes, la densité en *Papaver rhoeas* et *Viola arvensis* est plus importante qu'en temporalité 2. Les cultures de la temporalité 6, semées plus tôt (annexe 8), ont fourni une plage de germination plus importante pour ces adventices émergents principalement entre septembre et décembre. *Papaver rhoeas* est une espèce persistante dans le sol avec un taux annuel de décroissance estimé entre 35 et 55% et produisant un nombre élevé de graines (entre 20000 et 130000 graines par plante) (Arvalis, n.d). De ce fait, le labour ne constitue pas un levier suffisamment impactant pour épuiser la viabilité des graines formant le stock. Le traitement chimique reste néanmoins une technique efficace, en témoigne la densité observée de cette espèce au sein de la rotation phyto (figure 24).

VI.3. Effet du travail du sol et de la gestion des résidus de culture

L'étude du stock semencier exprime une communauté d'adventices très spécifique composée principalement de *Matricaria chamomilla* (MATCH) et *Alopecurus myosuroides* (ALOMY). Cette dernière, bien que majoritairement présente, est bien moins représentée qu'au sein de la flore exprimée (figures 42 et 56). Ce constat peut s'expliquer par les conditions du laboratoire. Pour une tension élevée du sol (sol sec), le taux de germination d'*Alopecurus myosuroides* diminue avec la température alors que ce n'est pas le cas pour *Matricaria chamomilla* (Lonchamp et al., 1983). Il est donc possible que sa présence ait été sous-estimée en raison d'un manque d'approvisionnement en eau et d'une température trop élevée au sein du laboratoire. L'horizon de surface (0-10cm), a permis de constater une interaction entre les deux facteurs fixes (type de travail du sol et type de gestion des résidus) sur les indices de biodiversité (tableau 17). La richesse en espèces, la diversité de Shannon et l'équitabilité de Piélou ont réagi de la même manière en fonction des stratégies de culture (figure 57), alors que l'abondance ne varie significativement qu'avec le travail du sol (figure 58). Plusieurs éléments peuvent expliquer ces tendances. L'absence d'inversion du sol en labour réduit favorise les chances de germination des graines nouvellement tombées à la surface du sol permettant un niveau d'infestation plus important (Froud-Williams, 1988 ; Cardina et al., 1991 ; Spandl et al., 1999). De plus, l'incorporation des résidus de culture permet d'augmenter la teneur en matière organique et d'améliorer la structure du sol ainsi que la disponibilité des principaux nutriments favorisant le développement en adventices (Blevins & Frye, 1993 ; Mazzoncini et al., 2000). L'impact des facteurs se ressent également sur la diversité fonctionnelle des communautés (figure 61). Les parcelles en labour conventionnel avec exportation des résidus (Til_OUT) correspondent à la modalité la plus contraignante au développement des adventices. Les adventices s'y développant sont soumises à un niveau de stress et de compétition élevé ce qui se traduit par une corrélation significativement positive avec le trait « GLS » (figure 61). Les

valeurs les plus hautes de ce trait voyagent entre 4 et 5, correspondant à des espèces tolérant un niveau de compétition élevé. Une corrélation significativement positive est également présente entre l'indice de salinité d'Ellenberg « Elbg_S » et cette même stratégie de culture (No_Til_OUT). Cette relation indique la présence significative d'espèces capables de persister en présence de sel (Elbg = 1). Il est à noter que seules *Chenopodium album* L. (CHEAL) et *Atriplex patula* L. (ATXHA) appuient cette relation. Ce trait peut de ce fait être considéré comme peu représentatif de la stratégie de culture au vu de la faible représentation des espèces concernées dans l'échantillonnage (figure 56). Néanmoins, la teneur en sel peut augmenter avec la remontée de la nappe phréatique causée lors d'un déficit hydrique (Shahid et al., 2018). Ce phénomène peut être accentué par la faible teneur en matière organique (export des résidus) et le labour qui tous deux ont tendance à assécher le sol favorisant la remontée de la nappe. Dans l'horizon en profondeur, l'analyse des traits permet d'identifier une relation significative (positive et négative) entre la gestion des résidus et le trait « SNC » (*sol nutrient condition*). Ces relations reflètent l'intérêt de l'incorporation des résidus de culture qui, par ses diverses propriétés évoquées précédemment (Blevins & Frye, 1993 ; Mazzoncini et al., 2000) favorisent le développement des espèces favorables à une teneur élevée en éléments nutritifs.

Au niveau de la flore adventice exprimée en champ, aucune interaction entre la gestion des résidus et le travail du sol n'a été identifiée sur la variation des indices de biodiversité. En revanche, ces facteurs se sont révélés être impactants indépendamment les uns des autres (tableau 9 et 11). Le travail réduit du sol a permis une augmentation de la richesse en espèces et de l'abondance en adventices lors des deux comptages ainsi qu'une augmentation de la diversité de Shannon uniquement lors du comptage à floraison. Le labour est une pratique efficace dans la gestion des adventices et particulièrement à taux de décroissance élevé comme le Vulpin des champs (Lutman et al, 2013). Il s'avère être un levier agronomique permettant de diminuer la richesse, la diversité et l'abondance en adventices. Avec un désherbage suffisamment efficace, le niveau de salissement dans les parcelles sans inversion du sol devrait diminuer au fil du temps. En effet, en l'absence de ré-enfouissement des graines et donc de dormance secondaire, ces systèmes font l'objet d'un épuisement plus important du stock semencier en surface. Au sein de l'essai SOLRESIDU, mis en place depuis 2008, une réduction de la taille de la population d'adventices au sein des parcelles sans inversion devrait être observable dans le temps. Plusieurs éléments peuvent pourtant mettre à mal cette perspective. Le désherbage n'est pas systématiquement optimal, ce qui favorise la reconstitution du stock semencier en surface. De plus, étant donné la disposition en « carré latin », les infestations engendrées par la proximité des parcelles ne sont pas à négliger. En effet, les parcelles centrales (bloc 2 et 3) observent un niveau de salissement plus élevé car elles sont plus exposées aux infestations venant des parcelles voisines (figure 46). Le niveau de salissement est visible par cartographie à l'annexe 11 et confirme cette hypothèse.

L'incorporation des résidus de culture a également induit une augmentation de la richesse en espèces lors du premier comptage. L'incorporation des résidus permet d'améliorer le taux d'émergence des graines par les propriétés précédemment évoquées (Blevins & Frye, 1993 ; Mazzoncini et al., 2000) et peut expliquer le nombre plus élevé d'espèces. Cet impact tend néanmoins à s'estomper avec le désherbage car cette relation n'est plus observable lors du deuxième comptage. De plus, l'incorporation des résidus provoque aussi une relation significativement positive avec le trait « SNC ».

L'analyse des traits a été réalisée avec les données de biomasse lors du comptage à floraison de la culture révélant une biomasse importante des espèces se développant dans un environnement riche en nutriments (haute valeur de SNC). Cette relation est similaire au sein du stock semencier, ce qui signifie que les adventices disposant de ce trait fonctionnel atteignent un stade de développement suffisant pour approvisionner le stock semencier.

Au niveau des espèces présentes, *Alopecurus myosuroides* et *Matricaria chamomilla* sont présents en grande majorité, ce qui correspond au stock semencier. La forte présence de *Matricaria chamomilla* est notamment expliquée par sa capacité à germer toute l'année, sa production de graine (30000 à 100000 graines par plante) et la persistance de ses graines dans le sol (jusqu'à 20 ans) (Arvalis, n.d). La présence d'*Alopecurus myosuroides* peut être expliquée par la synchronie de son cycle de développement avec le froment d'hiver (Fried et al. 2009b). On notera également que par le passé, les parcelles ont été cultivées plusieurs années de suite avec du froment d'hiver favorisant la présence d'*Alopecurus myosuroides*. De plus, la possibilité que cette adventice ait développé une résistance aux herbicides chimiques est à envisager au vu de son niveau de densité malgré le désherbage (Menchari et al., 2006). Des graines ont été envoyées en laboratoire afin de confirmer cette dernière hypothèse.

En termes de biomasse de la culture et des adventices, le travail du sol est le seul facteur significativement impactant (tableau 13). La biomasse du froment est inversement corrélée à l'intensité de la compétition avec les adventices (Caussanel, 1989). En effet, la biomasse du froment s'avère être plus importante dans les parcelles cultivées en labour conventionnel car elles diminuent celle des adventices par compétition (figure 43). Cependant, l'augmentation de la biomasse du froment dans les parcelles labourées peut également venir du bienfait du labour sur les propriétés structurantes du sol (Belvins et al., 1973). L'impact des résidus de culture n'a pas été significatif, ce qui confirme certaines études qui signalent l'absence d'effet de cette pratique sur le rendement des cultures (Riley, 2014 ; Brennan et al., 2014). Cependant, un impact aurait pu être observé car l'incorporation des résidus a tendance à induire des rendements plus élevés en saison sèche (augmentation de la capacité de rétention en eau du sol) et plus faible par temps humide (effets sur les maladies) (Riley, 2014). Cette année peut être considérée comme relativement sèche au regard de la météo observée pendant le délai de l'expérience (figure 5). La biomasse en adventices quant à elle, diminue avec le labour mais aussi avec la diversité de Shannon et Simpson (figure 43 et 45). Bien que le labour constitue un levier agronomique plus impactant, la diversité reste un élément influençant significativement la biomasse en adventice. Dans cet essai, aucune relation significative entre la biomasse de la culture et la diversité en adventice n'est observée. L'absence de cette relation notamment dans les parcelles non labourées (où la diversité augmente) peut être expliquée par le désherbage essentiellement chimique qui a lieu depuis le début de l'essai. En effet, malgré une diversité supérieure dans les parcelles en labour réduit, elle n'est en réalité pas suffisante pour influencer significativement le rendement de la culture.

VII. Conclusion

En conclusion, la présente étude a permis d'établir la diversité floristique et le niveau d'infestation des différents itinéraires agricoles présents au sein des plateformes d'essais que sont EcoFoodSystem et SOLRESIDU. Elle a également permis d'évaluer l'influence des rotations et des stratégies de culture sur le développement de la flore adventice.

L'impact des rotations du projet EcoFoodSystem sur la flore adventice s'est principalement observé au niveau de l'effet des cultures précédentes. En revanche, la culture actuelle, mettant en opposition la culture de froment et de froment-pois, n'a pas révélé un niveau d'influence significatif mais a permis de confirmer l'efficacité d'un désherbage chimique. Pour l'instant, le projet dans son ensemble est victime de sa jeunesse. Cette étude se réalisant pendant la deuxième année du projet, la pleine influence des rotations innovantes n'a pas encore pu être exploitée. La succession de plusieurs cultures sera nécessaire afin de lisser l'impact encore fort présent des blocs. Bien que les cultures précédentes aient présenté des différences intéressantes, ces résultats peuvent être remis en question par rapport à l'exhaustivité de l'échantillonnage et l'effet des blocs. Une succession culturale diversifiée et

l'allongement des rotations limitent la spécialisation de la flore et permettent une composition diversifiée de la flore adventice (Petit et al., 2020). Néanmoins, malgré la jeunesse du projet, les rotations révèlent une diversité fonctionnelle suffisamment importante pour être en mesure d'influencer positivement la biomasse des cultures. Cette relation permet de confirmer qu'une diversité fonctionnelle suffisante permet de réduire les traits d'effets impactant le rendement (Navas, 2012 ; Adeux et al., 2019). La diversité des adventices pourrait donc être utilisée dans le but d'élaborer des systèmes de culture productifs et respectueux de l'environnement.

L'efficacité du levier agronomique que constitue le labour a pu être confirmé grâce au projet SOLRESIDU. Tant au niveau du stock semencier que de la flore exprimée, il s'est avéré significativement impactant en réduisant le développement en adventices. L'incorporation des résidus de culture permet quant à elle de favoriser le développement des adventices en améliorant la fertilité du sol et en favorisant l'incorporation des graines d'adventices dans le sol. Son influence s'est fait ressentir de manière plus significative au niveau de la flore potentielle que de la flore exprimée. Il est à noter que l'impact de ces deux leviers agronomiques a potentiellement été minimisé en raison de la contamination des parcelles, accentuée par leur proximité. Le recours répété au désherbage chimique proposé par ce projet a engendré le développement d'une flore spécifique. Cette flore se développe notamment par son mimétisme au cycle de développement de la culture. Les adventices présentant cette caractéristique peuvent s'avérer résistantes aux molécules actives utilisées lors du désherbage. Parmi ces espèces, on retrouve notamment *Alopecurus myosuroides* présent en grande proportion dans cet essai. L'intérêt d'une flore adventice diversifiée au regard des rendements de la culture n'a dès lors pas pu être observé probablement en raison d'une diversité trop faible engendrée par un désherbage chimique de longue durée.

En termes de perspectives, le recours à des outils cartographiques pourrait être envisagé afin d'étudier certaines espèces d'adventices. Les espèces vivaces et imposantes comme *Rumex obtusifolius* peuvent faire l'objet d'un recensement par photogrammétrie afin d'évaluer le développement spatio-temporel dans un milieu donné. En raison de la forte présence de *Rumex obtusifolius* L. au sein du bloc 2, un recensement de ce type a été réalisé à l'aide d'un drone (Mavic air 2) et est disponible à l'annexe 12. Bien que cette technique ne permette pas d'identifier les adventices se trouvant sous le couvert, elle permet néanmoins de recenser celle ayant pris le dessus sur la culture.

VIII. Annexe

Annexe 1 : Lexique des espèces rencontrées dans le cadre de ce travail.

CODE BAYER	NOM LATIN	NOM VERNACULAIRE
AETCY	Aethusa cynapium L.	Petite ciguë
ALOMY	Alopecurus myosuroides Hudson	Vulpin des champs
APESV	Apera spica venti L.	Agrotis jouet du vent
ATXHA	Atriplex patula L.	Arroche hastée
BEAVX	Beta vulgaris L.	Betterave
BELPE	Bellis perennis L.	Pâquerette
BRSNI	Brassica nigra L.	Moutarde noire
BRSNN	Brassica napus L.	Colza
CAPBP	Capsella bursa-pastoris L.	Capselle bourse à pasteur
CENCY	Cyanus segetum Hill	Bleuet
CHEAL	Chenopodium album L.	Chénopode blanc
CHEHY	chenopodium hybridum L.	Chénopode hybride
CIRAR	Cirsium arvense L.	Chardon
CMAMI	Camelina sativa L.	Cameline
EPIAD	Epilobium tetragonum L.	Epilobe à tige carre
EQUAR	Equisetum arvense L.	Prêle des champs
FUMOF	Fumaria officinalis L.	Fumeterre officinale
GALAP	Galium aparine L.	Gaillet gratteron
LAMPU	Lamium purpureum L.	Lamier pourpre
MATCH	Matricaria chamomilla L.	Matricaire camomille
MERAN	Mercurialis annua L.	Mercuriale annuelle
PAPRH	Papaver rhoeas L.	Coquelicot
PLAMA	Plantago major L.	Grand plantain
POAAN	Poa annua L.	Pâturin annuel
POATR	Poa trivialis L.	Paturin commun
POLAV	Polygonum aviculare L.	Renouée des oiseaux
POLCO	Fallopia convolvulus L.	Renouée faux liseron
RANAR	Ranunculus arvensis L.	Renoncule des champs
RAPRA	Raphanus raphanistrum L.	Ravenelle
RUMCR	Rumex crispus L.	Rumex crépu
RUMOB	Rumex obtusifolius L.	Rumex à feuilles obtuses
SENVU	Senecio vulgaris L.	Seneçon commun
SINAR	Sinapis arvensis L.	Moutarde des champs
SOLNI	Solanum nigrum L.	Morelle noire
SOLTU	Solanum tuberosum L.	Pomme de terre
SONAR	Sonchus arvensis L.	Laiteron des champs
SONAS	Sonchus asper L.	Laiteron maraicher
SONOL	Sonchus oleraceus L.	Laiteron rude
STEME	Stellaria media L.	Mouron des oiseaux
TAROF	Taraxacum officinale agg.	Pissenlit
VERAR	Veronica arvensis L.	Véronique des champs
VERHE	Veronica hederifolia L.	Véronique à feuilles lierre
VERPE	Veronica persica Poi.	Véronique de perse
VIOTR	Viola arvensis Murray.	Pensée des champs

Annexe 2 : Schéma du bloc 1 et 2 du projet EcoFoodSystem.



Annexe 3 : Schéma du bloc 3 et 4 du projet EcoFoodSystem



Annexe 4 : Tableau récapitulatif des moyennes des indices de biodiversité et de la biomasse de la flore exprimée du projet EcoFoodSystem.

		1er comptage			
		Rotation	Temporalité 2		Temporalité 6
Richesse	Référence	2,65 ± 1,5	-	3,95 ± 1,54	b
	Phyto	2,35 ± 1,46	-	1,9 ± 1,17	a
	Agro	3,05 ± 1,7	-	3,55 ± 1,32	b
	Vegan	3,2 ± 1,85	-	3,45 ± 1,05	b
Shannon	Référence	0,670 ± 0,536	-	0,902 ± 0,417	c
	Phyto	0,615 ± 0,483	-	0,459 ± 0,471	a
	Agro	0,743 ± 0,555	-	0,643 ± 0,354	ab
	Vegan	0,702 ± 0,532	-	0,753 ± 0,370	bc
Simpson	Référence	0,381 ± 0,286	-	0,479 ± 0,201	b
	Phyto	0,466 ± 0,304	-	0,331 ± 0,312	a
	Agro	0,41 ± 0,292	-	0,352 ± 0,201	ab
	Vegan	0,379 ± 0,279	-	0,414 ± 0,225	ab
Equitabilité	Référence	0,580 ± 0,405	-	0,666 ± 0,181	b
	Phyto	0,582 ± 0,42	-	0,480 ± 0,455	a
	Agro	0,586 ± 0,398	-	0,531 ± 0,236	ab
	Vegan	0,548 ± 0,370	-	0,628 ± 0,282	ab
Abondance	Référence	32,4 ± 26,4	a	96,2 ± 50	b
	Phyto	39,2 ± 47,7	ab	15,6 ± 18,1	a
	Agro	47,4 ± 65,9	ab	147 ± 98,6	b
	Vegan	77,2 ± 90,5	b	115 ± 94,1	b
		2ème comptage			
Richesse	Référence	2,8 ± 1,51	b	4.7 ± 1.75	b
	Phyto	1,4 ± 1,05	a	2.3 ± 1.3	a
	Agro	3,15 ± 1,87	b	4.6 ± 1.23	b
	Vegan	4,6 ± 1,23	c	4.55 ± 1.73	b
Shannon	Référence	0,731 ± 0,440	b	1.23 ± 0.444	b
	Phyto	0,352 ± 0,380	a	0.650 ± 0.481	a
	Agro	0,904 ± 0,531	bc	1.29 ± 0.307	b
	Vegan	1,19 ± 0,306	c	1.22 ± 0.467	b
Simpson	Référence	0,472 ± 0,247	-	0.627 ± 0.172	-
	Phyto	0,479 ± 0,369	-	0.488 ± 0.301	-
	Agro	0,648 ± 0,224	-	0.669 ± 0.117	-
	Vegan	0,612 ± 0,138	-	0.620 ± 0.206	-
Equitabilité	Référence	0,659 ± 0,356	ab	0.825 ± 0.106	b
	Phyto	0,435 ± 0,452	a	0.605 ± 0.415	a
	Agro	0,713 ± 0,342	b	0.868 ± 0.107	b
	Vegan	0,797 ± 0,148	b	0.799 ± 0.214	ab
Abondance	Référence	34,2 ± 28,7	ab	63.4 ± 28.6	b
	Phyto	11,4 9,11	a	26.8 ± 17.1	a
	Agro	37 ± 31,1	ab	63.2 ± 40.2	b
	Vegan	75,2 ± 48,7	b	65.4 ± 35.6	b
		Biomasse			
Equitabilité	Référence	0.646 ± 0.398	a	0.611 ± 0.257	-
	Phyto	0.403 ± 0.444	ab	0.498 ± 0.415	-
	Agro	0.703 ± 0.341	b	0.539 ± 0.269	-
	Vegan	0.774 ± 0.188	b	0.598 ± 0.258	-
Biomasse Adventice	Référence	13,5 ± 7,01	bc	69,9 ± 44,6	b
	Phyto	5,86 ± 7,41	a	17,2 ± 31,6	a
	Agro	14,6 ± 12,4	b	77,2 ± 56,1	b
	Vegan	27,7 ± 20,8	c	88,3 ± 83,1	b
Biomasse Froment	Référence	419 ± 121	a	510 ± 139	a
	Phyto	487 ± 141	a	554 ± 152	a
	Agro	477 ± 83,9	a	503 ± 164	a
	Vegan	648 ± 123	b	/	/
Biomasse Pois	Référence	/	/	206 ± 108	ab

	Phyto	/	/	264 ± 120	b
	Agro	/	/	170 ± 79,4	a
	Vegan	/	/	/	/
Biomasse culture	Référence	419 ± 121	a	716 ± 153	ab
	Phyto	487 ± 141	a	818 ± 76,4	b
	Agro	477 ± 83,9	a	673 ± 162	a
	Vegan	648 ± 123	b	635 ± 212	a

Annexe 5 : Tableau récapitulatif des moyennes des indices de biodiversité et de la biomasse de la flore exprimée du projet SolRésidu.

1er comptage						
	Travail du Sol			Gestion des résidus		
	Richesse	Til	2.28 ± 1.11	a	IN	3.25 ± 1.46
	No_Til	3.68 ± 1.38	b	OUT	2.7 ± 1.36	a
Shannon	Til	0.460 ± 0.365	-	IN	0.535 ± 0.370	-
	No_Til	0.602 ± 0.385	-	OUT	0.527 ± 0.394	-
Simpson	Til	0.322 ± 0.266	-	IN	0.320 ± 0.24	-
	No_Til	0.328 ± 0.224	-	OUT	0.330 ± 0.252	-
Equitabilité	Til	0.466 ± 0.263	-	IN	0.451 ± 0.281	-
	No_Til	0.479 ± 0.358	-	OUT	0.493 ± 0.343	-
Abondance	Til	75.7 ± 69.4	a	IN	229 ± 207	-
	No_Til	348 ± 208	b	OUT	195 ± 207	-
2ème comptage						
Richesse	Til	2.02 ± 1.07	a	IN	2.85 ± 1.17	-
	No_Til	3.45 ± 0.783	b	OUT	2.62 ± 1.19	-
Shannon	Til	0.426 ± 0.382	a	IN	0.501 ± 0.358	-
	No_Til	0.629 ± 0.364	b	OUT	0.555 ± 0.413	-
Simpson	Til	0.353 ± 0.308	-	IN	0.302 ± 0.242	-
	No_Til	0.340 ± 0.222	-	OUT	0.391 ± 0.286	-
Equitabilité	Til	0.465 ± 0.378	-	IN	0.464 ± 0.317	-
	No_Til	0.524 ± 0.288	-	OUT	0.525 ± 0.354	-
Abondance	Til	70.7 ± 69.6	a	IN	184 ± 177	-
	No_Til	273 ± 171	b	OUT	160 ± 153	-
Biomasse						
Equitabilité	Til	0.454 ± 0.382	-	IN	0.456 ± 0.317	-
	No_Til	0.524 ± 0.288	-	OUT	0.522 ± 0.359	-
Biomasse Froment	Til	769 ± 115	a	IN	730 ± 116	-
	No_Til	709 ± 111	b	OUT	748 ± 117	-
Biomasse adventices	Til	49.3 ± 51.6	a	IN	79.2 ± 64.3	-
	No_Til	96.8 ± 63.8	b	OUT	66.9 ± 60.6	-

Annexe 6 : Tableau récapitulatif des moyennes des indices de biodiversité du stock semencier EcoFoodSystem.

Stock semencier EcoFoodSystem					
	Rotation	Temp 2		Temp 6	
	Richesse	Référence	2.1 ± 1.62	a	5.15 ± 1.95
Phyto		2 ± 1.45	a	3.55 ± 1.93	a
Agro		2.09 ± 2.07	ab	4.55 ± 1.39	ab
Vegan		3.8 ± 1.44	b	4.65 ± 1.60	ab
Shannon	Référence	0.553 ± 0.514	a	1.32 ± 0.485	-
	Phyto	0.552 ± 0.580	a	1.01 ± 0.580	-
	Agro	0.745 ± 0.61	ab	1.20 ± 0.315	-

Simpson	Vegan	1.06 ± 0.444	b	1.23 ± 0.414	-
	Référence	0.523 ± 0.340	-	0.649 ± 0.194	-
	Phyto	0.429 ± 0.359	-	0.548 ± 0.266	-
	Agro	0.504 ± 0.318	-	0.618 ± 0.131	-
Equitabilité	Vegan	0.573 ± 0.210	-	0.630 ± 0.185	-
	Référence	0.509 ± 0.435	a	0.810 ± 0.229	-
	Phyto	0.532 ± 0.494	a	0.786 ± 0.344	-
	Agro	0.591 ± 0.407	ab	0.810 ± 0.123	-
Abondance	Vegan	0.798 ± 0.238	b	0.809 ± 0.229	-
	Référence	788 ± 822	a	2554 ± 1848	ab
	Phyto	382 ± 265	a	1297 ± 758	a
	Agro	1178 ± 1369	ab	2093 ± 775	ab
	Vegan	2005 ± 2023	b	2753 ± 2532	b

Annexe 7 : Tableau récapitulatif des moyennes des indices du stock semencier SOLRESIDU.

Stock 0 - 10						
Gestion						
Richesse	Til_OUT	1.05 ± 0.605	a			
	Til_IN	0.7 ± 0.801	a			
	No_Til_OUT	1.35 ± 0.875	ab			
	No_Til_IN	1.85 ± 0.875	b			
Shannon	Til_OUT	0.134 ± 0.275	a			
	Til_IN	0.083 ± 0.270	a			
	No_Til_OUT	0.211 ± 0.301	ab			
	No_Til_IN	0.444 ± 0.366	b			
Simpson	Til_OUT	0.245 ± 0.378	-			
	Til_IN	0.502 ± 0.489	-			
	No_Til_OUT	0.280 ± 0.359	-			
	No_Til_IN	0.334 ± 0.274	-			
Equitabilité	Til_OUT	0.193 ± 0.397	a			
	Til_IN	0.091 ± 0.280	a			
	No_Til_OUT	0.263 ± 0.366	ab			
	No_Til_IN	0.536 ± 0.430	b			
Abondance	Til_OUT	247 ± 234	a			
	Til_IN	191 ± 229	a			
	No_Til_OUT	1186 ± 1124	b			
	No_Til_IN	1138 ± 789	b			
Stock 10 - 25						
Richesse	Til	1 ± 0.751	-	IN	0.975 ± 0.733	-
	No_Til	1.02 ± 0.698	-	OUT	1.05 ± 0.714	-
Shannon	Til	0.156 ± 0.268	-	IN	0.114 ± 0.220	-
	No_Til	0.098 ± 0.197	-	OUT	0.140 ± 0.252	-
Simpson	Til	0.382 ± 0.424	-	IN	0.349 ± 0.430	-
	No_Til	0.286 ± 0.410	-	OUT	0.319 ± 0.408	-
Equitabilité	Til	0.226 ± 0.387	-	IN	0.165 ± 0.318	-
	No_Til	0.142 ± 0.284	-	OUT	0.202 ± 0.364	-
Abondance	Til	867 ± 1066	a	IN	617 ± 782	-
	No_Til	462 ± 550	b	OUT	712 ± 953	-

Annexe 8 : Tableau récapitulatif des opérations agricoles réalisées sur les parcelles du projet EcoFoodSystem.

	Temporalité 2			
Opération	Référence	Phyto	Agroécologique	Vegan
Culture	Froment d'hiver			
Labour et semis 15/12/21	15-12-21			
Fertilisation	31-03-22 (Azote liquide 39%K)			
Désherbage	/	26-04-22 (chimique)	/	/
Fertilisation	28-04-22 (Azote liquide 39%K)			
	Temporalité 6			
Culture	Froment-Pois			Froment d'hiver
Labour et semis	23-11-21			
Désherbage	/	24-11-21 (Chimique)	/	/
Fertilisation	25-04-22			31-03-22 & 28-04-22

Annexe 9 : Tableau détaillé des traits fonctionnels utilisés.

Traits fonctionnels	Unité	Interprétation	Base de données
Surface foliaire spécifique (SFS)	[mm ² mg ⁻¹]	La surface foliaire spécifique est un indicateur de la capacité de la plante à utiliser efficacement la lumière (Storkey 2005). Une valeur élevée montre une capacité à tolérer l'ombrage causé par la plante cultivé (Brainard et al., 2005 ; Storkey 2005)	Bàrberi et al., 2018
Hauteur de la plante (PLH)	[m]	La hauteur reproductive représente un indicateur de la capacité compétitive de l'adventice face à la culture (McDonald et al. 2010). Une valeur élevée met en	Bàrberi et al., 2018

		avant la capacité de l'adventice à surplomber l'espèce cultivée pour capter la lumière (McLachlan et al 1993)	
Poids des graines (SWT) [mg]	[mg]	Pour des valeurs élevée la masse des graines peut notamment indiquer une capacité à se développer malgré une compétition importante (Gardarin et al., 2010). Les valeurs faibles réfèrent à une capacité d'échapper à l'impact du travail du sol du fait du plus grand nombre de graines produite (Albrecht & Auerswald 2009).	Bàrberi et al., 2018
Nombre de graine par plante (SN)	[Nombre]	Le nombre de graine est conditionné par le compromis taille/nombre de graine. Un nombre élevé de graine entrainera des graines plus petites et un nombre réduit de graine entrainera des graine plus grande (Leishman 2001)	Leda
Grime's life strategy (GLS)	Compétitif (C)= 1 Tolérant au stress (S) = 2 Rudéral (R) = 3 CR = 4 CS = 5 SR = 6 CSR = 7	La théorie des stratégies CSR (Compétitives, Stress-tolérantes et Rudérales) est un modèle de stratégie des	Bàrberi et al., 2018

		<p>plantes énoncé par Grime en 1974. La compétitivité (C) des plantes consiste ici en une capacité à capter les ressources. Les individus tolérants au stress sont caractérisés par la spécialisation de certains traits dans l'exploitation de milieux non-productifs (S). Des perturbations sévères sélectionnent des espèces présentant des traits adaptés à l'exploitation temporaire des conditions favorables (R) (Grim, 1974).</p>	
<p>Life span x regeneration form (LSR)</p>	<p>1= Annuel 2 = Biennale 3 = Vivace stationnaire 4 = Vivace rampante (pousses aériennes, stolons) 5 = Vivace rampante (pousses plagiotropes souterraines, rhizomes) 6 = Vivace rampante (racines épaissies plagiotropes) 7 = Vivace rampante (co-présence de deux structures ou plus)</p>	<p>Ce trait vise à considérer la durée de vie et la régénération des structures végétatives survivantes après une perturbation (Klotz et al. 2002)</p>	<p>Bàrberi et al., 2018</p>
<p>Période de germination (SSG)</p>	<p>1 = automne 2 = Printemps 3 = été 4 = hiver</p>	<p>La période de germination des graines détermine la correspondance entre le cycle de vie des adventices et le cycle de croissance d'une culture. Elle peut déterminer sa capacité à échapper aux perturbations engendrées par les</p>	<p>Bàrberi et al., 2018</p>

		pratiques agricoles.	
Début de période de floraison (BFF)	Mois de l'année : 1 = Janvier . . . 12 = Décembre	La période de floraison détermine la correspondance entre le cycle de vie des espèces de mauvaises herbes et la période de croissance d'une culture, d'où sa capacité à échapper aux perturbations posées par les pratiques agricoles (Font, 2016)	Bàrberi et al., 2018
Durée de floraison (DFF)	Nombre de mois	"La durée de la période de floraison indique la durée de la phase de reproduction. L'élimination des graines de mauvaises herbes avant leur dissémination est une excellente stratégie empêchant les graines d'adventices d'alimenter la banque de graines (Font, 2016).	Bàrberi et al., 2018
Durée de vie de la banque de graine (SSB)	1 = Transitoire (les graines restent dans le sol pendant < 1 an) 2 = Court terme (les graines restent dans le sol entre 1 et 5 ans)	La banque de graines du sol a été classée en trois types fonctionnels en	Bàrberi et al., 2018

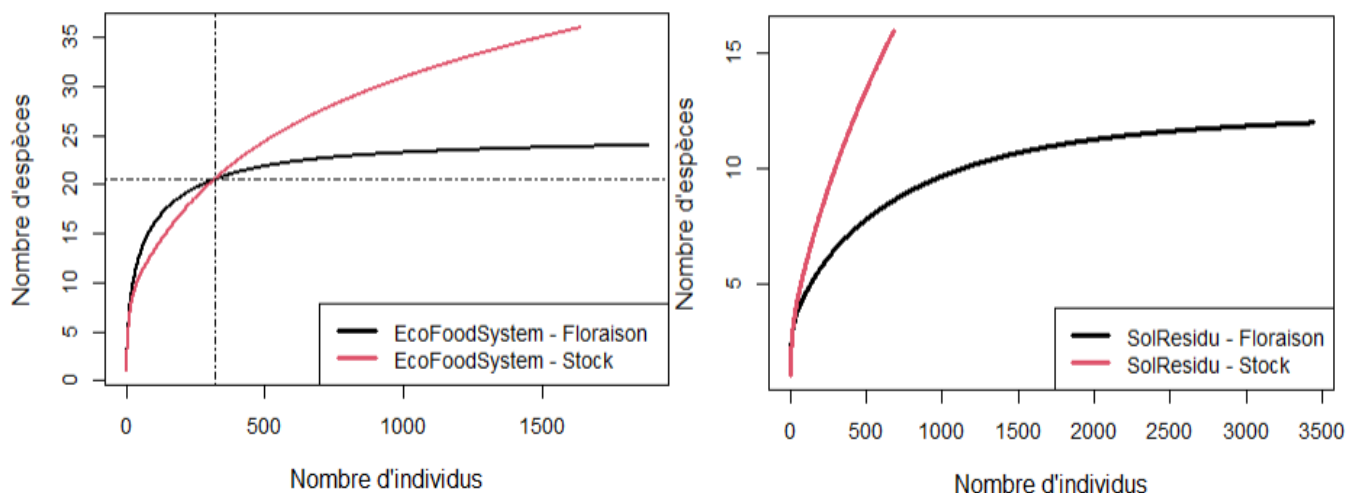
	3 = Long terme (les graines restent dans le sol pendant plus de 5 ans)	fonction de la persistance des graines des espèces dans le sol. Compte tenu de la variabilité de ce trait, l'importance relative de chaque type de banque de graines a été attribuée en fonction du nombre d'études soutenant chacune d'entre elles. Le pourcentage de références dans chaque catégorie par rapport au nombre total de références trouvées pour chaque espèce a été calculé. (Fitter & Peat (1994) ; Grime et al. (2007) ; Kleyer et al. (2008))	
Affinity to soil nutrient conditions (SNC)	1 = Sols oligotrophes qui contiennent de faibles quantités de nitrate ainsi que du phosphore et de la matière organique. 2 = Conditions intermédiaires. 3 = Sols pauvres en éléments nutritifs. 4 = Conditions intermédiaires. 5 = Sols avec humus, bien approvisionnés en éléments nutritifs. 6 = Conditions intermédiaires. 7 = Environnements avec de fortes concentrations d'éléments nutritifs du sol. 8 = Conditions intermédiaires 9 = Environnements à concentration excessive d'azote et de phosphore.	Les espèces sont classées en fonction de leur affinité avec les conditions nutritives du sol (N) selon Pignatti et al. (2005)	Bàrberi et al., 2018
Support of pollinators (PSP)	Oui = 1 ; Non = 2	Ce trait indique si oui ou non une espèce est capable de supporter des pollinisateurs	Bàrberi et al., 2018
Pollinisation (baseflor) (PT)	Entomogame_autogame : pollinisation par les insectes ou par ses l'individu lui-même		Baseflor

	<p>Entomogame : pollinisation par les insectes</p> <p>Anémogame : pollinisation par le vent</p> <p>Autogame : pollinisation par l'individu lui-même (ses propre gamètes)</p> <p>Anémogame_autogame : pollinisation</p>		
Dissemination (DT)	<p>Anemochore : dissémination par le vent</p> <p>Barochore : dissémination par gravité</p> <p>Myrmecochore : dissémination par les fourmis</p> <p>Autochore : dissémination assurée par l'individu</p> <p>Epizoochore : dissémination grâce au pelage des animaux</p>		Baseflor
Elbg_L	<ol style="list-style-type: none"> 1. Plantez à l'ombre profonde (sciaphile) 2. Entre 1 et 3 3. Plante d'ombre, généralement moins de 5 % d'éclairage relatif, rarement plus de 30 % d'éclairage lorsque les arbres sont en pleine feuille 4. Entre 3 et 5 5. Plante semi-ombragée, rarement en pleine lumière, mais généralement avec plus de 10% d'éclairement relatif lorsque les arbres sont en feuilles 6. Entre 5 et 7 7. Plantez généralement dans des endroits bien éclairés, mais aussisurvenant à mi-ombre 8. Plante aimant la lumière que l'on trouve rarement là où l'éclairement relatif en été est inférieur à 40% 9. Plantez en pleine lumière, surtout en plein soleil 	(Ellenberg et al., 1992) déjà dans la biblio	Ellenberg et al., 1992

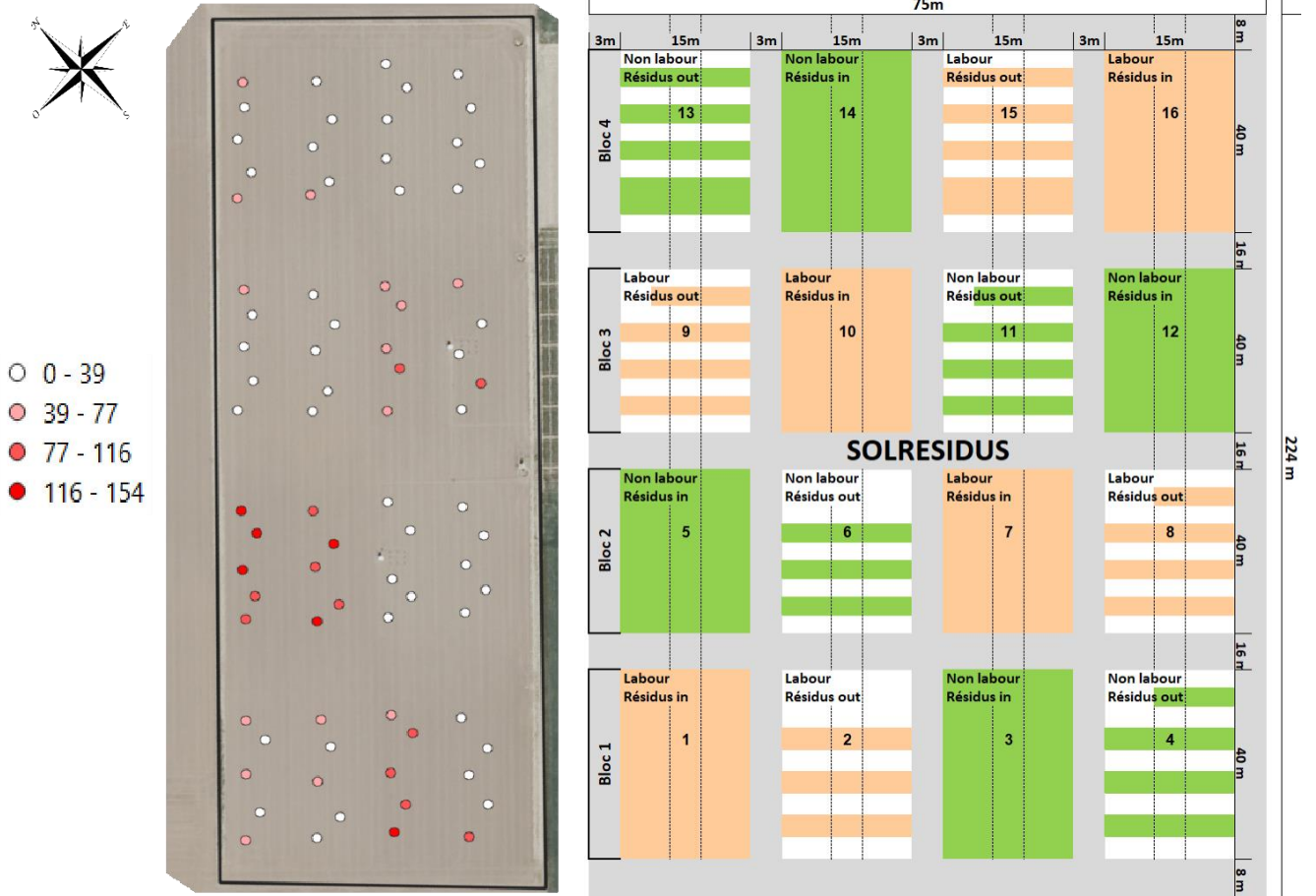
<p>Elbg_M</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Indicateur de sécheresse extrême, limité aux sols qui s'assèchent souvent pendant un certain temps 2. Entre 1 et 3 3. Indicateur de site sec, plus souvent trouvé sur un sol sec que dans des endroits humides 4. Entre 3 et 5 5. Indicateur de site humide, principalement sur des sols frais d'humidité moyenne 6. Entre 5 et 6 7. Indicateur d'humidité, principalement sur des sols constamment humides ou humides, mais pas sur des sols humides 8. Entre 7 et 9 9. Indicateur de site humide, souvent sur des sols saturés d'eau et mal aérés 10. Indicateur de sites en eau peu profonde qui peuvent manquer d'eau stagnante pendant de longues périodes 11. L'enracinement des plantes sous l'eau, mais au moins pour un temps exposé au-dessus, ou plante flottant dessus la surface. 12. Plante submergée, en permanence ou presque constamment sous l'eau 		<p>Ellenberg et al., 1992</p>
<p>Elbg_R</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Indicateur d'acidité extrême, jamais trouvé sur des sols faiblement acides ou basiques 2. Entre 1 et 3 3. Indicateur d'acidité, principalement sur des sols acides, mais exceptionnellement aussi sur des sols presque neutres 4. Entre 3 et 5 5. Indicateur de sols modérément acides, rencontré occasionnellement sur des sols très acides ou neutres à basiques 6. Entre 5 et 7 7. Indicateur de conditions faiblement acides à faiblement basiques ; jamais trouvé sur des sols très acides 8. Entre 7 et 9 9. Indicateur de réaction basique, toujours trouvé sur les sols calcaires ou autres sols à pH élevé 		<p>Ellenberg et al., 1992</p>

Elbg_N	<ol style="list-style-type: none"> 1. Indicateur de sites extrêmement infertiles 2. Entre 1 et 3 3. Indicateur de sites plus ou moins infertiles 4. Entre 3 et 5 5. Indicateur de sites de fertilité intermédiaire 6. Entre 5 et 7 7. Plante souvent trouvée dans des endroits richement fertiles 8. Entre 7 et 9 9. Indicateur de situations extrêmement riches, telles que les aires de repos du bétail ou à proximité de rivières polluées 		Ellenberg et al., 1992
Elbg_S	<ol style="list-style-type: none"> 0. Absent des sites salins 1. Espèce peu tolérante au sel, rare à occasionnelle sur les sols salins mais capable de persister en présence de sel 2. Espèces présentes à la fois dans des situations salines et non salines, pour lesquelles les habitats salins ne sont pas fortement prédominants 3. Espèce la plus commune dans les sites côtiers mais régulièrement présente en eau douce ou sur des sols non salins à l'intérieur des terres 4. Espèces des prés salés et des marais salés supérieurs, soumises à des inondations de marée au plus très occasionnelles 5. Espèces du bord supérieur des marais salants, là où elles ne sont pas inondées par toutes les marées 6. Espèces de marais salants de niveau moyen 7. Espèces de marais salants inférieurs 8. Espèces inondées plus ou moins en permanence dans l'eau de mer 9. Espèces de conditions extrêmement salines, dans des sites où l'eau de mer s'évapore, précipitant le sel 		

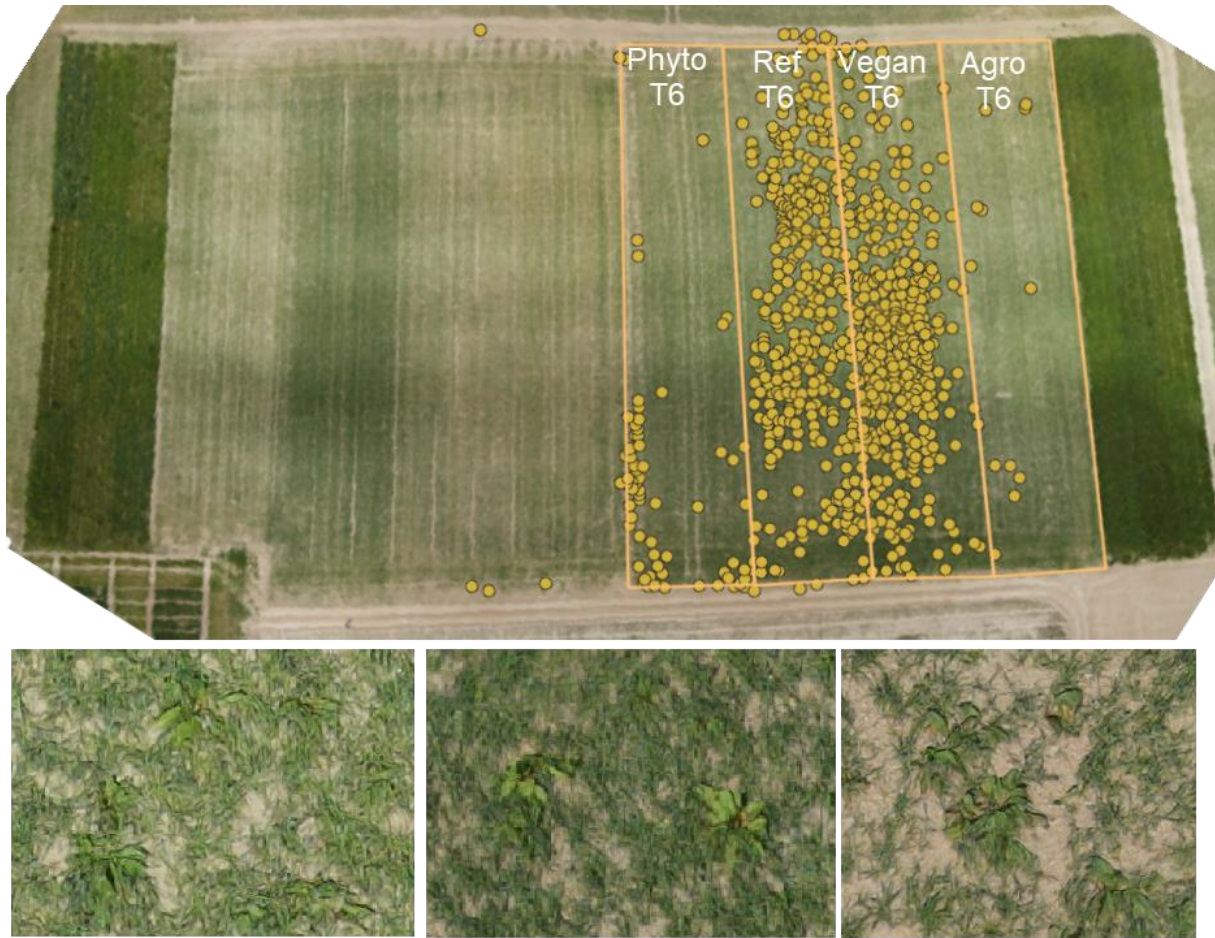
Annexe 10 : Graphiques présentant les courbes de raréfaction du stock semencier et du deuxième comptage pour le projet EcoFoodSystem (gauche) et SOLRESIDU (droite).



Annexe 11 : Représentation cartographique de la densité totale d'adventices recensées lors du deuxième comptage du projet SOLRESIDU.



Annexe 12 : Recensement par photogrammétrie des *Rumex obtusifolius* (surplombant le couvert) présent dans le bloc 2 du projet EcoFoodSystem (2^{ème} comptage). La densité évaluée par drone est de 0.14 *Rumex* par m² et la densité évaluée par quadrat est de 1 *Rumex* par m².



IX. Références

Adeux, G., Vieren, E., Carlesi, S., Bàrberi, P., Munier-Jolain, N., Cordeau, S., 2019. Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nature Sustainability*, 2(11), 1018-1026.

Albrecht, H., & Auerswald, K., 2009. Seed traits in arable weed seed banks and their relationship to land-use changes. *Basic and Applied Ecology*, 10(6), 516-524.

Alignier, A., Bretagnolle, V., & Petit., S., 2012. Spatial patterns of weeds along a gradient of landscape complexity. *Basic and Applied Ecology*, 13, 328-337.

Altieri, MA., 1989. Agroecology: a new research and development paradigm for world agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 27:37-46.

Altieri, MA., Rosset, P., 1995. Agroecology and the conversion of largescale conventional systems to sustainable management. *Int J Environ Stud*, 50:165-185.

Anderson, RL., 2007. Managing weeds with a dualistic approach of prevention and control. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 2, 13-18.

- Andreasen, C., Streibig, J.C., Haas, H., 1991. Soil properties affecting the distribution of 37 weed species in Danish fields. *Weed research*, 31, 181-187.
- Arias-Estevez, M., Lopez-Periago, E., Martinez-Carballo, E., 2008. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123, 247-260.
- Armengot, L., Berner, A., Blanco-Moreno, J.M. *et al.*, 2015. Long-term feasibility of reduced tillage in organic farming. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 339-346.
- Armengot, L., Blanco-moreno, J.M., Barberi *et al.*, 2016. Tillage as a driver of change in weed communities: a functional perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 222, 276-285.
- Arshad, M.A., Gill, K.S., & Coy, G.R., 1995. Barley, canola, and weed growth with decreasing tillage in a cold, semiarid climate. *Agronomy Journal*, 87, 49±55.
- Arvalis, n.d. Fiche adventice: le coquelicot (papaver rhoeas). Retrieved August 11, 2022, from <https://www.arvalis-infos.fr/fiche-adventice-le-coquelicot-papaver-rhoeas--@/view-8294-arvarticle.html>
- Ball, D.A., & MILLER, S.D., 1989. A comparison of techniques for estimation of arable soil seedbanks and their relationship to weed flora. *Weed Research*, 29:365-373
- Bàrberi, P., 2002, Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research*, 42, 177-193.
- 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.
- Barnes, J.P., & Putnam, A.R., 1983. Rye residues contribute weed suppression in no-tillage cropping systems. *Journal of Chemical Ecology* 9, 1045-1057.
- Barralis, G., Dessaint, F., & Chadoeuf, R., 1996. Relation flore potentielle - Flore réelle de sols agricoles de Côte-d'Or. *Agronomie*, 16, 453-463.
- Barzman, M., Bàrberi, P., Birch, A.N.E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., Graf, B., Hommel, B., Jensen, J.E., Kiss, J., Kudsk, P., Lamichhane, J.R., Messéan, A., Moonen, A.C., Ratnadass, A., Ricci, P., Sarah, J.L., Sattin, M., 2015. Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4):1199-1215. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0327-9>
- Bastiaans, L., Paolini, R., Baumann, D.T., 2008. Focus on ecological weed management: what is hindering adoption? *Weed Research*, 48(6):481- 491. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00662.x>
- Blevins, R.L., Smith, M.S., Thomas, G.W., Frye, W.W., 1983. Influence of conservation tillage on soil properties. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38, 301-307.
- Benton, T.G., Vickery, J.A., Wilson, J.D., 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 182-188.
- Bennett, J.A., Riibak, K., Tamme, R., Lewis, R.J. & Pärtel, M., 2016. The reciprocal relationship between competition and intraspecific trait variation. *Journal of Ecology*, 104, 1410-1420.
- Berti, M., Gesch, R., Eynck, C., Anderson, J., Cermak, S., 2016. Camelina uses, genetics, genomics, production, and management. *Industrial Crops and Products*, 94: 690-710. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.034>
- Bigwood, D.W., & Inouye, D.W., 1988. Spatial pattern analysis of seed banks: An improved method and optimized sampling. *Ecological Society of America*, 69, 497-507
- Blevins, R.L., & Frye, W.W., 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management. *Advances in Agronomy*, 51, 33±78.

- Blum, U., King, L., Gerig, T., Lehman, M., & Worsham, A., 1997. Effects of clover and small grain cover crops and tillage techniques on seedling emergence of some dicotyledonous weed species. *American Journal of Alternative Agriculture*, 12(4), 146-161.
- Booth, BD., & Swanton, CJ., 2002. Assembly theory applied to weed communities. *Weed Science*, 50: 2-13.
- Borgy, B., Perronne, R., Kohler, C., Grison, AL., Amiaud, B., & Gaba, S., 2016. Changes in functional diversity and intraspecific trait variability of weeds in response to crop sequences and climate. *Weed Research*, 56, 102-113.
- Boutin, C., Baril, A., Martin, PA., 2008. Plant diversity in crop fields and woody hedgerows of organic and conventional farms in contrasting landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123, 185-193.
- Brennan, J., Hackett, R., McCabe, T., Grant, J., Fortune, RA., Forristal, PD., 2014. The effect of tillage system and residue management on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat in a cool Atlantic climate. *European Journal of Agronomy*, 54:61-69
- Bretagnolle, V., & Gaba, S., 2015. Weeds for bees? A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 891-909
- Brose, U., & Martinez, ND., 2004. Estimating the richness of species with variable mobility. *Oikos*, 105, 292-300.
- Buhler, DD., 1995. Influence of tillage systems on weed populations dynamics and management in corn and soybean in the central USA. *Crop Science*, 35, 1247-1258.
- Buhler, DD., Hartzler, RG., and Forcella, F., 1997. Implications of weed seed bank dynamics to weed management. *Weed Science*, 45:329-336.
- Cardina, J., Regnier, E., & Harrison, K., 1991. Long-term tillage effects on seed banks in three Ohio soils. *Weed Science*, 39, 186±194.
- Cardina, J., Sparrow, DH., & McCoy, EL., 1996. Spatial relationships between seedbank and seedling populations of common lambsquarters (*Chenopodium album*) and annual grasses. *Weed Science*, 44:298-308
- Cardinale, BJ., Matulich, KL., Hooper, DU., Byrnes, JE., Duffy, E., Gamfeldt, L., Balvanera, P., O'Connor, MI., Gonzalez, A., 2011. The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany*, 98(3): 572-592.
- Caussanel, JP., 1989. Nuisibilité et seuil de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. *Agronomie*, 9, 219-240.
- Cavers, PB., 1995. Seed banks: memory in soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 75:11- 13.
- Cavers, PB., Benoit, DL., Kenkel, NC., 1989. Factors influencing the precision of soil seed bank estimates. *Canadian Journal of Botany*, 67: 2833-2840.
- Cavigelli, MA., Teasdale, JR., & Conklin, AE., 2008. Long-term agronomic performance of organic and conventional field crops in the mid-Atlantic region. *Agronomy Journal*, 100(3), 785-794.
- Chauvel, B., Darmency, H., Munier-jolain, N., Rodriguez, A., 2018. Gestion durable de la flore adventice des cultures, Versailles, *Edition Quae*, 354 p.
- Clarke, PJ., & Dorji, K., 2008. Are trade-offs in plant resprouting manifested in community seed banks? *Ecology* 89:1850-1858.
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.008>

- Colbach, N., Granger, S., Guyot, Shm., & Meziere, D., 2014. A trait-based approach to explain weed species response to agricultural practices in a simulation study with a cropping system model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 183, 197-204.
- Colwell, RK., & Coddington, JA., 1994. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 345 (1311) : 101-118.
- Cordeau, S., Petit, S., Reboud, X., & Chauvel, B., 2012. Sown grass strips harbour high weed diversity but decrease weed richness in adjacent crops. *Weed Research*, 52, 88-97.
- Crowder, DW., Northfield, TD., Gomulkiewicz, R., Snyder, WE., 2012. Conserving and promoting evenness: organic farming and fire-based wildland management as case studies. *Ecology*, 93, 2001-2007.
- Crowder, DW., Northfield, TD., Strand, MR., Snyder, WE., 2010. Organic agriculture promotes evenness and natural pest control. *Nature*, 466, 109-112
- Dalal, Rc., Strong, Wm., Weston, Ej et al. 1995 Sustaining productivity of a vertisol at Warra, Queensland, with fertilisers, no-tillage, or legumes. 1. Organic matter status. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 35, 903±913.
- Dale, MRT., Thomas, AG., John, EA., 1992. Environmental factors including management practices as correlates of weed community composition in spring seeded crops. *Canadian Journal of Botany*, 70, 1931-1939.
- Decruyenaere, F., 2021. Travail de fin d'étude : Suivi des bioagresseurs au sein des rotations innovantes de longue durée mises en place dans l'essai ecofoodsystem, dans un contexte agroécologique et zero pesticide. *GxABT, Uliège*.
- Délye, C., Jasieniuk, M., Le Corre, V., 2013. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics*, 29(11), 649-658
- Dengler, J., 2009. Which function describes the species-area relationship best ? A review and empirical evaluation. *Journal of Biogeography*. 36 (4), 728-744.
- Derksen, DA., Anderson, RL., Blackshaw, RE., Maxwell, B., 2002. Weed dynamics and management strategies for cropping systems in the Northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 94(2), 174-185. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.1740>
- Dessaint, F., Chadoeuf, R., & Barralis, G., 1997. Nine years' soil seed bank and weed vegetation relationships in an arable field without weed control. *Journal of Applied Ecology*, 34, 123-130.
- Dessaint, F., Chadoeuf, R., & Barralis, G., 1991. Spatial pattern analysis of weed seeds in the cultivated soil seed bank. *Journal of Applied Ecology*, 28, 721-730.
- Vallavieille-Pope, C., Belhaj Fraj, M., Mille, B., Meynard, JM., 2006. Les Associations de Variétés : Accroître La biodiversité pour mieux maîtriser les maladies. *Les Doss, l'Environnement l'INRA*, 30, 101-109.
- Dieleman, A., et al., 1996. Decision rules for postemergence control of pigweed (*Amaranthus* spp.) in soybean (*Glycine max*). *Weed Science*, 126-132.
- Ellenberg, H. Weber, HE., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., & Paulissen, D., 1992. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica*, 18(2), 1-258.
- FAO., FIDA., OMS., PAM et UNICEF., 2021. L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2021. Transformer les systèmes alimentaires pour que la sécurité alimentaire, une meilleure nutrition et une alimentation saine et abordable soient une réalité pour tous. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4474fr>
- Fenner, M., 1985. Seed bank dynamics. *Seed Ecology*, 82-96.
- Fontaine, L., Bonin, L., Lieven, J., Garnier, J.-F., Zaganiacz, V., Rodriguez, A., & Lemarié, P., 2013. Optimiser et promouvoir le désherbage mécanique en grandes cultures. *Innovations Agronomiques*, 28, 113-125.

- Forcella, F., Wilson, R. G., Renner, K., Dekker, J. H., Harvey, R. G., Alm, D., Cardina, J., 1992. Weed seedbanks of the U.S. corn belt: Magnitude, variation, emergence, and application. *Weed Science*, 40, 636-644.
- Fried, G., 2007. Variations spatiales et temporelles des communautés adventices des cultures annuelles en France. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France.
- Fried, G., Girod, C., Jacquot, M., & Dessaint, F., 2007. Répartition de la flore adventice à l'échelle d'un paysage agricole : analyse de la diversité des pleins champs et des bordures. Vingtième conférence du Columa. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Dijon, France,
- Fried, G., Chauvel, B., & Reboud, X., 2009a. A functional analysis of large-scale temporal shifts from 1970 to 2000 in weed assemblages of sunflower crops in France. *Journal of Vegetation Science*, 20(1), 49-58.
- Fried, G., Petit, S., Dessaint, F., & Reboud, X., 2009b. Arable weed decline in Northern France: Crop edges as refugia for weed conservation? *Biological Conservation*, 142, 238-243.
- Fried, G., Kazakou, E., & Gaba, S., 2012. Trajectories of weed communities explained by traits associated with species' response traits to management practices. *Agriculture Ecosystem & Environment* 158, 147-155.
- Froud-Williams, Rj., 1988. Changes in weed flora with different tillage and agronomic management systems. *Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches*, 213±236.
- Funk, J.L., & Wolf, A.A., 2016. Testing the trait-based community framework: do functional traits predict competitive outcomes? *Ecology*, 97, 2206-2211.
- Gaba, S., Perronne, R., Fried, G., Gardarin, A., Bretagnolle, F., Biju-Duval, L., Colbach, N., Cordeau, S., Fernandez - Aparicio, M., Gauvrit, C., Gibot-Leclerc, S., Guillemain, J.P., 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, 123-147.
- Gámez-Virués, S., et al., 2015. Landscape simplification filters species traits and drives biotic homogenization. *Nature*, 6,1-8.
- Gardener, M., 2014. Community Ecology. Analytical Methods Using R and Excel. *Pelagic Publishing*, 556 pp.
- Gibbons, D.W., Bohan, D.A., Rothery, P., 2006. Weed seed resources for birds in fields with contrasting conventional and genetically modified herbicide-tolerant crops, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 273, 1921-1928.
- Gibot-Leclerc, S., Brault, M., Pinochet, X., Sallé G., 2003. Rôle potentiel des plantes adventices du colza d'hiver dans l'extension de l'orobanche rameuse en Poitou-Charentes, *Compte Rendus Biologie*. 326, 645- 658.
- Gliessman, S.R., 2006. Agroecology: the ecology of sustainable food systems, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton
- Godinho, I., 1984. Les définitions d'adventice et de mauvaise herbe. *Weed Research*, 24(2), 121- 125.
- Goyeau, H., & Fablet, G., 1982. Etude du stock semencier de mauvaises herbes dans le sol: Le problème de l'échantillonnage. *Agronomie*, 2, 545-552.
- Grall, J., & Coic, N., 2005. Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier. Rapport Ifremer DYNECO/VIGIES/06-13/REBENT.
- Grime, J., 1974. Vegetation classification by reference to strategies. *Nature*, 250, 26-31.
- Gross, K.L., 1990. A comparison of methods for estimating seed numbers in the soil. *Journal of Ecology*, 78, 1079-1093.
- Gunton, Rm., Petit, S., & Gaba, S., 2011. Functional traits relating arable weed communities to crop characteristics. *Journal of Vegetation Science*, 22, 541-550.

- Guo, QF., Rundel, PW., & Goodall, DW., 1998. Horizontal and vertical distribution of desert seed banks: patterns, causes, and implications. *Journal of Arid Environments*, 38:465-478
- Hanson, HC., 1938. Ecology of the grassland. *The Botanical Review*, 4:51-82.
- Haring, SC., & Flessner, ML., 2018. Improving soil seed bank management. *Pest Management Science*, 74, 2412-2418.
- Hawes, C., Haughton, AJ., Osborne, JL., Roy, DB., Clark, SJ., Perry, JN., Rothery, P., Bohan, DA., Brooks, DR., Champion, GT., Dewar, AM., Heard, MS., Woiwod, IP., Daniels, RE., Young, MW., Parish, AM., Scott, RJ., Firbank, LG., Squire, GR., 2003. Responses of plants and invertebrate trophic groups to contrasting herbicide regimes in the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358, 1899- 1913.
- Hiel, MP., Barbieux, S., Pierreux, J., Olivier, C., Lobet, G., Roisin, C., Garré, S., Colinet, G., Bodson, B., & Dumont, B. (2018). Impact of crop residue management on crop production and soil chemistry after seven years of crop rotation in temperate climate, loamy soils. *PeerJ*.
- Holt, JS., 1995. Plant responses to light: a potential tool for weed management. *Weed Science*, 43, 474-482.
- Jacob HS., Minkey DM., Gallagher RS., Borger CP., 2006. Variation in postdispersal weed seed predation in a crop field. *Weed Science*, 54, 148-155.
- Jost, L., 2007. Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*, 88, 2427- 2439.
- Kalamees, R., & Zobel, M., 2002. The role of the seed bank in gap regeneration in a calcareous grassland community. *Ecology* 83:1017-1025.
- Khaliq, A., Shakeel, M., Matloob, A., Hussain, S., Tanveer, A., Murtaza, G., 2013. Influence of Tillage and Weed Control Practices on Growth and Yield of Wheat. *Philippine Journal of Crop Science*, 38, 3
- Kisic, I., Bogunovic, I., Zgorelec, Z., Bilandzija, D., 2018. Effects of soil erosion by water under different tillage treatments on distribution of soil chemical parameters. *Soil and Water Research*, 12, 170–176.
- Kleijn, D., Baquero, RA., Clough, Y., Diaz, M., Esteban, JD., Fernandez, F., Gabriel, D., Herzog, F., Holzschuh, A., Johl, R., Knop, E., Kruess, A., Marshall, EP., SteffanDewenter, I., Tscharncke, T., Verhulst, J., West, TM, Yela, JL., 2006. Mixed biodiversity benefits of agri-environment schemes in five European counties. *Ecology*, 9, 243-254.
- Klimešová, J., & Klimeš, L., 2007. Bud banks and their role in vegetative regeneration. A literature review and proposal for simple classification and assessment. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 8, 115-129.
- Knezevic, SZ., et al., 1997. Relative time of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) emergence is critical in pigweed-sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] competition. *Weed Science*, 502-508.
- Koocheki, A., Nassiri, M., Alimoradi, L., Ghorbani, R., 2009. Effect of cropping systems and crop rotations on weeds. *Agronomy for Sustainable Development* 29(2), 401-408. <https://doi.org/10.1051/agro/2008061>
- Koohafkan, P., Basso, B., Findlay, J., Friedrich, T., Jordan, V., Landers, J., Pieri, C., Wall, P., Garcia Torres, L., Martinez Vilela, A., & Ashburner and, J., 2001. *First world congress on Conservation Agriculture A world-wide challenge*.
- Kraft, Njb., Adler, Pb., Godoy, O., James Ec., Fuller, S., & Levine, Jm., 2015. Community assembly, coexistence and the environmental metaphor. *Functional Ecology*, 29, 592- 599.
- Kromp, B., 1999. Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74, 187-228.

- Kuester, A., Conner, JK., Culley, T., and Baucom, RS., 2014. How weeds emerge: a taxonomic and trait-based examination using United States data. *New Phytologist*, 202, 1055-1068
- Lavorel, S., & Garnier, E., 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16, 545-556.
- Lechenet, M., Bretagnolle, V., Bockstaller, C., Boissinot, F., Petit, MS., Petit, S., Munier-Jolain, NM., 2014. Reconciling pesticide reduction with economic and environmental sustainability in arable farming. *PLoS One*, 9(6), e97922. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097922>
- Légère, A., Shirtliffe, S., Vanasse, A., & Gulden, R. 2013. Extreme Grain-Based Cropping Systems: When Herbicide-Free Weed Management Meets Conservation Tillage in Northern Climates. *Weed Technology*, 27(1), 204-211.
- Leishman, MR., 2001. Does the seed size/number trade-off model determine plant community structure? An assessment of the model mechanisms and their generality. *Oikos*, 93, 294-302
- Liebman L., Davis AS., 2000. Integration of soil, crop, and weed management in low-external-input farming systems, *Weed Research*. 40, 27- 47.
- Liebman, M., Gallandt, ER., and Jackson, L., 1997. Many little hammers: ecological management of crop-weed interactions. *Journal of Agriculture and Ecology*, 1, 291-343.
- Livre Blanc Céréales., n.d. Retrieved July 26, 2022, from <https://www.livre-blanc-cereales.be/thematiques/fumures/froment>
- Lonchamp, JP., Barralis, G., Gora, M., 1983. Effets de faibles potentiels hydriques sur les possibilités de germination des semences d'*Alopecurus myosuroides* Huds. et de *Matricaria perforata* Mérat. *Agronomie, EDP Sciences* 3 (5), 435-441.
- Lososova, Z., Chytrý, M., Kuhn, I., Hajek, O., Horakova, V., Pysek, P., & Tichý, L. 2006. Patterns of plant traits in annual vegetation of man-made habitats in central Europe. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 8(2), 69-81.
- Luschei, EC., 2003. Comparison of the effectiveness of seedbank sampling to seedling counts in reducing the uncertainty in estimates of weed population size. *Aspects of Applied Biology*. 69:137-142.
- Maclaren, C., Storkey, J., Menegat, A., Metcalfe, H., and Dehnen-Schmutz, K. 2020. An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 1-29.
- Mahé, I., Cordeau, S., Bohan, D. A., Derrouch, D., Dessaint, F., Millot, D., & Chauvel, B. (2021). Soil seedbank: Old methods for new challenges in agroecology? *Annals of Applied Biology*, 178(1), 23-38.
- Major, J., And WT. Pyott., 1966. Buried, viable seeds in two California bunchgrass sites and their bearing on the definition of a flora. *Vegetation Science*, 13:253-282.
- Manson RH., Stiles EW., 1998. Links between microhabitat preferences and seed predation by small mammals in old fields. *Oikos*, 82, 37-50.
- Mantle, PG., Shaw, S., 1977. A Case Study of the Aetiology of Ergot Disease of Cereals and Grasses, *Plant Pathology*, 26, 121-126.
- Matson, PA., Parton, WJ., Power, AG., Swift, MJ., 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277, 504-509.
- Mazzoncini, M., Croceá, L., Bárberi, P., Menini, S., & Bonari, E., 2000. Crop management systems to conserve soil fertility after long-term set-aside in Southern Italy. *Sustainable Management of Soil Organic Matter* (eds RM Rees, BC Ball, CD Campbell & CA Watson), 163±172.

- Menchari, Y., Camilleri, C., Michel, S., Brunel, D., Dessaint, F., Le Correl, V., Déleze, C., 2006. well Publishing Ltd
Weed response to herbicides: regional-scale distribution of herbicide resistance alleles in the grass weed
Alopecurus myosuroides. *New Phytologist*, 171, 861-874.
- Mesgaran, MB., Mashhadi, HR., & Alizadeh, HM., 2007. Comparison of three methodologies for efficient seed
extraction in studies of soil weed seedbanks. *Weed Research*, 47:472-478.
- Mortensen, DA., Bastiaans, L., & Sattin, M. 2000. The role of ecology in the development of weed management
systems: an outlook. *Weed Research*, 40, 49-62.
- Mortensen, DA., Johnson GA., and Young LJ., 1993. Weed distribution in agricultural fields. *Soil Specific Crop
Management*, Madison, WI: American Society of Agronomists, 113-123.
- Mouillot, D., & Lepêtre, A., 1999. A comparison of species diversity estimators. *Population Ecology*, 41, 203/215
- Nagendra, H., 2002. Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity.
Applied Geography, 22, 175-186.
- Navas, ML., 2012. Trait-based approaches to unravelling the assembly of weed communities and their impact on
agro-ecosystem functioning. *Weed Research*, 52, 479-488.
- Oerke E., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144, 31
- ONU, 2019. World population prospects 2019, Department of Economic and Social Affairs. World Population
Prospects.
- Perronne, R., Gaba, S., Cadet, E., & Le Corre, V., 2014. The interspecific and intraspecific variation of functional
traits in weeds: diversified ecological strategies within arable fields. *Acta Botanica Gallica*, 161, 243-252.
- Perronne, R., Le Corre, V., Bretagnolle, V., & Gaba, S., 2015. Stochastic processes and crop types shape weed
community assembly in arable fields. *Journal of Vegetation Science*, 26, 348-359.
- Petit, S., Cordeau, S., Chauvel, B., Bohan, D., Guillemin, JP., & Steinberg, C., 2018. Biodiversity-based options for
arable weed management. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38:48.
- 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. *Environ Manag* 56(5),1078- 1090
- Petit, S., Boursault, A., le Guilloux, M., Munier-Jolain, N., & Reboud, X., 2011. Weeds in agricultural landscapes. A
review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(2), 309-317.
- Petit, S., Gaba, S., Colbach, N., Bockstaller, C., Bretagnolle, V., et al., 2013. Gestion agroécologique de la
flore adventice dans les systèmes à bas niveau d'usage d'herbicides : le projet ADVHERB.
Innovations Agronomiques INRAE, 28, 75-86.
- Pingali, PL., 2012. Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of
Science*. 102, 12302-12308
- Plue, J., & Hermy, M., 2012. Consistent seed bank spatial structure across semi-natural habitats determines plot
sampling. *Journal of Vegetation Science*, 23, 505-516.
- Quinio, M., De Waele, M., Dessaint, F., Biju-Duval, L., Buthiot, M., Cadet, E., Bybee-Finley, AK., Guillemin, JP.,
Cordeau, S., 2017. Separating the confounding effects of farming practices on weeds and winter wheat
production using path modelling. *European Journal of Agronomy*, 82:134-143.
- Rice, EL., 1984. Allelopathy. 2nd Edition, *Academic Press, Orlando*, 422.
- Riley, H., 2014. Grain yields and soil properties on loam soil after three decades with conservation tillage
in southeast Norway. *Acta Agriculturae ScandInavica Section B: soil and Plant Science* 64:185-202

- Ris Lambers, JH., Clark, JS., & Lavine, M., 2005. Implications of seed banking for recruitment of southern Appalachian woody species. *Ecology*, 86, 85-95.
- Robinson, RA., Sutherland, WJ., 2002. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of Applied Ecology*, 39, 157-176.
- Roschewitz, I., Gabriel, D., Tschardt, T., Thies, C., 2005. The effects of landscape complexity on arable weed species diversity in organic and conventional farming. *Journal of Applied Ecology*, 42, 873-882.
- Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., Eldridge, D., & Marques, M., 2013. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *Catena*, 104, 153-160.
- Ryan, MR., Smith, RG., Mortensen, DA., Teasdale, JR., Curran, WS., Seidel, R., & Shumway, DL., 2009. Weed-crop competition relationships differ between organic and conventional cropping systems. *Weed Research*, 49(6), 572-580.
- Shahid, SA., Zaman, M., Heng, L. 2018. Soil Salinity: Historical Perspectives and a World Overview of the Problem. In: *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Springer, Cham.
- Shannon, CE., and Weaver, W., 1949. The mathematical theory of communication. *University of Illinois Press, Urbana*.
- Simpson, E., 1949. Measurement of Diversity. *Nature* 163, 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- Silvertown, J., Dodd, M., Gowing, D., Lawson, C. & McConway, K. 2006. Phylogeny and the hierarchical organization of plant diversity. *Ecology*, 87, 39-549
- Spandl, E., Durgan, Br., & Forcella, F., 1999. Foxtail (*Setaria* spp.) seedling dynamics in spring wheat (*Triticum aestivum*) are influenced by seeding date and tillage regime. *Weed Science*, 47, 156-160.
- Stoate, C., Boatman, ND., Borralho, RJ., Rio Carvalho, C., de Snoo, GR., Eden, P., 2001. Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management*, 63, 337-365
- Stoate, C., Baldi, A., Beja, P., Boatman, ND., Herzon, I., van Doorn, A., de Snoo, G.R., Rakosy, L., Ramwell, C., 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe - a review. *Journal of Environmental Management*, 91, 22-46.
- Storkey, J., 2006. A functional group approach to the management of UK arable weeds to support biological diversity. *Weed Research*, 46, 513-522.
- Storkey, J., Moss, Sr., & Cussans, Jw., 2010. Using assembly theory to explain changes in a weed flora in response to agricultural intensification. *Weed Science*, 58, 39-46.
- Swanton, CJ., Mahoney, KJ., Chandler, K., Gulden, RH., 2008. Integrated weed management: knowledge-based weed management systems. *Weed Science*, 56(1), 168-172. <https://doi.org/10.1614/ws-07-126.1>
- Swanton, CJ., et al., 1999. Weed Thresholds. *Journal of Crop Production*, 2(1), 9-29.
- Swanton, CJ., Vyn, TJ., Chandler, K., & Shrestha, A., 1998. Weed management strategies for no-till soybean (*Glycine max*) grown on claysoils. *Weed Technology*, 12, 660-669.
- Terheerdt, GN., Shutter, A., & Bakker, JP., 1999. The effect of water supply on seed-bank analysis using the seedling-emergence method. *Functional Ecology*, 13:428-430.
- Thompson, K., Green, A., Jewels, AM., 1994. Seeds in soil and worm casts from a neutral grassland, *Functional Ecology*, 8, 29-35.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, BL., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260-20264.

- Tscharntke, T., Klein, AM., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., Thies, C., 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management, *Ecology*, 8, 857- 874
- Vakali, C., Zaller, J.G., K'opke, U., 2011. Reduced tillage effects on soil properties and growth of cereals and associated weeds under organic farming. *Soil Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.09.003>.
- Venable, DL., & Lawlor, L., 1980. Delayed germination and dispersal in desert annuals: escape in space and time. *Oecologia*, 46, 272-282.
- Vigueira, CC., Olsen, KM. and Caicedo, AL., 2013. The red queen in the corn: agricultural weeds as models of rapid adaptive evolution. *Heredity*, 110, 303-311
- Violle, C., Garnier, E., Lecoœur, J., Roumet, C., Pothier, C., Blanchard, A., Navas, ML., 2009. Competition, traits and resource depletion in plant communities. *Oecologia*, 160, 747-755.
- 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. *Lancet* 393, 447-492.
- Weibull, A.C., Ostman, O., Granqvist, A., 2003. Species richness in agroecosystems: the effect of landscape, habitat and farm management. *Biodiversity and Conservation*, 12,1335-1355.
- Weise, AF., & Davis. RG., 1967. Weed emergence from two soils at various moistures, temperatures, and depths. *Weeds*, 15, 118-121.
- Wezel, A., Bellon, S., Dore, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 503-515.
- Wilson, RG., 1988. Biology of weed seeds in the soil. In M. A. Altieri and M. Liebman, eds. *Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches*. Boca Raton, 25-39.
- Wilson, R., Kerr, E., & Nelson, L., 1985. Potential for Using Weed Seed Content in the Soil to Predict Future Weed Problems. *Weed Science*, 33(2), 171-175.
- Wilson, B.J., & Wright, K.J. 1990. Predicting the growth and competitive effects of annual weeds in wheat. *Weed Research*, 30, 201-211.
- Wilson, J.D., Morris, A.J., Arroyo, B.E., Clack, S.C., Bradbury, R.B. 1999. A review of the abundance and diversity of invertebrate and plant foods of granivorous birds in northern Europe in relation to agricultural change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 75, 13-30
- Wisler, G.C., Norris, R.E., 2005. Interactions between weeds and cultivated plants as related to management of plant pathogens, *Weed Science*, 53, 914-917.
- Worsham, AD., 1991. Role of cover crops in weed management and water quality. *Cover Crops for Clean Water* (ed. WL Hargrove). Jackson, TN, USA, 141-145.
- Young, Fl., Ogg Ag, Jr., Thill, Dc., Young, Dl., & Papendick, Ri., 1996. Weed management for crop production in the Northwest wheat (*Triticum aestivum*) region. *Weed Science*, 44, 429±436.
- Zanin, G., Otto, S., Riello, L., & Borin, M., 1997. Ecological interpretation of weed flora dynamics under different tillage systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 66, 177±188.
- Zhang, J., Gardiner, IO., and Weaver, SE., 1998. Dependence of weed flora on the active soil seedbank. *Weed Research*. 38:143-152.
- Zwinger, P., & Arlt, K., 2002. Unkraut: Ökologie und Bekämpfung, Eugen Ulmer