AGROCAMPUS OUEST

☐ **CFR Angers**

☐ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2016 - 2017

Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)

Parcours : Sélection, Production et Valorisation des Végétaux (SPVV) /

Option : Production Végétale Intégrée

Mémoire de Fin d'Études

☐ díIngÈnieur de líInstitut SupÈrieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☑ de Master de líInstitut SupÈrieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Impact du travail du sol sur les adventices : Enseignements de l'essai travail du sol de longue durée de Boigneville et simulation

Par : Alice GUESDON VENNERIE

Soutenu à l'Agrocampus Ouest de Rennes le 14 septembre 2017

Devant le jury composé de :

Président : Olivier Godinot

Maître de stage : Pascale Métais

Enseignant référent : Safya Menasseri

Autres membres du jury : Djilali Heddadj, Délégué scientifique à la Chambre d'agriculture de Bretagne

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Annexe III : Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité :

☒ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible(1).
A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).

Date et signature du maître de stage(2) : le 21/09/2017

ARVALIS
Institut du végétal
Biopôle Clermont-Limagne
2 rue Henri Mondor
63360 St-Beauzire
Tél. 04 73 33 42 10

Droits d'auteur :

L'auteur(3) autorise la diffusion de son travail

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☒ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur :

20/09/17

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant :

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.
Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.
(2) Signature et cachet de l'organisme
(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études
(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

La présente étude était financée par le projet COSAC (ANR-15-CE18-0007) et le GIS GC HP2E. Le projet COSAC (Conception de Stratégies durables de gestion des Adventices dans un contexte de Changement (climat, pratiques agricoles, biodiversité)) est essentiellement issu des réflexions menées par le projet Ecophyto-FLORSYS et le groupe « Gestion durable des adventices » du GIS GC HP2E.

Je tiens à remercier tout particulièrement Pascale Métais, mon encadrante de stage pour son accompagnement, ses conseils et sa disponibilité tout au long du projet. Un grand merci pour sa confiance en moi et son implication dans ce stage. Je remercie également Jérôme Labreuche et Sandrine Volan co-encadrants de mon stage pour leur écoute, leur suivi et leurs conseils durant ces 6 mois et pour la rédaction de ce mémoire.

Je remercie également Nathalie Colbach et Olivia Pointurier de l'INRA, UMR Agroécologie à Dijon, pour ma formation sur le modèle FLORSYS mais aussi leur aide et leur accompagnement réguliers dans l'avancée de mon stage et le fonctionnement du modèle.

Un grand merci à Emmanuelle Héritier pour son aide sur la partie statistique de mon projet, mais aussi d'avoir pris le temps de répondre à toutes mes interrogations.

Merci à Stéphane Cordeau de l'UMR Agroécologie de Dijon et Fanny Vuillemin de Terres Inovia pour leurs conseils et leur expertise durant les comités de pilotage du projet.

Merci enfin à Aurélie Geille, Sylvain Bureau, Catherine Vacher, Sylvie Bienvenu et Damien Gaudillat mais aussi toute l'équipe du pôle SAEE pour avoir répondu à mes questions d'ordre technique et m'avoir aidé dans la partie terrain de mon stage, mais également pour leur sympathie et leur bonne humeur quotidienne qui m'ont été très précieuses durant ces 6 mois.

Sommaire

Introduction 1

I) Etat des connaissances sur le travail du sol et les adventices 2

1) Présentation des adventices 2

a) Mode de reproduction des adventices 2

b) Seuils de nuisibilité 2

c) Dormance et germination des graines d'adventices 3

d) Effet du contexte pédoclimatique et des pratiques agricoles sur la flore adventice 3

2) Quels leviers agronomiques pour la gestion des adventices ? 4

a) Le travail du sol, un des leviers principaux de lutte contre les adventices 4

b) La diversification de la rotation culturale comme autre moyen de prévention 6

c) Combinaison de plusieurs leviers (rotation, variétés semées, travail du sol…) 6

3) Les modèles de suivi des adventices 7

a) Présentation des modèles 7

b) Evaluation de FLORSYS 8

II) Matériels et méthodes 9

1) Une démarche avec deux approches complémentaires 9

2) Approche expérimentale : relevés de flore sur l'essai « Travail du sol » 9

a) Dispositif expérimental 9

b) Acquisition des données et mise en place de la base de données 11

c) Examen préliminaire des données des années 2010 11

d) Analyse des données des années 2010 13

3) Approches par modélisation 14

a) Données utilisées 14

b) Comparaison des données simulées et observées 15

III) Présentation des résultats 16

1) Analyse des données expérimentales 16

a) Le travail du sol, l'année et le point d'entrée*année influencent la flore adventice 17

b) Travail du sol et période d'interculture 18

c) Travail du sol et type biologique des adventices 19

4) Evaluation du modèle 19

a) Analyse des indicateurs de comparaison 19

b) Analyse statistique des données simulées 20
IV) Discussion 21
1) Analyse des données expérimentales 21
a) Intérêts et limites de l'essai de longue durée 21
b) Portée des résultats 21
2) Comparaison des données simulées avec les données expérimentales 22
Conclusion 23
Bibliographie 24

Introduction

L'agriculture a connu de nombreux changements depuis les années 50 avec notamment l'arrivée des pesticides et la mécanisation des interventions. Les rendements ont fortement augmenté, les pratiques culturales ainsi que les espèces cultivées ont également beaucoup évolué. Suite à ces bouleversements, le monde agricole doit maintenant faire face à des problèmes environnementaux et agronomiques du fait de l'utilisation intensive des produits phytosanitaires et de la simplification des rotations et des pratiques. La lutte contre les adventices est un parfait exemple d'impasse technique. Ces dernières sont considérées comme étant actuellement le bioagresseur le plus nuisible car elles peuvent causer des problèmes techniques à la récolte et peuvent engendrer des pertes considérables de rendement *(Labreuche et al., 2014)*. Cependant, les adventices peuvent aussi être considérées source de biodiversité et de refuge pour les auxiliaires *(Colbach et al., 2014a)*. Depuis le début de l'agriculture, l'un des objectifs du travail du sol a été le contrôle des adventices même si ce rôle est passé au second plan avec l'apparition des herbicides. La simplification du travail du sol, phénomène accentué par l'agrandissement des exploitations agricoles, permet un gain de temps et d'énergie fossile, mais a un impact important sur l'enherbement des parcelles en général. Les différentes interventions mécaniques sur le sol influencent la flore adventice par ses effets sur l'enfouissement ou non des graines d'adventices, sur la préparation d'un lit de semence favorisant leur germination, ou encore sur l'humidité du sol. La règlementation d'utilisation des herbicides est de plus en plus contraignante et de nombreux produits phytosanitaires ont été ou vont être supprimés car jugés trop dangereux pour la santé et l'environnement selon la réglementation européenne. De plus, beaucoup d'adventices ont développé des capacités de résistance à certains produits chimiques. La spécialisation des pratiques culturales (rotation, travail du sol, herbicides…) a favorisé le fort développement de certaines adventices mieux adaptées à ces systèmes au détriment d'autres espèces plus spécialistes de sol pauvres ou particuliers *(Fried et al, 2008)*.

Ce contexte de simplification du travail du sol et de complexification dans la gestion des adventices nous amène à la problématique suivante : Quel est l'impact du travail du sol sur la flore adventice dans les grandes cultures du sud du bassin parisien ? Pour répondre à cette question, nous nous aiderons de données expérimentales issues de relevés réalisés sur l'essai travail du sol de Boigneville (91), mais aussi de données simulées par un modèle de champ virtuel sur le même essai. Nous commencerons par faire un état des connaissances sur le travail du sol et de son effet sur les adventices, ainsi que sur les modèles de simulation de flore adventice existants. Dans un deuxième temps, nous présenterons la démarche d'analyse, qui s'appuie sur l'expérimentation et la simulation. La troisième partie présentera les résultats issus des analyses descriptives et statistiques, ainsi que les comparaisons avec les données de la simulation. Ces résultats seront ensuite discutés, ainsi que les perspectives d'essai de longue durée sur la gestion des adventices.

Tableau I : Les différents modes de reproduction des adventices (Vacher and Metais, 2015), (telabotanica.org) (Infloweb)

Type biologique	**Durée du cycle**	**Reproduction sexuée**	**Multiplication végétative**	**Exemples**
Annuel	1 an	Oui	Non	Gaillet, Véroniques, Vulpin, Folle avoine, Séneçon vulgaire, Géranium, Chénopode blanc, Ray-grass, Laiteron rude, Renouée liseron, Panic pied de Coq
Bisannuel	2 ans	Oui	Non	Carotte sauvage
Pluriannuel	Plusieurs années	Oui	(oui) accidentellement	Rumex crépu ou à feuilles obtuses
Vivace	Plusieurs dizaines d'années	(Oui)	Oui	Chardon des champs, Chiendent, Liseron des champs,

Tableau II : Seuils de nuisibilité (Baudry and Taunay, 2006)

Adventices	Folle avoine	Vulpin des champs	Ray-grass	Brome stérile	Pâturin annuel	Gaillet	Géranium
Nuisibilité directe sur blé *Nb de pieds occasionnant une perte de rendement de 5%*	5 pieds/m²	25 pieds/m²	25 à 30 pieds/m²	5 à 15 pieds/m²	>100 pieds/m²	1 à 2 pieds/m²	35 pieds/m²

I) Etat des connaissances sur le travail du sol et les adventices

1) Présentation des adventices

En France, on dénombre une centaine d'adventices communes, ainsi que 300 espèces d'adventices plus rares *(Colbach et al., 2014b)*. La flore adventice est considérée comme nuisible pour les cultures, au même titre que les ravageurs et les champignons. Elle exerce trois types d'impacts sur la culture :

- Une nuisibilité primaire directe avec la compétition exercée sur la culture pour les ressources en eau, en lumière et en éléments minéraux, *(Munier-Jolain et al., 2008)*
- Une nuisibilité primaire indirecte avec la dégradation de l'état sanitaire de la culture ou de la qualité de la récolte et l'augmentation du coût des travaux *(CORDEAU et al., 2016)*
- Une nuisibilité secondaire par l'alimentation du stock semencier mais aussi un rôle de réservoir et de refuge pour certains bioagresseurs *(Munier-Jolain et al., 2008)*.

La nuisibilité des adventices et leur sensibilité aux différents moyens de lutte sont très largement liées à leur biologie, à commencer par le mode de reproduction *(Munier-Jolain et al., 2008)*.

a) Mode de reproduction des adventices

Le mode de reproduction des adventices est très divers, avec des durées de cycles qui peuvent aller de 1 an à plusieurs dizaines d'années, comme le montre le Tableau I.

Ces différents modes de reproduction montrent la diversité d'adaptation des adventices face aux systèmes agricoles, ce qui permet leur maintien de manière durable dans les sols. 80-95 % des adventices sont des annuelles mais les vivaces posent aussi de sérieux problèmes dans les parcelles et sont aussi sources de nombreuses recherches *(Vacher and Metais, 2015)*. La production grainière des adventices est également très hétérogène et dépendante du milieu. Elle peut varier de quelques dizaines à plusieurs dizaines de milliers de semences par advantice. Si les adventices ne sont pas détruites avant grenaison, elles vont enrichir le stock semencier.

b) Seuils de nuisibilité

L'expérience menée par Mondragon et al (1989) met en évidence la sensibilité des cultures face à la présence d'adventices. La sensibilité du blé a été mesurée avec la présence de folle avoine dans la culture, en comparaison avec une parcelle témoin, sans adventice. Cette sensibilité s'est manifestée par une perte de rendement plus ou moins importante, de 1.4 % à plus de 10% selon le cultivar et sa sensibilité à la compétition des adventices.
Le Tableau II indique des seuils de nuisibilité de quelques adventices sur le blé. Ces seuils montrent que pour certaines adventices, un faible nombre de pieds suffit à engendrer une perte non négligeable du rendement. Les pertes peuvent être très variables pour une même culture, selon les traitements ou les types de désherbage et leur efficacité, le type de flore et son stade de développement… En l'absence de désherbage chimique par exemple, les pertes de rendements sont plus importantes.

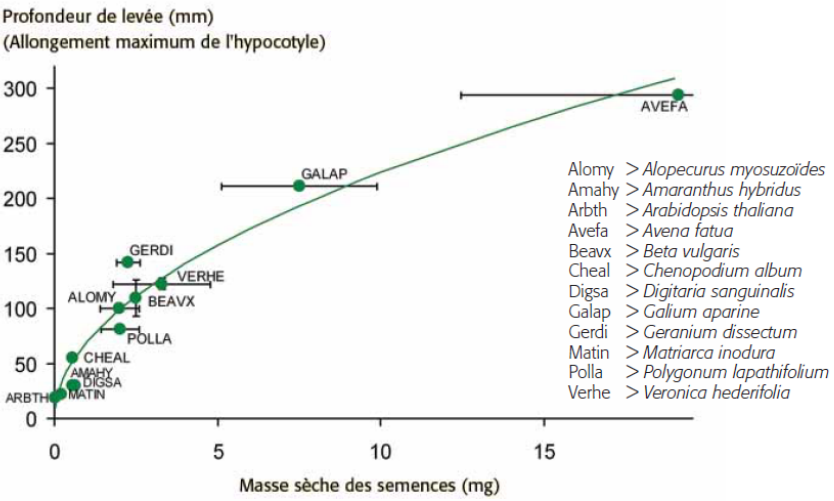


Figure 1 : Profondeur à laquelle germent les graines d'adventices
(Colbach and Vacher in Labreuche et al., 2014)

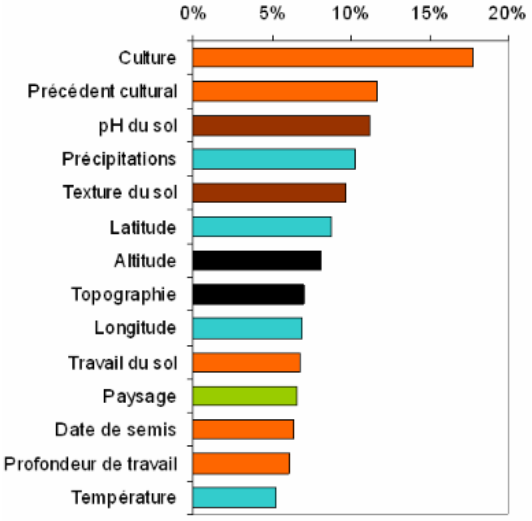


Figure 2 : Effet de différents facteurs sur la composition de la flore adventice
(Fried et al., 2008)

Les herbicides ont en effet montré leur efficacité, leur faible coût et leur rapidité de mise en œuvre *(Valantin-Morison et al., 2008)*.

c) Dormance et germination des graines d'adventices

La dormance des semences d'adventices joue un rôle important dans la survie et donc l'infestation des adventices dans une parcelle. Dans les sols agricoles, le stock semencier peut atteindre jusqu'à 120 millions de semences par hectares *(Chadoeuf-Hannel, 1985)*. La germination a lieu quand des semences viables sont placées dans des conditions favorables (humidité, température). Cependant même si les conditions sont réunies, certaines graines ne germent pas car elles sont dormantes.

Il y a deux types de dormance *(Chadoeuf-Hannel, 1985)* :

Dormance primaire : cela évite à la graine de germer dans des conditions climatiques qui nuiraient à sa survie

Dormance secondaire ou induite : lorsque la dormance primaire est levée, toutes les semences viables germent. Mais un changement dans le milieu comme une variation de température, d'humidité ou de luminosité peut provoquer une dormance secondaire qui se prolonge plus ou moins longtemps après que les facteurs d'inhibition de la germination aient disparu.

Plus la taille et le poids de la semence d'adventice augmentent, plus la profondeur maximale de germination est grande (Figure 1). Pour la majorité des graines d'adventices, il faut savoir que la germination se fait dans les 5 premiers centimètres du sol *(Valantin-Morison et al., 2008)*. Le labour permet un retournement des couches sur 20 à 30 cm. Il inhibe donc la germination de beaucoup de graines d'adventices par leur enfouissement mais certaines espèces comme la Folle avoine ou le Gaillet gratteron peuvent germer à de fortes profondeurs.

d) Effet du contexte pédoclimatique et des pratiques agricoles sur la flore adventice

Le contexte pédoclimatique, mais aussi le résultat des pratiques culturales appliquées pendant plusieurs années induit des changements et des différences de flore entre parcelles. Dans la région du bassin parisien la flore était dominée par des dicotylédones dans les années 70, puis elle a évolué avec une diminution des espèces comme la Sagine ou la Gesse en faveur d'espèces comme le Ray-grass, le Gaillet gratteron, le Panic pied de coq, la Renouée liseron ou encore le Laiteron spp. Autre tendance dans cette région, les densités d'adventices ont globalement baissé depuis les années 70 *(Fried et al., 2014)*.

Les pratiques agricoles jouent aussi un rôle dans la composition de la flore adventice. Le réseau Biovigilance Flore a permis le suivi de près de 1000 parcelles à travers la France pour voir la composition de la flore et l'influence des différents facteurs. La Figure 2 illustre le poids de chaque facteur sur la flore adventice et montre que ce sont principalement les facteurs « Culture » et « Précédent cultural » qui influent sur la composition de la flore adventice (c'est-à-dire sa richesse en espèce), bien avant le contexte pédoclimatique. L'effet du travail du sol arrive seulement en dixième position. L'effet sur l'abondance en adventices n'est pas illustré par contre.

2) Quels leviers agronomiques pour la gestion des adventices ?

La lutte chimique apparait comme de plus en plus controversée dans le contexte actuel de pollution des eaux souterraines et de surface *(Rodriguez and Gasquez, 2008)*. De plus, la baisse du nombre de matières actives disponibles et la diminution de l'efficacité des produits phytosanitaires justifient la recherche de nouveaux leviers. L'éradication complète des adventices ne doit pas être le but recherché, ce qui est déjà le cas dans les systèmes de culture biologique *(Bond et al., 2003)*. En effet, les adventices sont aussi un des piliers de la biodiversité dans le paysage agricole et contribuent à nourrir et héberger de nombreux insectes et animaux parfois bénéfiques pour la culture *(Colbach in Labreuche et al., 2014)*

a) Le travail du sol, un des leviers principaux de lutte contre les adventices

« Le travail du sol a une action directe sur la structure du sol (par fragmentation et par tassement), la localisation de la matière organique et des éléments minéraux, ainsi que celle des graines d'adventices et de certains pathogènes. » *(Labreuche et al, 2014)*.

Il existe trois grands types de travail du sol *(Labreuche et al, 2014)* :

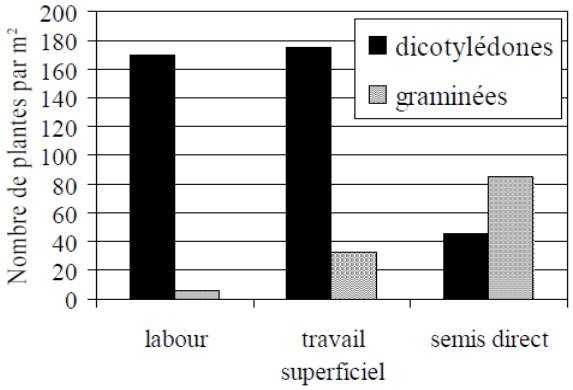
- Le labour, qui peut être plus ou moins profond (15-30 cm ou >40 cm) avec fragmentation, retournement et enfouissement de la matière
- Le travail superficiel qui permet un mélange, une fragmentation et un enfouissement superficiels de la matière.
- Le semis direct (sous couvert ou non) sans mélange du sol et avec un minimum d'enfouissement. Le travail du sol se limite à un travail sur la ligne de semis.

A quel niveau le travail du sol joue son rôle de levier contre les adventices ?

Le labour permet un enfouissement profond des graines et/ou une destruction des graines germées ou adventices développées *(Valantin-Morison et al., 2008)*. En cas de labour annuel, l'enherbement diminue rapidement au cours des années pour certaines espèces de la flore adventice. Il est aussi possible de diminuer la fréquence de labour sans forcément impacter la flore adventice. De plus, il est très intéressant de labourer avant la culture qui est la plus favorable à l'adventice dominante dans la rotation *(Labreuche et al., 2014)*.

Ces dernières décennies, le travail du sol a pris moins d'importance avec le développement de techniques culturales de plus en plus simplifiées, permises grâce aux herbicides. En France, les surfaces cultivées sans labour sont passées de 21% à 36 % entre 2001 et 2011 et semblent rester à cette valeur actuellement. Le non labour est davantage pratiqué sur les cultures d'hiver (blé tendre) que les cultures de printemps *(Heddadj et al., 2014)*.

L'essor du travail superficiel sans retournement du sol a de multiples objectifs : une meilleure protection des sols avec une stabilité structurale et une moindre érosion, une concentration de la matière organique en surface et une économie de carburants. Il y a une réduction des impacts environnementaux liés au travail du sol. D'un point de vue biologique, la réduction du travail du sol limite les impacts sur la flore et la faune (mycorhizes, vers de terres, auxiliaires…) mais il y a cependant un impact négatif dans la régulation de micromammifères comme les campagnols ou une augmentation des adventices *(Chauvel et al., 2009)*. En cas de



Infestations moyennes sur parcelles en blé après 10 à 30 ans d'expérimentation sur les effets « longue-durée » du travail du sol

Figure3 : Evolution des pourcentages d'adventices graminées ou dicotylédones selon le travail du sol, après 10 ans d'expérimentation. Essai à Grignon (78) (Debaeke and Orlando, 1991)

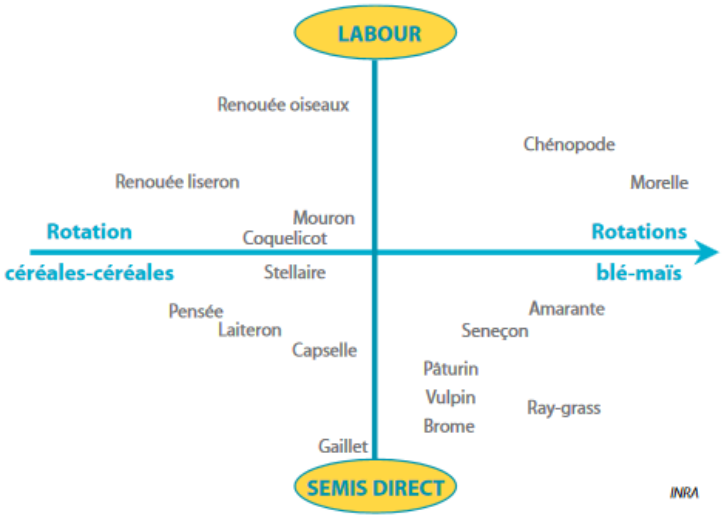


Figure 4 : Répartition des espèces les plus rencontrées de la flore adventice en fonction du type de rotation et du travail du sol. Essai à Grignon (78) (Debaeke and Orlando, 1991)

travail du sol superficiel, l'enherbement a tendance à augmenter au cours des années même en présence de faux semis.

L'abandon total de travail du sol entraine une augmentation du stock semencier adventices parce qu'il n'y a plus de faux semis pour vider le stock mais aussi d'intervention mécanique pour détruire les adventices. Il est donc compensé par une augmentation de l'usage des pesticides. Cependant, le travail superficiel est parfois plus sale que le semis direct car il peut y avoir une meilleure levée des graines d'adventices dans de la terre fine *(Labreuche et al., 2014)*.

Les dicotylédones sont plus avantagées que les graminées lors de travail superficiel ou de labour (Figure 3). L'abandon du labour favorise les graminées annuelles, les anémophiles, des espèces avec de grandes plantes, des adventices et repousses à semences de petites tailles peu dormantes ou persistantes à téguments fins, mais aussi des pérennes dont les organes de survie souterrains sont détruits par le travail du sol et plus généralement, des populations résistantes aux herbicides *(Colbach in Labreuche et al., 2014)*. Le nombre de semences augmente dans les horizons de surface du sol si le désherbage chimique est mal contrôlé. Au niveau de la composition qualitative, le nombre d'espèces reste stable après 5 ans du fait de contaminations extérieures. Mais à plus long terme il y a un appauvrissement et une spécialisation de la flore *(Debaeke and Orlando, 1991)*.

Des espèces comme la Capselle, le Laiteron ou encore le Séneçon ont tendance à augmenter dans les parcelles en non labour alors que des espèces comme le Chénopode, le Géranium ou le Mouron des champs ont tendance à diminuer dans ces parcelles. Les rotations Blé/maïs par exemple favorisent le Chénopode blanc, la Morelle en parcelle labourée et plutôt l'Amarante, le Séneçon ou le Ray-grass en semis direct (Figure 4). Les graminées estivales (Panics, Sétaires) sont plus présentes dans les systèmes simplifiés, surtout en monoculture de maïs.

Le désherbage mécanique, un moyen curatif de lutte contre les adventices annuelles

Des outils de désherbage existent comme la herse étrille, la houe rotative ou la bineuse, qui peuvent également être utilisés pour la technique du déchaumage. Le choix du type de désherbage dépend du type de culture, de son stade et du type d'adventices. D'autres études ont montré que le désherbage mécanique effectué trop tôt n'est pas non plus la meilleure solution car il ne prend pas en compte les adventices qui germent plus tard *(Bond et al., 2003)*. Le désherbage mécanique doit se faire par temps sec et il ne doit pas pleuvoir dans les 2 à 5 jours qui suivent pour que l'efficacité soit optimale.

Il existe d'autres techniques de gestion des adventices, moins répandues, comme l'air compressé injecté pour déraciner les petites adventices ou le désherbage thermique *(Bond et al., 2003)*.

Un des points faibles du désherbage mécanique est que les fenêtres météo favorables sont rares avant mars ce qui est un frein pour ce levier. Le désherbage doit se faire en conditions sèches pour éviter de nouvelles levées d'adventices. La lutte mécanique doit aussi se préparer dès le semis car elle conditionne le nivellement du sol, les densités et les écartements choisis *(Gautellier and Bonin, 2017)*.

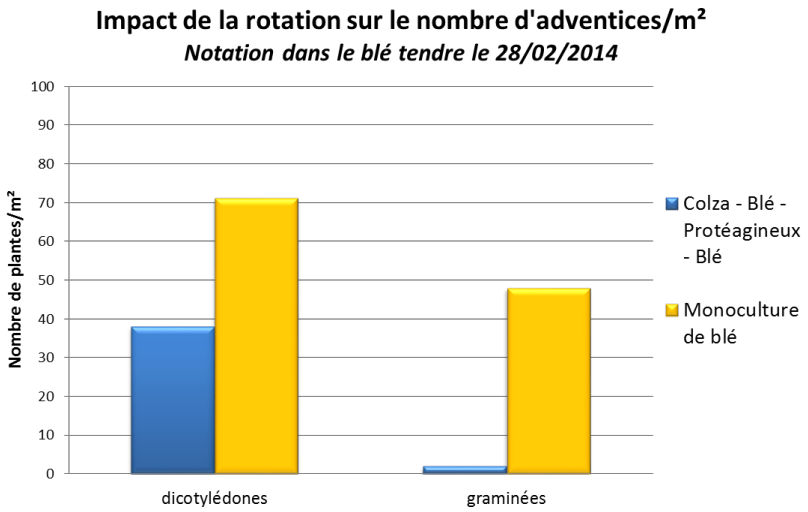


Figure 5 : Comparaison de deux rotations sur la présence de deux classes d'adventices les dicotylédones et les monocotylédones. (Aliaga et al., 2015)

Tableau III : Types d'adventices favorisés en fonction de la rotation (Gautellier Vizioz, 2015)

Rotations principales	**Adventices favorisées**
Colza/Blé/Orge	Graminées automnales, Géraniums
Maïs grain/Blé	**Graminées estivales (Panics, Sétaires, Digitaires), Ray-grass, Ambroisie (Est et Sud-Ouest), Pâturin**
Blé/Tournesol	Ray-grass, Ambroisie
Maïs grain	Graminées estivales, Liseron, Datura
Blé/Colza/Orge/Tournesol	Ray-grass, Ambroisie
Maïs fourrage/Blé/Prairies temporaires	Pâturin
Blé/Pdt/Betterave	Vulpin, Ray-grass, Mercuriale

Le déchaumage et/ou faux semis, une intervention indispensable ?

En enfouissant les chaumes et restes de paille, le déchaumage facilite la décomposition desrésidus de récolte, la lutte contre les limaces et le semis des cultures suivantes *(Pauget, 2015)*. Le déchaumage peut aussi servir de faux semis en préparant un lit de semences assez fin pour faire germer les graines d'adventices et ensuite les détruire juste avant le semis de la culture *(Labreuche et al., 2014)*. Cette technique du faux semis n'est cependant pas mise en œuvre ou très peu dans les essais de longue durée de Boigneville, faute de succès.

b) La diversification de la rotation culturale comme autre moyen de prévention

Il existe beaucoup de leviers agronomiques qui peuvent être utilisés pour prévenir ou lutter contre les adventices comme le décalage dans la date de semis, l'écartement entre les rangs et la densité de semis, l'utilisation de variétés plus compétitrices, les associations culturales, la récupération des menues pailles… Tous ces leviers ont déjà été testés au champ et ont montré des améliorations selon les cas mais il faut veiller à ne pas favoriser leurs effets négatifs sur d'autres facteurs comme la pression des maladies et de certains bio-agresseurs due à une date de semis trop précoce ou une densité de semis trop grande. Les coûts de mise en œuvre, leur problème de faisabilité sont aussi des causes de leur utilisation non systématique.

La tendance actuelle est la simplification des itinéraires et le raccourcissement des rotations, ce qui favorise certaines populations d'adventices. Or alterner des cultures de printemps/été avec des cultures d'hiver permet une diversification de la succession culturale ce qui casse le rythme des adventices et permet la mort naturelle des graines dans le sol, avec le temps *(Gautellier et al., 2017)*. Une rotation d'au moins 4 ans avec 2 cultures d'hiver et 2 cultures de printemps semble être le meilleur compromis pour réduire la quantité d'adventices *(Anderson, 2005)*. Un essai conduit par Arvalis Institut du Végétal à Epieds (27) a montré l'effet positif de la rotation longue pour casser le cycle des adventices (Figure 5).

Des graminées comme les graminées estivales (Panic pied de coq, Sétaire spp, Digitaire spp), le Pâturin ou le Ray-grass sont très fréquentes dans les rotations Maïs/Blé qui font partie des rotations étudiées dans l'essai travail du sol de Boigneville (Tableau III).

L'introduction de couverts végétaux pendant l'interculture est également un des leviers de lutte contre les adventices. Le radis fourrager, la moutarde ou le seigle sont parmi les plus compétiteurs face aux adventices *(Kruidhof et al., 2008)*. Néanmoins, dans de nombreux autres cas, il a été vu que cela n'apportait pas d'amélioration (en cas de problème de levée du couvert par exemple). Des essais conduits au champs ont aussi montré l'effet inhibiteur de certains couverts végétaux (effet allélopathique) comme l'avoine, sur la croissance des adventices pour la culture suivante *(Valantin-Morison et al., 2008)*.

c) Combinaison de plusieurs leviers (rotation, variétés semées, travail du sol…)

Ce sont les systèmes qui combinent le plus de leviers agronomiques (labour, faux semis, rotation…) qui sont les moins infestés au bout de neuf ans de rotation dans l'essai d'Epieds *(Aliaga et al., 2015)*. Le labour reste un des meilleurs leviers agronomiques pour faire face aux adventices dans les rotations courtes ou lorsque la situation est critique, notamment parce qu'il permet de limiter les conséquences d'un échec de désherbage.

En agriculture biologique, le labour est presque toujours indispensable pour gérer les adventices car l'utilisation d'herbicides est interdite. Un labour une fois tous les 3-4 ans permet d'éviter de remonter des semences encore viable à la surface *(Gautellier and Bonin, 2017)*. Le non labour offre une bonne gestion des adventices en situation saine mais il doit s'accompagner de rotations longues et d'autres leviers dans une démarche de protection intégrée comme le semis tardif pour éviter une trop grande infestation *(Michel, 2015)*.

Pour faire face à cette demande croissante de solutions alternatives pour la lutte contre les adventices, de nouveaux systèmes de cultures doivent être pensés. Mais à cause de la diversité des techniques culturales et de leurs effets souvent répercutés sur du long terme, l'utilisation de modèles pour tester de nombreuses situations culturales apparaît comme nécessaire.

3) Les modèles de suivi des adventices

a) Présentation des modèles

Le suivi et l'analyse d'un système de culture peut se faire de plusieurs manières :

- Par expérimentation système, mais les expériences sont chères et doivent durer plusieurs années. Il y a souvent beaucoup de mesures à faire ce qui peut être parfois fastidieux.
- Par expérimentation chez des agriculteurs, ce qui est long et couteux également.
- Par le biais de modèles, peu chers, avec la possibilité de faire des simulations sur du long terme. La multiplicité des techniques de culture et de leurs interactions sur les adventices ne permet pas une évaluation de toutes les combinaisons sur des essais au champ. C'est pourquoi l'utilisation de modèles est complémentaire.

Des modèles ont donc été développés pour répondre à cette demande comme par exemple OdeRA, WECOF-DSS, FLORSYS, ALOMYSYS…

WECOF-DSS est un modèle utilisé pour optimiser la gestion des adventices dans la culture du blé en agriculture biologique. Il est issu d'un projet de la Commission Européenne appelé "Strategies of Weed Control in Organic Farming". L'utilisateur doit renseigner différentes informations sur le climat, le type de sol, la rotation, le niveau de fertilisation, la flore présente et le niveau d'infestation, la densité et la date de semis, le labour, le désherbage mécanique. Les préconisations données par le modèle concernent par exemple le choix variétal, le désherbage mécanique ou le travail du sol. Ce modèle fonctionne comme un outil d'aide à la décision. *(Agrotransfert, 2009)*.

OdERA-Systèmes est aussi un outil d'aide à la décision car il permet avec peu de données d'entrée de visualiser l'impact du système de culture et des pratiques agronomiques utilisées sur le risque de développement de différentes adventices, en identifiant l'effet de chacune des pratiques. OdERA-Systèmes n'est pas un outil de modélisation du développement des adventices et ne prend pas en compte le stock de semences de la parcelle, ni les données pédoclimatiques. Il exprime seulement un potentiel de risque, avec l'hypothèse que toutes les adventices capables de lever à une date donnée lèvent.

L'outil ne propose pas de stratégies de désherbage. C'est le conseiller agricole voire l'agriculteur qui le fait, en s'appuyant sur les résultats de l'outil, les fiches techniques présentes et son expérience de terrain *(Agrotransfert, 2009)*.

ALOMYSYS et FLORSYS sont quant à eux des modèles mécanistes qui simulent la dynamique pluriannuelle des adventices. ALOMYSYS, développé par l'INRA de Dijon, permet de simuler l'impact du système de culture sur les densités en Vulpin sur plusieurs années. Ce modèle a été développé dans le but de contrôler cette adventice avec moins voire pas d'herbicides *(Colbach et al., 2007)*. Le modèle FLORSYS, qui découle de ALOMYSYS, est un des rares modèles à quantifier les effets des systèmes de culture sur la dynamique de la flore adventice en interaction avec les conditions pédoclimatiques (texture du sol, données climatiques). C'est un modèle de champ virtuel mécaniste, plurispécifique et pluriannuel (plusieurs années ou décennies) : il prédit la dynamique plurispécifique des adventices en fonction de l'itinéraire technique et des conditions pédoclimatiques *(Colbach et al., 2014)*. Le modèle prédit les effets moyens des pratiques culturales sur la flore mais aussi la variabilité de ces effets selon les conditions climatiques et l'histoire culturale. Il intègre aussi des processus aléatoires pour prédire les effets insuffisamment connus pour une modélisation mécanique.

Des usages multiples sont possibles : comparer différents systèmes de culture existants et innovants (exemple : variétés tolérantes à des herbicides non-sélectifs) en termes d'impact de la flore adventice sur la biodiversité, la production agricole ou sur le risque d'apparition de résistances aux herbicides *(Colbach et al., 2017)*. Mais il permet aussi d'identifier des combinaisons de pratiques culturales permettant de concilier production agricole et faible usage d'herbicides. Enfin, il permet de concevoir des systèmes innovants *(Colbach et al., 2014b)*. Les systèmes sont généralement simulés sur une trentaine d'années et avec une dizaine de scénarios climatiques pour intégrer les effets sur le long-terme et évaluer la robustesse de la météo. C'est pourquoi l'utilisation d'un modèle dans ces contextes est indispensable car l'expérimentation en parcelle serait trop longue voire impossible pour avoir des résultats.

b) Evaluation de FLORSYS

Avant d'utiliser le modèle pour répondre à diverses questions de pratiques culturales, il est important de l'évaluer en comparant ses simulations à des observations indépendantes de terrain pour quantifier l'erreur de prédiction du modèle et son domaine de validité. FLORSYS a déjà été évalué par l'INRA dans plusieurs situations afin de déterminer sa capacité à prédire la dynamique de flore adventice et ses effets sur la culture, de déterminer dans quelles conditions le modèle peut être utilisé et enfin de voir sa sensibilité à la qualité des données d'entrée, parfois difficiles à déterminer *(Colbach et al., 2016)*. L'évaluation a été faite dans les régions suivantes : Aquitaine, Bourgogne, Poitou Charentes, mais aussi sur le site de l'INRA à Versailles-La Cage. La méthode utilisée par l'INRA a été de comparer des données simulées par le modèle avec des données observées en parcelles dans divers contextes agronomiques et pédoclimatiques.

Une série d'indicateurs statistiques a été utilisée pour mesurer cette divergence entre les données simulées et observées *(Colbach et al., 2016)*.

Les analyses de cette évaluation ont montré deux résultats principaux *(Colbach et al., 2016)* :

- Le modèle est bien adapté aux terres arables en présence de cultures annuelles dans les régions tempérées. Il est capable de classer différents systèmes de cultures et les espèces d'adventices correctement si l'espèce majoritaire de la région se trouve bien parmi les espèces paramétrées dans FLORSYS,
- Il y a beaucoup de variables d'entrée et elles sont parfois difficiles à déterminer, à mesurer ou à observer. La mesure du stock semencier initial, par exemple, est très longue et donc rarement faite. Cette mesure peut aussi passer à côté d'espèces d'adventices rares ou agrégées en taches dans la parcelle. Cependant, l'évaluation de FLORSYS a montré qu'il est crucial d'inclure les bonnes espèces adventices dans le stock semencier initial mais la densité exacte de leurs semences a peu d'effet sur les simulations. Quand la mesure du stock semencier initial n'est pas disponible, les mesures de densités initiales sont alors utilisées

II) Matériels et méthodes

1) Une démarche avec deux approches complémentaires

Pour étudier l'effet du travail du sol sur les adventices, deux approches complémentaires sont utilisées :

- L'approche expérimentale avec l'analyse descriptive et statistique de données issues des relevés de flore adventices dans les parcelles de l'essai « Travail du sol » de Boigneville.
- L'approche par modélisation avec l'utilisation d'un modèle mécaniste, qui prédit l'évolution de la flore adventice en fonction du contexte pédoclimatique et de l'itinéraire technique associé.

2) Approche expérimentale : relevés de flore sur l'essai « Travail du sol »

a) Dispositif expérimental

La station de Boigneville située dans l'Essonne (91) est composée de 12 hectares de moyennes parcelles et de 75 hectares de grandes parcelles pour faire de l'expérimentation, de l'acquisition de données et de références et de la mise au point d'outils d'expertise. L'essai « Travail du sol » est intégré dans un ensemble d'essais de la station intitulé « Essai travail du sol longue durée de Boigneville ». Il regroupe les essais « Travail du sol » (A1), « Rotation » (A2) et « Monoculture » (C et D).

Cet ensemble d'essais a été mis en place lors de la campagne 1970-71 dans le but de comparer techniquement et économiquement différentes modalités de travail du sol : labour, travail superficiel et semis direct. En effet, l'arrivée des techniques culturales sans labour a fait apparaitre de nombreuses interrogations tant sur le plan agronomique que sur la faisabilité de ces techniques *(Source interne Arvalis)*.

Tableau IV : Détails des 4 essais de l'Essai Travail du sol de longue durée de Boigneville

Nom de l'essai	**Rotation**	**Nombre de répétitions**	**Irrigation**	**Date évolution**	**Nouveau nom du bloc**	**Nouvelle rotation**	**Nombre de répétitions**	**Irrigation**
A (1971-1997)	Maïs grain/Blé tendre d'hiver	4	NON	1997-98	A1 (Travail du sol): 1997-2017	Maïs/blé	2	OUI
					A2 (Rotation): 1997-2017	Betterave sucrière-Blé-protéagineux-Orge printemps	1	
B (1971-1983)	Maïs grain/Blé tendre d'hiver	2	OUI	Achevé en 1983	Arrêt de cet essai			
C (1971-2010)	Monoculture de blé	1	NON	2010	C	Pois printemps-colza-blé-orge printemps,maïs, blé…	1	NON
D (1971-1994)	Monoculture maïs	1	OUI	Achevé en 1994	Arrêt de l'essai			

A l'origine, l'essai travail du sol de longue durée se décomposait en 4 essais, A, B, C et D, conduits en monoculture ou en rotation, comme l'illustre le tableau IV. Les essais A et B étaient conduits en rotation maïs grain-blé tendre d'hiver. L'essai A n'était pas irrigué. Dans l'essai B, le maïs et plus rarement le blé étaient irrigués. Les essais C et D étaient des monocultures de blé et de maïs conduits sans répétition.

L'essai a évolué au fur et à mesure du temps. A partir de l'année 1983 l'essai B a été abandonné. L'essai A a été coupé en 2 (A1 et A2) jusqu'en 2016-17. L'essai A1 dit « Travail du sol » présente une rotation Maïs grain-Blé tendre d'hiver avec irrigation du Maïs grain. Il s'inscrit dans la continuité de l'essai A, avec une différence au niveau de l'irrigation. L'essai A2 dit « Rotation » présente une rotation betterave sucrière-blé tendre d'hiver-protéagineux-orge de printemps. L'essai A1 et A2 sont illustrés en Annexe 1.

Ces essais sont avant tout des essais analytiques qui comparent différents facteurs (travail du sol, exportation des pailles, cultures intermédiaires, traitements fongicides…). Les autres éléments de l'itinéraire comme la nature des semences, les dates de semis et de récolte, les herbicides (sauf pour le glyphosate) sont identiques quelle que soit la modalité et gérés de manière à ne pas générer de facteur limitant. Les interventions sont déclenchées en se basant sur la parcelle la plus infestée en adventices ou la plus touchée par une maladie ou un ravageur *(Source interne Arvalis).*

Notre analyse se concentre seulement sur **l'essai travail du sol A1**. Cet essai comporte trois grands types de travail :

Modalités avec labour (L0) : retournement du sol tous les ans par un labour pour enfouir les résidus de culture et les adventices mais également pour permettre la restructuration du sol, le mélange des horizons, la préparation du lit de semences… Le labour est fait avec une charrue équipée de rasettes, à une profondeur de 25 cm les premières années de l'essai, puis 20 cm dernièrement.

D'autres types de travail du sol (déchaumage, faux semis, reprise de labour, etc.) sont également présents et varient selon les années

Modalités avec travail superficiel (L1 et L'1) : il y un travail du sol tous les ans sur une profondeur limitée (10 cm les premières années puis 5 cm) afin de limiter les coûts et le temps de travail, permettre un enfouissement partiel des résidus de culture, une restructuration partielle du sol, un mélange superficiel des horizons et une préparation du lit de semences, avec pratique de faux semis sur L1 à partir de 2005.

Modalités en semis direct (L2 et L'2) : le sol n'est perturbé qu'au niveau de la ligne de semis. Le but est de limiter les coûts et le temps de travail, de ne pas perturber l'activité biologique ou la localisation de la matière organique en surface, de laisser un mulch en surface pour protéger le sol et limiter les adventices. Une perturbation du sol un peu plus forte a été réalisée sur la modalité L'2 (travail superficiel avec un semoir Horsch SE ou strip till).

Les résidus de culture sont gérés de la manière suivante :

Tableau V : Description des différents facteurs étudiés de l'essai travail du sol longue durée de Boigneville (issue de source interne Arvalis)

Essai	**Années**	**Cultures**	**Dispositif**	**Taille des parcelles**	**Facteurs étudiés**
« A1 » dit « Travail du sol »	1998-2017	Maïs-blé	Split-plot 2 répétitions	400 m² = 50*8 m	**10 modalités : L0N, L0C, L1N, L1C, L'1N, L'1C, L2N, L2C, L'2N, L'2C** Travail du sol L0 (labour), L1 (Travail superficiel) et L2(semis direct) Exportation (L') ou pas (L) des résidus (étés 82 à 93). Cultures intermédiaires (C) ou sol nu (N) avant maïs à partir de l'été 2001 (maïs 2002 à 2015)

Tableau VI : Années et périodes où les comptages ont été faits dans l'essai travail du sol (en vert : blé, en jaune : maïs, en bleu : en période d'interculture (sol nu ou couvert)) :

Année	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
2011								IC	
2012					blé			maïs	IC
2013					blé				
2014					blé			maïs	
2015		blé			maïs				
2016									
2017	blé								

Modalités en L : les résidus de culture de blé ET de maïs ont été systématiquement restitués et broyés du début à la fin de l'essai.

Modalités en L' : de 1982 à 1993, les résidus de culture de blé et de maïs ont été exportés. Avant cette période les résidus de culture ont été systématiquement restitués, éparpillés et broyés. Après cette période, les résidus de maïs ont été restitués au champ et les pailles de blé éparpillées et broyées. De plus, deux comparaisons de broyage des résidus de maïs ont eu lieu : de 2003 à 2012 avec broyage sur L1 et aucun sur L'1 ; de 2007 à 2012 avec broyage sur L'2 et aucun sur L2. Ces comparaisons ont permis d'étudier l'impact du broyage de résidus de maïs sur les mycotoxines sur blé. Les différentes modalités de l'essai A1 sont illustrées dans le Tableau V. L'essai comporte deux répétitions (bloc I et II) selon le point d'entrée de la rotation (maïs ou blé). D'autres particularités caractérisent les différences entre les modalités L et L', comme le matériel utilisé pour le semis ou la reprise de labour. Ces dernières sont détaillées en Annexe 2 et 3.

b) Acquisition des données et mise en place de la base de données

Différentes mesures ont été effectuées dans les essais, de manière régulière ou ponctuelle comme la mesure des composantes de rendement, les teneurs en protéines, l'humidité du sol, la biomasse, les reliquats azotés, les analyses de sol… Parmi elles, les relevés de flore adventice et de stock semencier ont pu être effectués quand cela était possible. Ces relevés ont été faits sur deux périodes durant ces 40 années d'essai :

- Période 1970-1980
- Période 2010-2017

Les données récupérées des années 70 sont très sommaires. Les valeurs sont données par modalité, sans détails des relevés par parcelle élémentaire et par cadre (Annexe 4). Seule une analyse graphique a pu être faites sur ces données.

Dans les années 2010, la notation est effectuée avec des relevés par cadres de 0.25 m². Il y a eu entre 6 et 12 cadres lancés par parcelle élémentaire (Annexe 1 : illustration d'une parcelle élémentaire). Le cadre est lancé dans la parcelle de manière à ce que la répartition des relevés soit homogène. Le nombre de plante est compté pour chaque espèce présente dans le cadre.

Le stade des adventices n'a pas été noté dans les deux périodes.

c) Examen préliminaire des données des années 2010

Des représentations graphiques ont été faites pour apercevoir les grandes tendances et pouvoir faire un premier tri des données. Le Tableau VI récapitule les années où il y a eu des comptages en culture ainsi que les périodes durant lesquelles ont été faits les relevés de flore.

Il y a un décalage dans les relevés à partir de 2015 suite au projet ANR COSAC où il a été décidé qu'ils devaient maintenant être faits préalablement par cadre à la fermeture du rang puis à l'echelle de Barralis à la période de récolte. Cette notation est effectuée en donnant des classes de densité moyennes par espèce, en fonction de ce qui a été vu globalement sur la parcelle. Cela apporte un biais pour l'analyse car il se peut que ce ne soit pas les mêmes espèces d'adventices rencontrées ni les mêmes densités suivant la période de relevé.

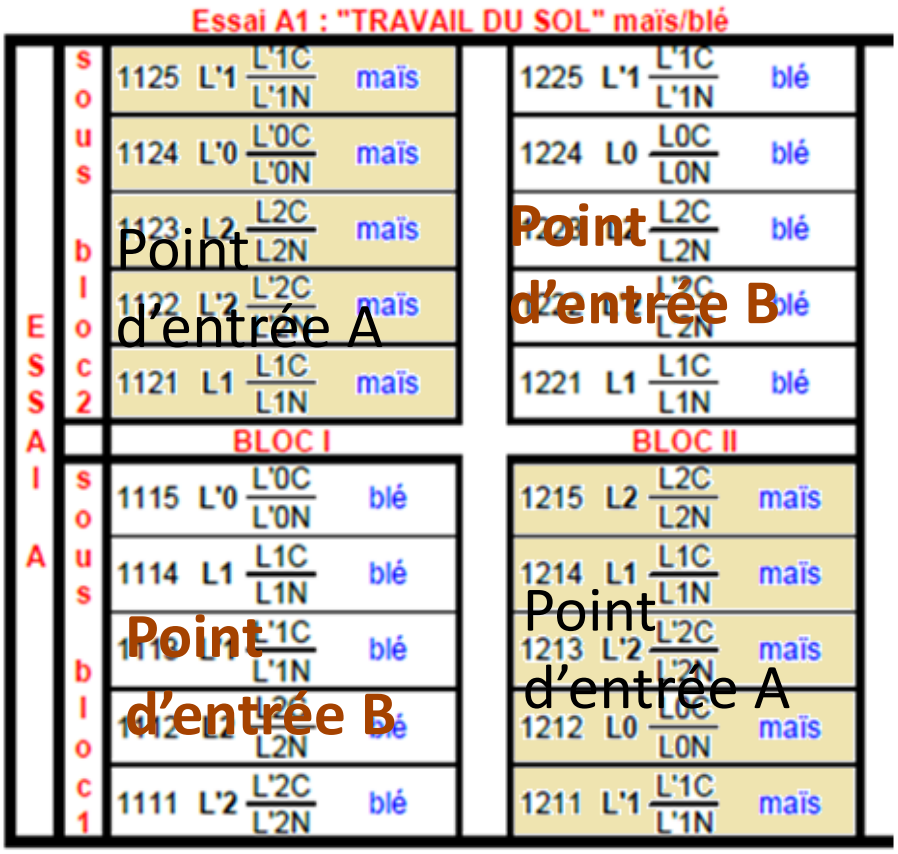


Figure 6 : Détail des deux points d'entrée : Point d'entrée A (Rotation Maïs/blé) et point d'entrée B (rotation Blé/Maïs)

Pour le blé, les relevés ont été faits tous les ans sauf en 2016. Pour le maïs, il y a seulement 3 années de relevés. Les relevés pendant la période d'interculture n'ont été faits que sur deux années consécutives et donc sur des parcelles différentes entre ces deux années. Ils sont donc difficilement exploitables mais peuvent appuyer certaines observations faites en culture.

Plusieurs facteurs entrent en jeu dans cet essai. D'abord, le type de travail du sol peut jouer sur la composition de la flore adventice. Il y a aussi la gestion des résidus de culture (broyage, exportation) qui peut impacter la flore. L'exportation des résidus peut par exemple permettre l'exportation de certaines semences d'adventices ou encore le broyage des résidus permet de créer un mulch qui empêche la germination des semences d'adventices. Les modalités L0, L1, L'1, L2, L'2 seront analysées séparément dans le modèle statistique du fait d'une gestion différente des résidus de culture, du matériel agricole utilisé et du travail du sol. Le type de culture (période de semis différente) ou le point d'entrée de la rotation (Figure 6), peuvent également influencer la flore. Le point d'entrée A (PE-A) présente des parcelles en blé les années paires (années de récolte) et en maïs les années impaires. Pour le point d'entrée B (PE-B) c'est l'inverse, les parcelles sont en maïs les années paires et en blé les années impaires. Cet essai est présenté avec deux répétitions et les deux cultures de la rotation (maïs/blé) apportent un facteur en plus dans l'analyse. Sur une parcelle donnée, la culture change chaque année. Le même stock semencier s'exprimera donc différemment selon les conditions de l'année et la culture en place. Enfin, la période d'interculture entre le blé et le maïs, différente selon si le sol était couvert (C) ou non (N), a aussi pu influencer la flore pendant les 14 ans.

Plusieurs caractéristiques de la flore adventice, susceptibles d'être impactées par les facteurs précédents, ont été étudiées :

-**la densité (abondance)** en adventices exprimée en nombre de plantes/m²,

-**la richesse spécifique** qui signifie le nombre d'espèces rencontrées par unité de surface,

-**le type biologique** des adventices présentes,

-**la période de germination** des adventices,

-**l'indice de Pielou** (indice mesurant l'équitabilité entre les communautés d'adventices).

Pour l'abondance, les valeurs de densité pour chaque espèce trouvée étaient indiquées en nombre de plantes/cadres. A partir de ces données, des valeurs de densités en nombre de plantes/m² ont été calculées. Cela a permis de calculer une valeur de densité totale (somme des densités en plantes/m², toute espèce confondue) par cadre. En faisant la moyenne de toutes les densités totales par cadre, on obtient une densité totale moyenne par parcelle élémentaire mais aussi par modalité (1 modalité correspond aux 2 répétitions de la parcelle élémentaire). Le détail de calcul de l'abondance est présenté en Annexe 5.

Les valeurs de richesse spécifique (nombre d'espèces différentes) par cadre ont aussi été calculées. Ces données ont permis de calculer des valeurs de richesse spécifique moyenne par parcelle élémentaire et aussi par modalité. Le détail de calcul de la richesse spécifique est présenté en Annexe 6.

Pour chaque espèce trouvée, le type biologique (dicotylédone/monocotylédone, annuelle/vivace) et sa période de germination ont été renseignés. Les informations qui ont permis de compléter la base de données viennent du travail de Camille Frottier qui a effectué son stage sur les adventices chez Arvalis Institut du végétal en 2016.

Des valeurs de l'indice de Pielou ont également été calculées. Cet indice est maximal quand les espèces ont des abondances identiques dans le peuplement et il est minimal quand une seule espèce domine tout le peuplement. L'indice de Pielou ne peut être calculé que s'il y a au moins deux espèces différentes dans un même cadre, or ceci représente moins de 10 % des relevés dans notre cas. Cette variable n'a donc pas pu être analysée.

Les analyses graphiques et statistiques des données ont été faites sur Excel et sur le logiciel R.

d) Analyse des données des années 2010

L'analyse statistique a été faite sur les années 2012, 2014 et 2015, seules années où les comptages ont été complets. Comme il y a plusieurs dates de mesures sur les mêmes parcelles élémentaires, le modèle choisit pour l'analyse statistique est un modèle linéaire à données répétées.

Trois modèles ont été proposés pour l'analyse :

- Modèle linéaire simple
- Modèle linéaire avec autocorrélation par année, qui prend en compte le lien entre les différentes années.
- Modèle linéaire avec prise en compte de l'hétérogénéité éventuelle des variances

Après avoir testé ces trois modèles, c'est le modèle linéaire simple qui a été retenu pour les deux variables : richesse spécifique et abondance.

Pour la richesse spécifique moyenne :

Modèle = lme (Richesse spécifique ~ Point d'entrée * Modalité * Interculture + Année + Modalité : Année + Point d'entrée : Année + Interculture : Année)

Ce modèle prend en compte les effets de la modalité, du point d'entrée, de l'interculture et de leur interaction mais aussi l'effet de l'année de mesure et de son interaction avec chacun des autres facteurs. Les autres interactions n'ont pas été prises en compte car cela complexifierait trop le modèle sur le peu d'années de relevés. Les postulats de l'analyse de variance ont été validés et sont illustrés en Annexe 7.

Pour l'abondance totale moyenne :

Modèle = lme (log (Densité totale+1) ~ Point d'entrée * Modalité* Interculture + Année + Modalité : Année + Point d'entrée : Année + Interculture : Année)

Ce modèle utilise le log de la densité totale pour linéariser et mieux répartir les données. Le log a permis de respecter les 3 postulats de l'analyse de variance (Annexe 8). Les facteurs pris en compte ainsi que leurs interactions sont les mêmes que pour l'analyse de la richesse spécifique.

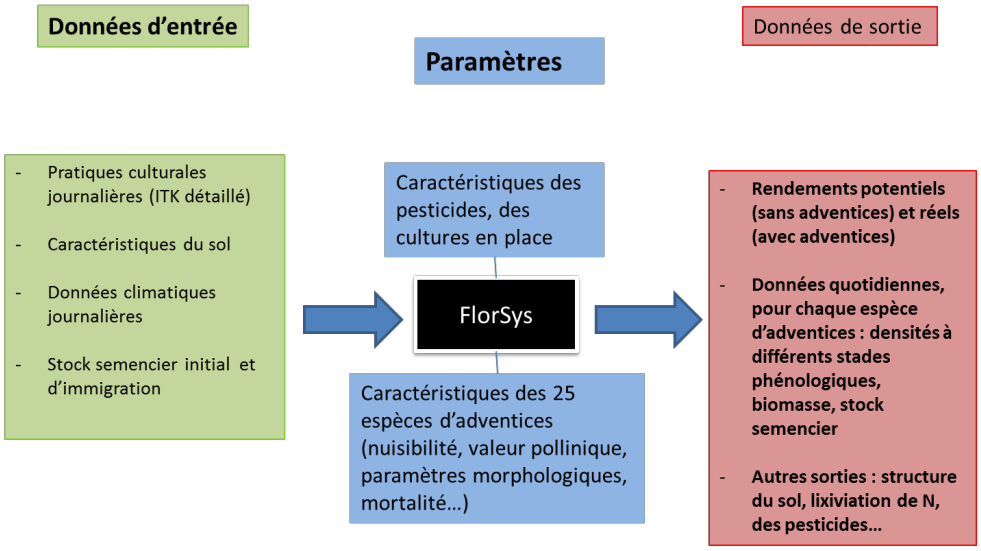


Figure 7 : Schéma simplifié de fonctionnement du modèle FlorSys

Tableau VII : Liste de 25 espèces paramétrées dans FLORSYS

Espèce	**Code espèce EPPO**	***Nom commun***
Abutilon theophrasti	ABUTH	Abutilon d'Avicenne
Alopecurus myosuroides	ALOMY	Vulpin des champs
Amaranthus retroflexus	AMARE	Amarante réfléchie
Ambrosia artemisiifolia	AMBEL	Ambroisie à feuilles d'armoise
Avena fatua	AVEFA	Folle avoine
Capsella bursa-pastoris	CAPBP	Capselle bourse-à-pasteur
Chenopodium album	CHEAL	Chénopode blanc
Datura stramonium	DATST	Stramoine commune
Digitaria sanguinalis	DIGSA	Digitaire sanguine
Echinochloa crus-galli	ECHCG	Panic pied-de-coq
Galium aparine	GALAP	Gaillet gratteron
Geranium dissectum	GERDI	Géranium disséqué
Matricaria perforata	MATIN	Matricaire inodore
Mercurialis annua	MERAN	Mercuriale annuelle
***Panicum miliaceum* L.**	PANMI	Millet commun
Poa annua	POAAN	Pâturin annuel
Polygonum aviculare	POLAV	Renouée des oiseaux
Fallopia convolvulus	POLCO	Renouée faux liseron
Polygonum persicaria	POLPE	Renouée persicaire
Senecio vulgaris	SENVU	Séneçon commun
Solanum nigrum	SOLNI	Morelle noire
Sonchus asper	SONAS	Laiteron rude
Stellaria media	STEME	Stellaire intermédiaire
Veronica hederifolia	VERHE	Véronique à feuilles de lierre
Veronica persica	VERPE	Véronique de perse

Pour les types d'adventices et leur période de germination :

Une analyse graphique a été réalisée.

3) Approches par modélisation

a) Données utilisées

Le modèle qui est utilisé est le modèle FLORSYS. Un schéma simplifié du modèle est présenté Figure 7. Ce modèle est paramétré avec 25 espèces d'adventices annuelles rencontrées fréquemment en cultures arables (Tableau VII). Le comportement des espèces d'adventices mais aussi des espèces cultivées est déterminés par une série de caractéristiques (dormance, profondeur de germination, plasticité morphologique…). Les effets des techniques culturales sur les processus et stades de vie sont très détaillés, avec un focus particulier sur l'effet du travail du sol. Ce dernier enfouit et remonte les semences adventices, lève des dormances et stimule des germinations, arrache et enfouit des plantules. L'importance des différents effets dépend de l'outil utilisé et son réglage, la profondeur et la vitesse de travail… Les stades des espèces dépendent aussi des conditions biophysiques. Les conditions favorables à la germination ont aussi été paramétrées, avec des conditions d'humidité et de température.
Ce modèle prédit la densité en adventices et leurs impacts sur la biodiversité et la production agricole en fonction :
-des données météorologiques journalières (température moyenne, température minimale et maximale, l'ETP (Evapotranspiration du sol), les précipitations et le rayonnement journalier)
-des caractéristiques du sol : texture, profondeur… (détails en Annexe 9)
-du système de culture (itinéraire technique détaillé en Annexe 10)
-une densité initiale en adventices calculée à partir d'un stock semencier mesuré

Les espèces les plus problématiques sur la station sont les Graminées estivales mais aussi le Ray-Grass, qui n'est pas paramétré dans FLORSYS. Il peut être remplacé par le Vulpin des Champs, qui a des caractéristiques proches, même si la période de germination du Ray Grass est plus étendue (Tableau VIII). Ces deux graminées annuelles sont très problématiques dans les grandes cultures. Les espèces les plus problématiques dans notre cas d'étude sont assez bien représentées par les espèces paramétrées dans FLORSYS (soit elles sont présentes, soit il y a une espèce proche). Il y a bien-sûr des espèces retrouvées dans l'essai mais qui ne sont pas paramétrées dans le modèle comme l'Arroche ou le Pissenlit, mais leurs densités observées sont très faibles par rapport à d'autres espèces, l'impact sur les résultats de la simulation sera donc faible, même si les effets de compétition sont pris en compte dans le modèle.

L'itinéraire technique des 20 modalités de l'essai a été renseigné dans les fichiers d'entrée du modèle (Annexe 10). Ces 20 modalités correspondent aux 10 modalités du PE-A et 10 modalités du PE-B qui ont chacune 2 répétitions (blocs I et II). Les opérations de semis, récolte, travail du sol, désherbage, broyage, traitements fongicides et insecticides sont renseignées. Les pesticides sont renseignés avec leur nom commercial ou un produit analogue. Certains herbicides de l'essai travail du sol n'étaient pas paramétrés dans le modèle.

Tableau VIII : Comparaison des caractéristiques du Vulpin des Champs et du Ray grass (Infloweb, 2012) (Rodriguez and Mamarot, 2014)

	Type biologique	**Période germination**	**Période floraison**	**Type de cultures et de sol**	**Profondeur levée**	**Production semencière (par plante)**	**Dormance des semences**	**Persistence du stock semencier**
Vulpin des champs	Annuel	Janvier-Avril et Octobre-décembre	Avril-Juillet	Assolements à cultures d'hiver, sols humides à nitrophiles	2 cm (mais peut germer jusqu'à 10 cm)	500 à 5000	Faible à moyenne	Faible
Ray-grass	Annuel-bisannuel	Janvier - Décembre	Juin-septembre	Assolements à cultures d'hiver, Sols humides à nitrophiles	1-2 cm (mais peut germer jusqu'à 5 cm)	500 à 5000	Faible	Faible

Il fallait alors les paramétrer en enregistrant les noms, la matière active, la quantité appliquée et les effets sur la flore (effet foliaire ou racinaire, systémique ou non, quel type de flore est touché, quelle efficacité…) selon les informations données par leur fiche technique. Pour les cultures, différentes variétés de blé ou de pois sont proposées dans le modèle. Si la variété utilisée n'a pas été paramétrée dans le modèle, des parallèles sont faits selon les caractéristiques des différentes variétés (Annexe 11).

Pour les données initiales en adventices, le mieux est d'avoir un stock semencier mesuré. Dans notre cas, ce sont les densités moyennes issues des relevés des années 2010 qui ont servi de données initiales pour le modèle. Avec la simulation sur plusieurs années et les itinéraires techniques détaillés, la flore adventice s'ajuste au contexte donné. Il faut néanmoins veiller à ne pas faire d'impasse sur les espèces initiales car si elles ne sont pas renseignées initialement, elles n'apparaitront jamais dans les sorties

Au total, 11 années d'itinéraire ont été renseignées dans le modèle : de 2006 à 2016 (années de récolte). L'évaluation du modèle par l'INRA s'est faite sur des durées de 7 à 24 ans *(Colbach et al., 2016)*. Onze ans permettent donc d'allonger suffisamment la période de simulation pour affiner les résultats mais sans trop s'éloigner de la période à laquelle se sont faites les observations en parcelles : les années 2010.

Chaque système de culture est simulé avec 10 répétitions pour prendre en compte les processus aléatoires du modèle (exemple : placement des plantes). L'évaluation a montré que c'est le nombre minimal de répétitions nécessaires pour bien prédire la flore.

b) Comparaison des données simulées et observées

Le modèle a déjà été évalué *(Colbach et al., 2016)* mais il a semblé important de vérifier que ce dernier soit adapté au contexte pédoclimatique de la station de Boigneville et aux systèmes de cultures mis en place. Cette évaluation permettra dans un premier lieu de s'approprier le modèle et aussi de connaître le risque d'erreur et sa précision dans notre situation.

Lors de la simulation, deux données de sorties importantes sont calculées quotidiennement, la densité de chaque espèce d'adventice à différents stades phénologiques et leur biomasse. Pour notre étude, la comparaison des densités en adventices sans distinction du stade a suffi pour évaluer le modèle, étant donné que le stade phénologique n'a pas été mesuré expérimentalement. L'évaluation s'est faite à l'échelle journalière : comparaison des données simulées et observées aux dates d'observation en parcelle.

L'abondance observée par modalité, toutes espèces confondues (même celles non paramétrées dans FLORSYS) a été comparée avec l'abondance simulée par modalité, toutes espèces confondues, avec le détail de calcul en Annexe 12.

Pour ces deux échelles de comparaison, plusieurs indicateurs d'évaluation ont été calculés.

Les formules des calculs de ces indicateurs sont présentées en Annexe 13.

- **RMSEP** (Root Mean Square Error Prediction) : l'erreur de prédiction moyenne. Plus

la valeur est faible, plus l'erreur de prédiction est faible et donc la modélisation est bonne. Les valeurs de RMSEP ont été corrigées pour donner la $\boldsymbol{RMSEP_{corr}}$ en prenant en compte la variance des observations mais aussi des simulations. Pour les données observées, la moyenne des variances intercadres, toutes dates et toutes modalités confondues a été calculée. Pour les données simulées, afin de se mettre à la même échelle de variance que les données observées, nous avons considéré que les 10 répétitions des simulations de chaque modalité correspondaient à 10 cadres lancés dans la modalité. La moyenne des variances inter « répétitions », toutes dates et toutes modalités confondues a aussi été calculée (Détails des calculs en Annexe 14). La $RMSEP_{corr}$ qui correspond alors à l'erreur de prédiction moyenne, a été divisée par $\frac{1}{2}[valeur\ maximale\ observée - valeur\ minimale\ observée]$ pour obtenir l'erreur relative $\boldsymbol{RRMSEP_{corr}}$ qui permet de faciliter la comparaison entre les RMSEP des différentes modalités.

- **Coefficient de Pearson (r)** : Plus l'indice r est proche de 1, plus la corrélation est positive entre les données observées et simulées, c'est-à-dire le modèle classe correctement les situations (champs, années et/ou espèces) même s'il peut sur ou sous-estimer les densités.
- **L'efficience du modèle (EF)** : Elle définit la capacité du modèle à prédire la valeur d'une variable de sortie. Plus la valeur se rapproche de 1, meilleure est l'adéquation entre les valeurs observées et simulées.
- **Le biais du modèle** (B), ainsi qu'une comparaison de sa valeur à zéro, à l'aide d'un test de Student : détermine si le modèle sur ou sous-estime automatiquement les variables de sortie.

L'analyse statistique des données simulées a également été faite en utilisant le même modèle sur l'abondance que les données observées, après avoir préalablement passé les données en log (abondance +1).

III) Présentation des résultats

1) Analyse des données expérimentales

Dans cette partie, l'effet du travail du sol, du couvert en période d'interculture, du positionnement de la parcelle (point d'entrée), de l'année de relevé mais aussi du type de culture ont été analysés sur leur effet sur l'abondance, la richesse spécifique, mais aussi sur le type biologique et la période de germination des adventices présentes.

Une analyse graphique préalable a été faite avec les données issues des relevés des années 1970 pour voir si des résultats intéressants pouvaient être observés. Ce qu'il en est ressorti est que durant le démarrage de l'essai, il y avait peu de différence d'abondance entre les trois modalités de travail du sol. De plus, beaucoup d'espèces présentes dans les années 1970 ont totalement disparu dans les années 2010 comme les Véroniques, la Sagine, le Vulpin ou le Rumex. Ces espèces étaient par ailleurs peu représentées car avaient une densité inférieure à 1 plante/m².

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	66	175.181	<.0001
Point_entree	1	1	7.163	0.2276
Modalite	4	8	14.227	0.0010
Interculture	1	10	0.205	0.6599
Annee_fact	2	66	22.532	<.0001
Point_entree:Modalite	4	8	3.702	0.0544
Point_entree:Interculture	1	10	1.926	0.1953
Modalite:Interculture	4	10	1.197	0.3700
Modalite:Annee_fact	8	66	0.351	0.9416
Point_entree:Annee_fact	2	66	4.365	0.0166
Interculture:Annee_fact	2	66	0.327	0.7215
Point_entree:Modalite:Interculture	4	10	1.232	0.3575

Figure 8 : Résultats de l'Anova pour la richesse spécifique

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	65	145.176	<.0001
Point_entree	1	1	9.406	0.2006
Modalite	4	8	12.700	0.0015
Interculture	1	10	0.000	0.9802
Annee_fact	2	65	12.539	<.0001
Point_entree:Modalite	4	8	3.196	0.0759
Point_entree:Interculture	1	10	0.179	0.6804
Modalite:Interculture	4	10	1.653	0.2362
Modalite:Annee_fact	8	65	0.354	0.9405
Point_entree:Annee_fact	2	65	4.652	0.0129
Interculture:Annee_fact	2	65	0.262	0.7702
Point_entree:Modalite:Interculture	4	10	0.485	0.7463

Figure 9 : Résultats de l'Anova pour l'abondance

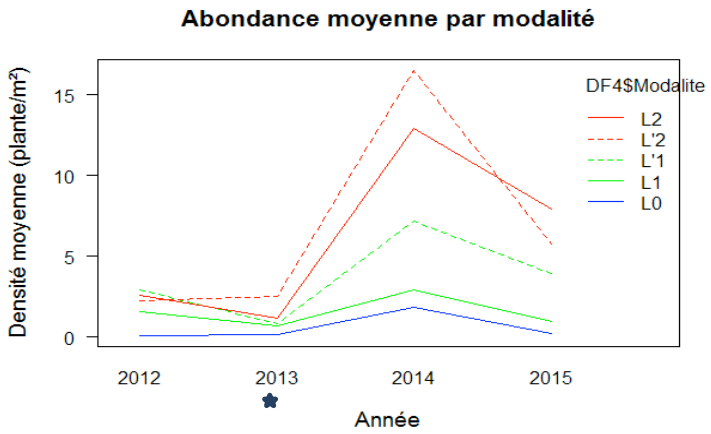


Figure 10 : Evolution de l'abondance selon les 5 modalités (Attention, en 2013, comptage uniquement sur culture de blé, donc cette année n'est pas prise en compte dans l'analyse statistique) L0 : Labour, L1 et L'1 : Travail superficiel, L2 et L'2 : Semis direct

D'autres espèces sont par ailleurs apparues depuis les années 70 comme le Ray-grass ou le Chardon. Il y a eu une généralisation de la flore adventice avec la conduite de l'itinéraire. Des espèces inféodées au bassin parisien comme la Gesse tubéreuse ou des espèces avec une préférence pour les terres argilo- limoneuses comme l'Alchémille des champs, l'Euphorbe exigüe ou la Fumeterre officinale ont disparu au profit d'espèces plus généralistes comme le Ray-grass ou le Panic pied de coq espèces nitrophiles et générales au territoire français *(Rodriguez et al., 2014)*.

Les herbicides utilisés sur l'essai ont grandement contribué à éliminer ces espèces d'adventices spécialistes. Les densités moyennes dans les parcelles en semis direct et travail superficiel sont proches de celles des années 70 mais cela vient du fait que des espèces comme le Panic pied de coq, le Chardon de champs ou la Renouée des oiseaux présentent des densités très élevées, signe d'une infestation dans la parcelle (Annexe 15).

a) Le travail du sol, l'année et le point d'entrée*année influencent la flore adventice

Les Figures 8 et 9 présentent les résultats de l'ANOVA pour la richesse spécifique et pour l'abondance, avec les modèles statistiques linéaires présentés en partie II) 2) d). Pour les deux variables, l'analyse du modèle montre un effet un effet significatif au seuil de 5% de la Modalité, de l'Année et de l'interaction Point d'entrée*Année.

Effet modalité (Travail du sol) :

Un des facteurs qui entrent en jeu dans l'effet sur la richesse spécifique et l'abondance est la modalité de travail du sol.

Au niveau de l'abondance, on observe une hiérarchie entre les différents types de travail du sol. La modalité en labour (L0) présente une abondance 2 fois plus faible que le travail superficiel L1 et jusqu'à 5 fois plus faible que L'1 selon les années. Le labour a également une abondance 3 à 7 fois plus faible que le semis direct (L2 et L'2) (Figure 10). La richesse spécifique montre la même tendance, avec une plus grosse différence entre les modalités en travail superficiel. La modalité L'1 a en effet une richesse spécifique non seulement supérieure à L1 mais aussi L2 et L'2 dans les années 2012, 2014 et 2015 (Figure 11).

Les moyennes ajustées de l'analyse de variance confirment les représentations graphiques comme l'illustrent les Figures 12 et 13. La richesse spécifique est significativement plus faible en labour, avec une moyenne de 0.12 espèces par cadre, que dans les autres modalités sauf pour une des modalités en travail superficiel, L1. La modalité L'1 présente la richesse spécifique moyenne la plus forte avec 0.6 espèces différentes en moyenne. Ces résultats montrent que malgré les différences, le nombre d'espèces différentes relevées reste très faible globalement.

Des espèces comme le Séneçon vulgaire, le Pâturin annuel ou les Renouées ne sont pas rencontrées dans des parcelles en labour par exemple. Les Renouées sont pourtant des espèces favorisées par des sols labourés avec des rotations courtes (*Infloweb, 2012)*. Elles ont une persistance de leur stock semencier forte. Le labour contribue à remonter leurs graines, ce qui permet leur germination. Dans notre cas, les parcelles en labour ne contiennent peut-être pas de semences de Renouées depuis plusieurs années, d'où leur absence dans les relevés.

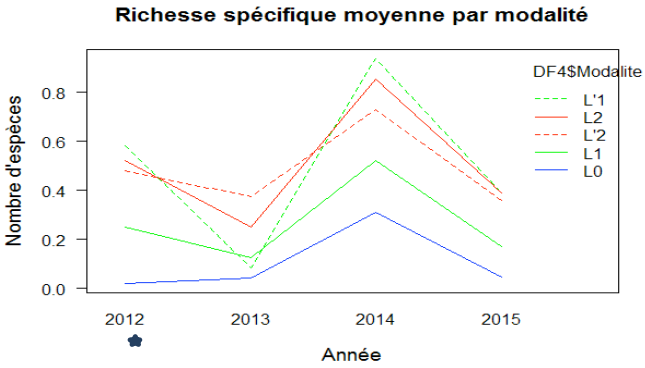


Figure 11 : Evolution de la richesse spécifique selon les 5 modalités (Attention, en 2013, comptage uniquement sur culture de blé, non pris en compte dans l'ANOVA) L0 : Labour, L1 et L'1 : Travail superficiel, L2 et L'2 : Semis direct

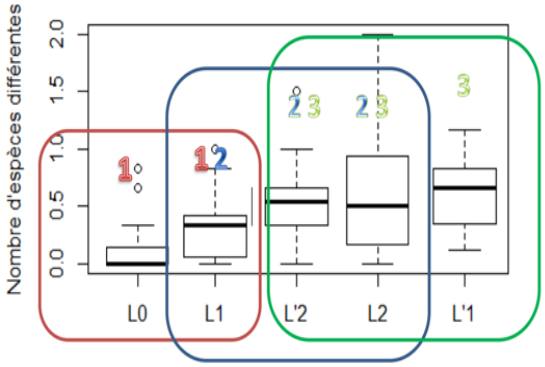


Figure 12 : Classement des modalités en fonction de leur richesse spécifique moyenne. Des nombres similaires indiquent des groupes statistiques homogènes. L0 : Labour, L1 et L'1 : Travail superficiel, L2 et L'2 : Semis direct

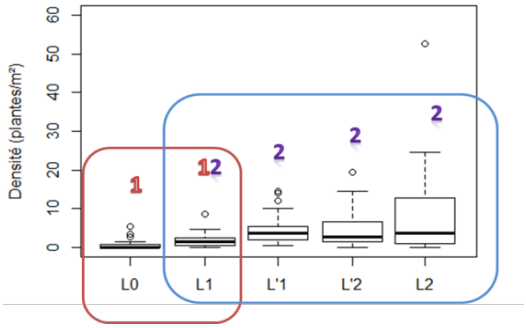


Figure 13 : Classement des modalités en fonction de leur abondance moyenne. Des nombres similaires indiquent des groupes statistiques homogènes. L0 : Labour, L1 et L'1 : Travail superficiel, L2 et L'2 : Semis direct

Tableau IX: Détail des précipitations cumulées et des températures moyennes aux périodes de relevés en 2012 et 2014

	ETP cumulée jusqu'en juillet (date relevé blé)	Température moyenne depuis juillet	ETP cumulée jusqu'en octobre (date relevé maïs)	Température depuis octobre
2012	399 mm	10.7 °C	546 mm	12.3 °C
2014	**456** mm	**12.1**°C	**621** mm	**13.3** °C

Au niveau de l'abondance, on distingue 2 groupes : le labour d'un côté et les modalités L2, L'2 et L'1 de l'autre, qui présentent une abondance 2 à 4 fois plus élevée. La modalité en travail superficiel L1 présente une abondance intermédiaire (Figure 13)

Effet année :

L'effet année est significatif. L'abondance et la richesse spécifique sont respectivement 2 et 4 fois plus importantes en 2014 que les années 2012 et 2015.

Les périodes de relevés en 2012 et 2014 ont été faits en juillet pour le blé et octobre pour le maïs.

Des différences d'ETP et de température entre 2012 et 2014 pourraient expliquer en partie les plus fortes richesses spécifiques et abondance dans les parcelles en 2014 (Tableau IX). Pour l'année 2015, les relevés ont été faits à des périodes différentes, beaucoup plus tôt dans l'année, mais toujours après l'application de tous les herbicides de l'itinéraire. Cela a pu jouer sur l'abondance et la richesse spécifique trouvées dans les parcelles en 2015.

Effet Point d'entrée*année :

L'interaction point d'entrée et année est significative pour l'abondance et la richesse spécifique. On voit sur la Figure 14 que le PE-A a généralement une abondance et une richesse spécifique plus élevées que le PE-B mais cette différence est plus ou moins forte selon les années et les modalités. Ces différences sont expliquées par le fait que dans les parcelles du PE-A, il y a eu une forte infestation en Panic pied de coq dans le semis direct (L2 et L'2) en 2014.

L'effet du point d'entrée est presque significatif dans l'ANOVA (Figures 8 et 9). Les modalités en semis direct (L2 et L'2) et une modalité en travail superficiel (L'1) ont globalement des abondances et des richesses spécifiques plus élevées dans le PE-A que le PE-B (Figure 15). Dans l'analyse sur les 3 années, le PE-A est occupé 2 fois par du blé (2012 et 2014) alors qu'il est représenté qu'une fois par le maïs (2015). L'effet des cultures sur la flore adventice est difficilement interprétable étant donné qu'il y a un changement chaque année de la culture sur la parcelle élémentaire.

On peut tout de même observer que les parcelles en maïs contiennent pratiquement autant d'espèces que celles en blé avec une richesse spécifique moyenne par cadre de 0.42 pour le blé et de 0.46 pour le maïs. Il n'y a pas de Chénopode, Renouée liseron ou encore de Séneçon dans les parcelles en maïs. A l'inverse, dans ces parcelles, il y a présence d'Amarante ou de Morelle noire contrairement au blé. Pour l'abondance, la moyenne sur le blé pour les trois années est légèrement plus élevée (5.11 plantes/m²) que le maïs (4.15 plantes/m²) mais cela est très variable selon les années et le point d'entrée. Il y a un effet historique des parcelles de maïs en 2015 : la forte densité en Panic dans le blé en 2014 dans les parcelles en SD se répercute en 2015 sur le maïs (Figure 16).

b) Travail du sol et période d'interculture

Les différences de richesse spécifique entre modalités avec couvert et sans couvert pendant la

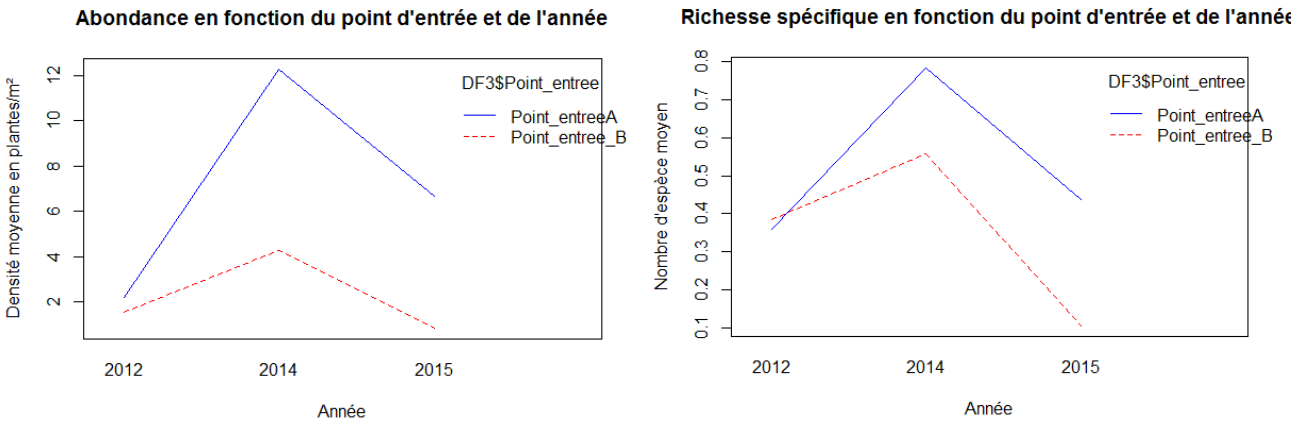


Figure 14 : Valeurs moyennes en abondance et en richesse spécifique selon le point d'entrée et la modalité

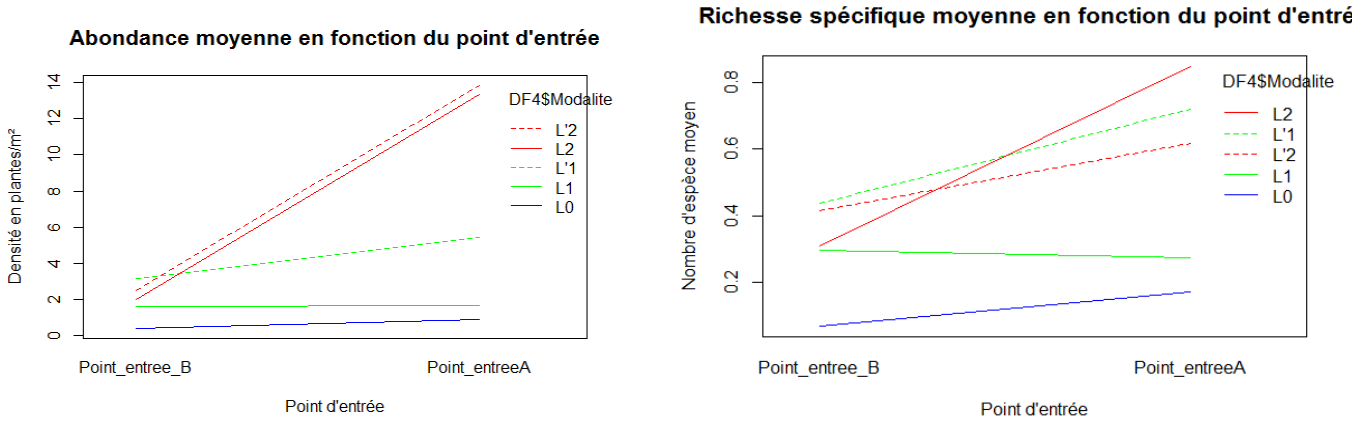


Figure 15 : Abondances et richesses spécifique selon les modalités et le point d'entrée (L0 : Labour, L1 et L'1 : Travail superficiel, L2 et L'2 : Semis direct)

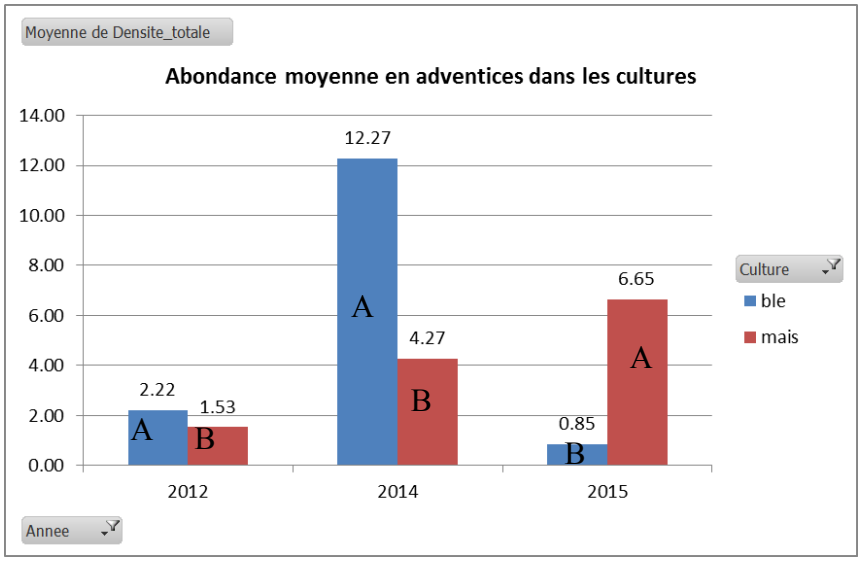


Figure 16 : Abondances moyennes selon la culture (maïs ou blé), le point d'entrée (A ou B) et l'année de relevé

période d'interculture sont parfois positives ou négatives selon la modalité et l'année du relevé, mais elles sont toujours très faibles : entre 0 et 0.3 espèces de différence. Cela montre bien qu'il n'y a pas de tendance, d'où le résultat non significatif de l'analyse de variance (Figure 17). On peut tout de même observer à l'échelle des espèces que contrairement aux modalités en sol nu, les modalités avec sol couvert ne présentent pas de Séneçon vulgaire, de Renouée persicaire, d'Amarante blanche ou encore de Mouron rouge. Ces dicotylédones ne présentent pas de caractéristiques communes à première vue. Il n'y a donc pas d'explication à cette observation.

Au niveau de l'abondance, les différences entre les modalités sol couvert ou sol nu sont également faibles ce qui explique l'absence d'effet significatif dans l'analyse de variance (Figure 18). Néanmoins, les modalités en semis direct (L2 et L'2) en 2014 montrent une différence de près de 15 plantes/m². Cette différence est principalement due à la présence très importante de Panic pied de coq ou de Sétaire spp dans ces parcelles avec jusqu'à 25 plantes/m² en moyenne dans la modalité L'2C, par exemple. Ces levées sont plus nombreuses en semis direct sous couvert qu'en sol nu. Cela s'explique par le fait qu'il a été observé des graminées estivales montant à graines dans les couverts en été/automne (levée en début d'été sous blé, non détruites mécaniquement ou chimiquement avant de semer les couverts). La forte présence de Sétaire spp et de Panic pied de Coq signifie souvent que la terre est riche en éléments nutritifs et désherbée chimiquement depuis longtemps. C'est également le signe d'un excès de cultures d'été comme le maïs *(Pousset, 2003)*.

c) Travail du sol et type biologique des adventices

La densité en dicotylédones diminue et inversement la densité en monocotylédones augmente fortement avec la simplification du travail du sol. Par contre la densité en vivace est à peu près la même, voire un peu plus élevée pour le labour (Figure 19).

Concernant la période de germination, on observe graphiquement une augmentation de la proportion et de l'abondance en espèces à germination estivale avec la simplification du travail du sol. Cela vient de la forte proportion en Panic pied de Coq et en Sétaire dans les modalités en semis direct. Les autres graminées sont bien maitrisées chimiquement dans l'essai (Pâturin annuel, Ray-grass, pas de Vulpin), d'où cette hausse de Panic pied de coq et de Sétaire (Figure 19).

La richesse spécifique et l'abondance augmentent significativement avec la simplification du travail du sol. Bien que des différences de flore adventice aient été observées entre les modalités, il faut souligner le fait que l'essai est assez propre de manière générale.

4) Evaluation du modèle

a) Analyse des indicateurs de comparaison

Les premières simulations ont donné des densités jusqu'à 10 000 fois plus élevées que les données réelles pour certaines adventices comme le Laiteron rude, le Gaillet gratteron, la Renouée liseron, l'Amarante... Les RMSEP étaient proches de 600.

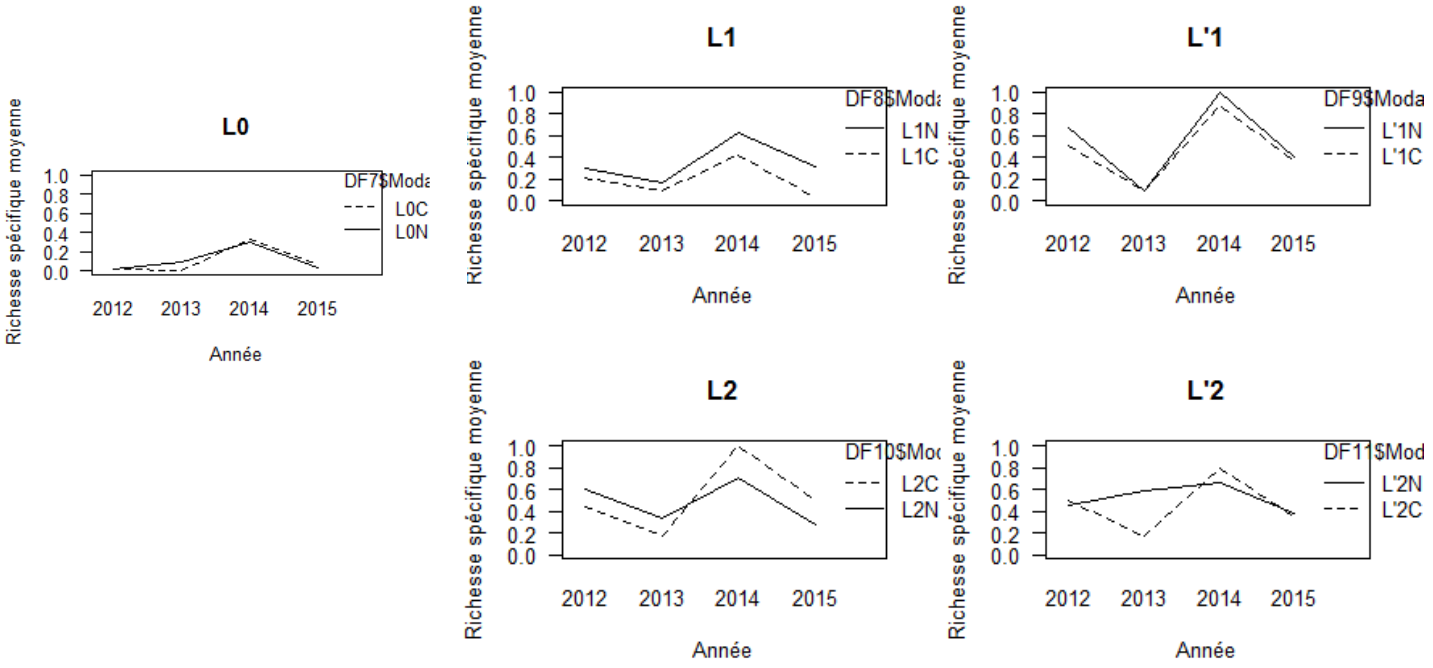


Figure 17 : Evolution de la richesse spécifique pour chaque modalité en fonction du type de sol en interculture

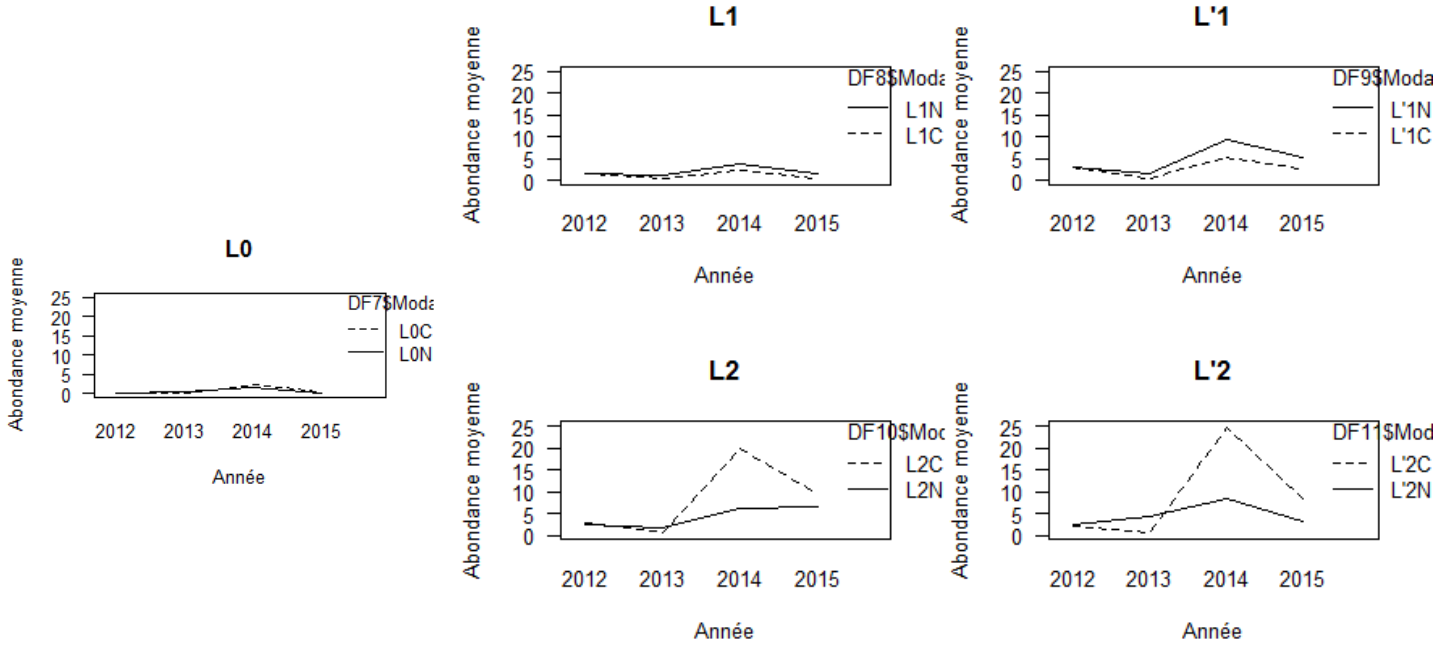


Figure 18 : Evolution de l'abondance pour chaque modalité en fonction du travail du sol en interculture

Une hypothèse de ce résultat a été avancée : certaines adventices rencontrées dans les années 2010 comme le Laiteron rude ou le Gaillet gratteron, n'étaient sans doute pas présentes dans la période 2005-2008. Les herbicides utilisés n'étaient donc pas spécialisés pour ces adventices qui sont alors multipliées au fur et à mesure des années de simulation.

Il a alors été décidé d'effectuer la simulation sur la période 2009-2016 soit 7 ans de simulation, qui seront suffisants pour évaluer le modèle et la simulation sera plus proche des dates auxquelles les adventices ont été suivies sur l'essai. Les résultats n'ont pas montré plus d'amélioration dans les indicateurs de comparaison, surtout pour les modalités en semis direct. Des essais de simulation avec modification des densités initiales (Tableau X) ont confirmé les résultats issus de l'évaluation par l'INRA : les valeurs de densités initiales renseignées dans le modèle ont peu d'impact sur les données de sortie après quelques années de simulation. Les densités se réajustent au fur et à mesure de la simulation. Le tableau XI illustre les résultats de comparaison des 3 simulations qui diffèrent par les densités initiales, avec les données observées sur la période 2009-2016. Les variances des données simulées étaient parfois trop élevées pour calculer les $RMSEP_{corr}$ et les $RRMSEP_{corr}$ des modalités.

On remarque que les RMSE sont toujours très élevées, surtout pour les modalités en semis direct. Le nuage de point représentant la comparaison des données observées et simulées (Figure 20) montre l'écart qui peut exister entre les données simulées et observées. Les axes ne sont pas à la même échelle du fait des trop grosses différences de valeurs. Ce sont principalement les modalités en semis direct qui posent problème. La diminution des densités initiales apporte une légère amélioration dans les indicateurs de comparaison comme les RRMSEPcorr ou r. Le coefficient de Pearson r est de 0.2 dans la troisième simulation, cela montre que la corrélation est positive entre le modèle et les données expérimentales, même si sa valeur est faible. Les valeurs d'efficience du modèle et le biais s'améliorent également avec la diminution des densités initiales mais restent très élevés pour pouvoir avancer des conclusions intéressantes sur la capacité du modèle à prédire les densités.

b) Analyse statistique des données simulées

Après analyse statistique des données issues de la simulation 3, on remarque qu'un effet travail du sol est bien mis en évidence (Figure 21). Le modèle classe les modalités en trois groupes distincts : la parcelle en labour avec l'abondance la plus faible, le travail superficiel L'1 avec une abondance intermédiaire et enfin les deux parcelles en semis direct avec l'abondance la plus forte. La modalité en travail superficiel L1 présente une abondance intermédiaire entre le L0 et L'1 (Figure 22). Par contre on remarque que la variabilité des densités est beaucoup plus hétérogène pour les modalités en semis direct (L2 et L'2) que les modalités en labour ou en travail superficiel.

A l'échelle de la densité globale et dans le contexte de la station de Boigneville, le modèle a tendance à surestimer les valeurs de densités, avec de fortes variabilités, surtout dans les modalités en semis direct. Néanmoins, les modalités sont classées distinctement selon le type de travail du sol ce qui montre que le modèle prédit correctement l'effet du travail du sol par rapport à ce qui a été observé en parcelle. L'effet année n'a pas été observé dans les données simulées par contre.

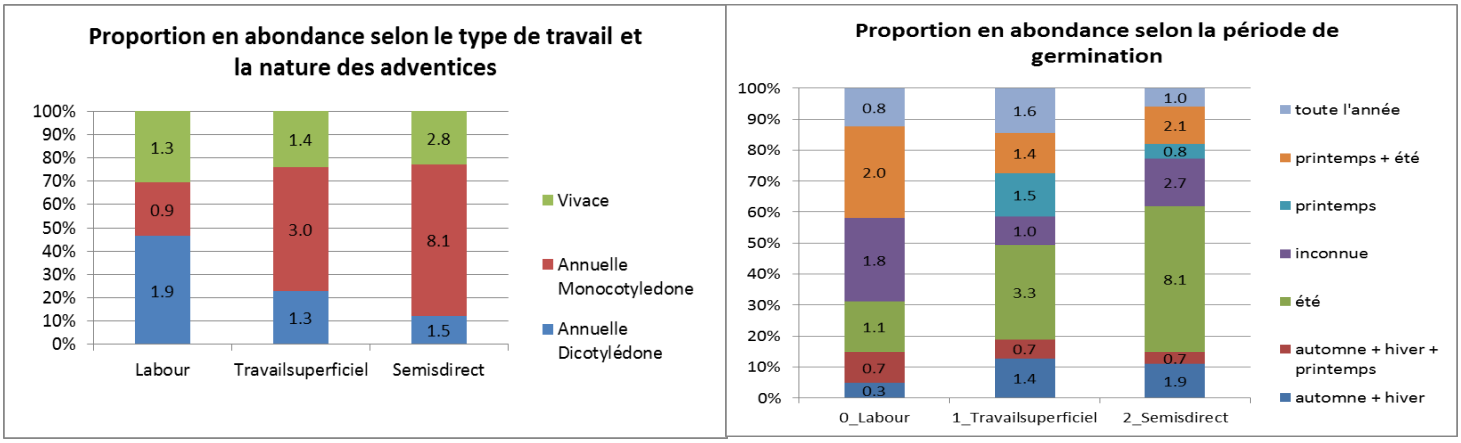


Figure 19 : Proportions en abondance selon le type de travail, en fonction de la nature des adventices ou de leur période de germination

Tableau X : Présentation des 3 simulations de la période 2009-2016 selon les différentes données initiales en adventices renseignées

Simulation	Période de simulation	Densité initiale renseignée
1	2009-2016	Valeurs issues des moyennes des densités de chaque espèce sur les années 2010
2	2009-2016	Valeurs baissées d'un facteur 10 par rapport aux moyennes des années 2010 pour les adventices qui posent problème
3	2009-2016	Valeurs baissées d'un facteur 1000 par rapport aux moyennes des années 2010 pour les adventices qui posent problème sur les modalité en Semis Direct

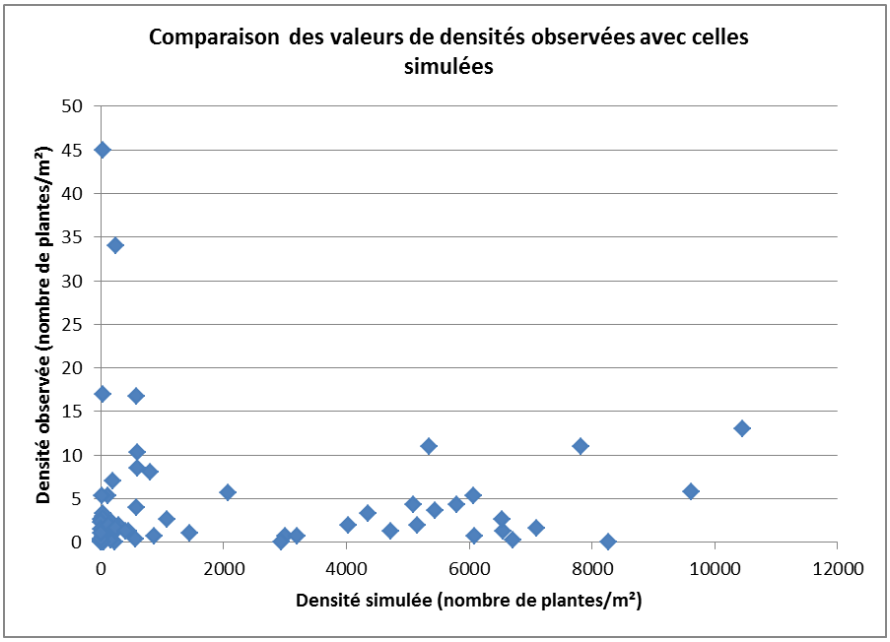


Figure 20 : Nuage de points entre les valeurs de densités observées et simulées

IV) Discussion

1) Analyse des données expérimentales

a) Intérêts et limites de l'essai de longue durée

Ce dispositif, débuté il y a plus de 40 ans, est très intéressant car il permet de s'affranchir des périodes de transition des effets des cultures ou techniques culturales précédentes. Les relevés de flore des années 2010 ont été effectués dans un système stabilisé dans le temps, qui prend bien en compte les effets à long terme de chaque type de travail du sol

Cependant, ce dispositif a connu de nombreux changements au fil des années avec l'ajout de nouvelles modalités, la suppression de blocs ou encore la modification des rotations au sein des blocs. La taille et l'emplacement des parcelles étant figés, il était donc difficile d'intégrer ces modifications et de randomiser correctement l'essai. Ceci limite les possibilités d'analyse statistique. De plus, l'essai a été conduit selon des règles de décision et des objectifs différents de l'étude sur laquelle nous travaillons. En effet, un des objectifs principaux de cet essai était d'étudier les effets du travail du sol sur le rendement. Le désherbage, adapté à la modalité la plus sale, a donc pu gommer des différences d'enherbement entre modalités.

b) Portée des résultats

Les résultats de l'analyse statistique confirment des données connues, issues de publications diverses comme celles de Chauvel et al., (2009), Colbach in Labreuche et al., (2014), ou encore Valantin-Morison et al., (2008) : l'abondance et la richesse spécifique de la flore adventice augmentent avec la simplification du travail du sol. Ce dispositif est néanmoins l'un des rares à confirmer cet effet sur la durée (plus de 40 ans). Les résultats de l'essai de Grignon par exemple ont été analysés avec 10 ans de recul *(Debaeke and Orlando, 1991)*. Il faut plusieurs années pour qu'un nouvel équilibre de la flore s'installe quand on change le travail du sol : après 10 ans de recul on commence à atteindre cet équilibre, mais après 40 ans il est atteint. Le facteur climat est également non négligeable sur la flore adventice. Selon les années et l'emplacement de la parcelle, les abondances et les richesses spécifiques peuvent être plus ou moins fortes. L'étude d'autres facteurs seuls ou combinés (point d'entrée de la rotation, sol couvert ou non en interculture, gestion des résidus de culture…) n'a pas abouti à la mise en évidence de l'existence de relations étroites avec la flore adventice. Cependant, la période sur laquelle l'analyse a été faite est très courte (3 années). Une deuxième année impaire (2013 par exemple) pour équilibrer les points d'entrée selon les cultures en place aurait été très intéressante pour affiner les résultats et peut être mettre en évidence de nouvelles relations entre les facteurs étudiés et la flore adventice. La méthode de relevé de flore utilisée dans cette étude présente des avantages mais aussi des inconvénients.

Un relevé par cadre permet de comptabiliser précisément la flore présente à l'intérieur de ce dernier mais le nombre de cadres lancés (entre 6 et 12 soit 1.5 m² à 3 m²) est très faible par rapport à la superficie de la parcelle (400 m²). Il peut y avoir des agrégations d'adventices par endroits et si le cadre ne tombe pas dessus elles ne sont pas prises en compte par exemple. Cette méthode d'échantillonnage ne permet donc pas d'avoir de relevés parfaitement représentatifs de l'ensemble de la parcelle, ce qui est une difficulté majeure dans les suivis

Tableau XI : Résultats de la comparaison des données observées en parcelle et des données simulées

		Par modalité			Global					
		RMSEP	RMSEP corr	RRMSEP corr	RMSEP	RMSEP corr	RRMSEP corr	r	EF	Biais
S 1	L0C	122	-	-	3981	3325	148	0.03	-3839	2431
	L0N	890	555	555						
	L1C	880	-	-						
	L'1C	471	-	-						
	L1N	244	-	-						
	L'1N	352	-	-						
	L2C	5978	5454	327						
	L'2C	5368	4015	178						
	L2N	6634	5459	840						
	L'2N	6925	6102	1135						
S 2	L0C	47	37	28	3452	2667	119	0.21	-2886	2018
	L0N	293	-	-						
	L1C	759	-	-						
	L'1C	448	-	-						
	L1N	163	-	-						
	L'1N	984	-	-						
	L2C	4835	4043	243						
	L'2C	3909	2533	113						
	L2N	6485	5304	816						
	L'2N	6048	4789	891						
S 3	L0C	47	37	28	2475	1813	81	0.19	-1483	1369
	L0N	293	-	-						
	L1C	759	-	-						
	L'1C	448	-	-						
	L1N	163	-	-						
	L'1N	984	-	-						
	L2C	3214	2609	157						
	L'2C	2630	1400	62						
	L2N	5399	4617	710						
	L'2N	3604	2340	435						

Response: log(Dens_tot + 1)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Point_entree	1	5.743	5.743	2.6560	0.11436
Moda2	4	141.779	35.445	16.3926	4.99e-07
Interculture	1	6.476	6.476	2.9952	0.09452
Annee_fact	2	5.197	2.599	1.2018	0.31569
Point_entree:Moda2	4	14.354	3.589	1.6597	0.18732
Point_entree:Interculture	1	4.473	4.473	2.0686	0.16145
Moda2:Interculture	4	10.711	2.678	1.2384	0.31738
Moda2:Annee_fact	8	26.213	3.277	1.5154	0.19662
Point_entree:Annee_fact	2	19.806	9.903	4.5801	0.01902
Point_entree:Moda2:Interculture	4	4.199	1.050	0.4855	0.74620
Residuals	28	60.543	2.162		

Figure 21 : Résultat de l'ANOVA sur les données simulées

d'adventices en général. De plus, le nombre de cadres lancés dans la parcelle était différent selon les années ou les modalités. Cela a pu jouer sur le nombre d'espèces relevées ou les densités prises en compte. Plus le nombre de cadre est élevé, plus on a de chance de trouver de nouvelles espèces ainsi que de changer les densités trouvées. L'analyse aurait pu se faire en sélectionnant aléatoirement le même nombre de cadres pour chaque parcelle élémentaire, or le nombre de cadre lancé était aussi lié à la variabilité de la flore adventice donc il a été décidé de garder toutes les informations des relevés, même si elles ne sont pas fournies avec le même détail.

Des relevés effectués avec l'échelle de Barralis apporteraient une indication plus globale du salissement de la parcelle. Néanmoins, ce mode de relevé présente un risque de ne pas prendre en compte toutes les espèces présentes de la même manière (les petites plantes sont moins visibles que les plus grandes).

2) Comparaison des données simulées avec les données expérimentales

FLORSYS présente des densités très fortement surestimées par rapport aux relevés expérimentaux, surtout pour les modalités en semis direct (L2 et L'2). Le modèle a de plus montré une très forte variabilité dans les densités simulées, ce qui avait déjà été mis en évidence lors de l'évaluation par l'INRA. Notre étude confirme que la densité initiale a un impact faible sur les sorties. Le modèle ajuste bien les densités au fur et à mesure des années de simulation et des itinéraires, car même en diminuant d'un facteur 1000 les densités initiales de certaines adventices, les densités modélisées remontent à des niveaux très élevés, du même ordre de grandeur que pour les simulations avec les densités initiales non diminuées. Notre analyse des données simulées s'est porté sur l'abondance totale d'adventices, toutes espèces confondues. Se concentrer sur les densités globales nous permettait de comparer plus facilement avec les analyses statistiques effectuées sur les données observées. Or certaines espèces ne présentent pas cette hausse démesurée de leur densité, comme le Séneçon Commun ou la Folle Avoine. Il serait très intéressant de continuer l'analyse de ces données mais à l'échelle de l'espèce. En effet, certaines espèces sont sans doute bien simulées par le modèle et ce sont d'autres espèces qui par leur densité très élevée, impactent le résultat. L'évaluation par l'INRA avait de plus mis en évidence que le modèle a de meilleurs résultats à l'échelle de l'espèce qu'à l'échelle de la densité globale. Une autre observation intéressante de ces simulations est que le modèle est moins bien adapté aux simulations en semis direct. L'INRA est actuellement en train de travailler sur cet aspect il y a effectivement une surestimation des abondances dans les parcelles non travaillées. Mais il reste à faire un travail de recherche pour expliquer pourquoi certaines densités augmentent autant et aussi vite.

FLORSYS a été développé dans le but de prédire la dynamique pluriannuelle de la flore en fonction du système de culture. FLORSYS ne peut pas être utilisé pour prédire une densité donnée un jour donné. Il est principalement utilisé pour classer différents systèmes et non pas regarder les valeurs absolues des variables de sortie.

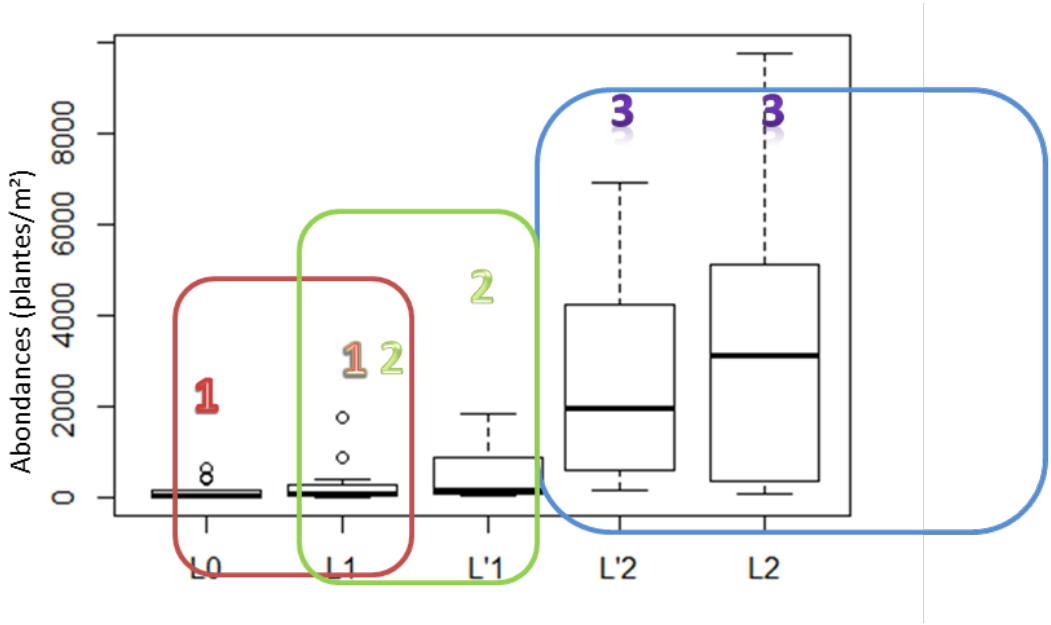


Figure 22 : Répartition des modalités en fonction de leur densité Des nombres similaires indiquent des groupes statistiques homogènes. L0 : Labour, L1 et L'1 : Travail superficiel, L2 et L'2 : Semis direct

`

Les données de biomasse pourraient apporter des informations complémentaires sur les simulations. En effet, le modèle prédit en général beaucoup de petites plantes au lieu de plantes avec des stades avancés. La comparaison du rendement avec et sans adventices pourraient nous dire si ces très fortes densités ont un impact sur les cultures ou non.

L'effet du travail du sol est tout de même mis en évidence, avec une différence significative entre le labour, le travail superficiel et le semis direct. L'effet année n'a pas été observé avec les données simulées, mais au vu des approximations de stock semencier initial, il faut plusieurs années pour que le modèle se recale et prenne en compte d'autres effets moins marqués tels que l'année climatique. Le modèle pourra être utilisé pour faire des comparaisons relatives, afin de voir quelle pratique culturale marque une différence dans sa gestion des adventices par rapport à une autre au bout de quelques années de simulations par exemple, mais pas pour prédire une abondance à une date donnée.

Conclusion

L'objectif du projet était d'évaluer les effets de différents types de travail du sol sur la flore adventice en général. Ce projet s'inscrit dans un contexte de simplification du travail du sol mais aussi de gestion des adventices de plus en plus compliquée.

Pour ce faire, deux approches ont été utilisées. Une approche expérimentale, avec des relevés en parcelles, a permis de répondre à la problématique posée avec la mise en évidence d'un effet du travail du sol sur les adventices. Même si ce résultat avait déjà été démontré dans d'autres essais et d'autres contextes, il permet de faire une photographie de l'état actuel de gestion des adventices dans l'essai, avant son arrêt à la fin de la saison. La démarche mise en œuvre dans cet essai travail du sol pourra de plus servir de modèle pour analyser les résultats des autres essais (rotation, monoculture, environnement) et ainsi faciliter la recherche et la démarche d'analyse comme le choix des variables, des facteurs, des représentations graphiques, etc.

La deuxième approche, par modélisation, avait comme objectif initial de vérifier que le modèle FLORSYS pouvait modéliser cet effet du travail du sol, comme ce qui a été mis en évidence de manière expérimentale. L'évaluation du modèle était une première étape avant de pouvoir se servir de ce dernier pour modéliser des essais futurs et ainsi faciliter le travail de recherche et d'utilisation de leviers agronomiques en vue d'une diminution des herbicides dans le futur essai désherbage d'Arvalis à Boigneville.

L'évaluation du modèle n'a pour l'instant pas permis sa validation dans le contexte de l'essai travail du sol de Boigneville. Les résultats issus de la simulation montrent qu'un nouveau travail d'évaluation ou de paramétrage des données d'entrée reste à faire pour pouvoir l'utiliser et prédire des abondances selon un itinéraire proposé. Néanmoins, l'évaluation a permis de confirmer l'effet travail du sol sur les adventices. L'abondance en adventices augmente avec la simplification du travail du sol. Ce résultat peut permettre de faire des comparaisons relatives entre différentes modalités testées.

Bibliographie

Agrotransfert (2009). Odera système, mode d'emploi.

Aliaga, C., Jouanneau, E., Baron, B., Gorichon, J., Lieven, J., and Verdier, J.L. (2015). Valoriser les leviers agronomiques pour un désherbage durable à l'échelle de la rotation. Arvalis Inst. Végétal.

Anderson, R.L. (2005). A Multi-Tactic Approach to Manage Weed Population Dynamics in Crop Rotations. Agron. J. 97, 1579.

Baudry, E., and Taunay, J. (2006). Le désherbage mécanique des céréales à paille d'hiver.

Bond, W., Turner, R.J., and Grundy, A.C. (2003). A review of non-chemical weed management. HDRA Org. Organ. Ryton Org. Gard. Coventry UK *81*.

Chadoeuf-Hannel, R. (1985). La dormance chez les semences de mauvaises herbes.

Chauvel, B., Tschudy, C., and Munier-Jolain, N. (2009). Travail du sol et mauvaises herbes : quels enjeux pour les Techniques Culturales Sans Labour dans le cadre d'une gestion intégrée ? p.

Colbach, Colas, Pointurier, Queyrel, and Villerd (2017). A methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. 59–73.

Colbach, N., Chauvel, B., Gauvrit, C., and Munier-Jolain, N.M. (2007). Construction and evaluation of ALOMYSYS modelling the effects of cropping systems on the blackgrass life-cycle: From seedling to seed production. Ecol. Model. *201*, 283–300.

Colbach, N., Biju-Duval, L., Gardarin, A., Granger, S., Guyot, S.H.M., Mézière, D., Munier-Jolain, N.M., and Petit, S. (2014a). The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. Weed Res. *54*, 541–555.

Colbach, N., Granger, S., Guyot, S.H.M., and Mézière, D. (2014b). A trait-based approach to explain weed species response to agricultural practices in a simulation study with a cropping system model. Agric. Ecosyst. Environ. *183*, 197–204.

Colbach, N., Bertrand, M., Busset, H., Colas, F., Dugué, F., Farcy, P., Fried, G., Granger, S., Meunier, D., Munier-Jolain, N.M., et al. (2016). Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. Environ. Model. Softw. *86*, 184–203.

Cordeau, S., Dessaint, F., Denieul, C., Bonin, L., Vuillemin, F., Delatre, M., Rodriguez, A., Guillemin, J., and Chauvel, B. (2016) AFPP-23e Conference du Columa Journées Internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Dijon-6, 7 et 8 Décembre 2016. La nuisibilité directe des adventices en grandes cultures : Quelles réponses nous apportent les essais désherbage ?

Debaeke, P., and Orlando, D. (1991). Simplification du travail du sol et évolution de la flore adventice : conséquences pour le désherbage à l'échelle de la rotation. (Paris (France): INRA), p.

Fried, G., Chauvel, B., and Reboud, X. (2008). Evolution de la flore adventice des champs cultivés au cours des dernières décennies : vers la sélection de groupes d'espèces répondant aux systèmes de culture. *3*, 15–26.

Fried, G., CHAUVEL, B., RODRIGUEZ, A., Jullien, J., and Reboud, X. (2014). Flore du blé d'hiver, quarante ans d'évolution. Phytoma.

Gautellier, L., and Bonin, L. (2017). Diversifier au maximul les cultures et les moyens de lutte. 32–35.

Gautellier Vizioz, L. (2015). Enjeux et problématiques du désherbage dans les différents systèmes de culture français. p.

Heddadj, D., Bouvier, D., Cotinet, P., Guil, J., Pulleman, M.M., and Faber, J.H. (2014). Techniques culturales sans labour. Guide pratique 2014 (Chambres d'agriculture des Côtes d'Armor).

Infloweb (2012). Laiteron rude.

Kruidhof, H.M., Bastiaans, L., and Kropff, M.J. (2008). Ecological weed management by cover cropping: effects on weed growth in autumn and weed establishment in spring. Weed Res. *48*, 492–502.

Labreuche, J., Laurent, F., and Roger-Estrade, J. (2014). Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable (Versailles: Arvalis-Institut du végétal).

Metais, P., Bureau, S., Gaudillat, D., and Geille, A. (2016). Impact de la récupération des menues pailles sur le Ray-grass dans les cérales (Lolium sp). (Dijon), p.

Michel, C. (2015). Désherbage, retour vers le labour. Fr. Agric. 26–27.

Munier-Jolain, N., Deytieux, V., Guillemin, J.-P., Granger, S., and Gaba, S. (2008). Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. Innov. Agron. *3*, 75–88.

Pauget, J. (2015). Le déchaumage participe à la lutte contre les bioagresseurs.

Pousset, J. (2003). Agriculture sans herbicides. Principes et méthodes (Paris).

Rodriguez, A., and Gasquez, J. (2008). RMT «Gestion de la flore adventice en grandes cultures». Innov. Agron. *3*, p107–120.

Rodriguez, A., and Mamarot, J. (2014). Mauvaises herbes des cultures (Paris).

Vacher, C., and Metais, P. (2015). Connaître la biologie des adventices pour mieux les maitriser par le travail du sol. (Paris), p.

Valantin-Morison, M., Guichard, L., and Jeuffroy, M.. (2008). Comment maîtriser la flore adventice des grandes cultures à travers les éléments de l'itinéraire technique ? *3*, 27–47.

Détail des annexes :

Annexe 1 : Plan détaillé de l'essai Travail du sol et de l'essai Rotation et présentation des deux répétitions

Annexe 2 : Itinéraires d'implantation mis en œuvre sur l'essai travail du sol sur blé précédent maïs (point d'entrée A)

Annexe 3 : Itinéraires d'implantation mis en œuvre sur l'essai travail du sol, culture de maïs précédent blé (point d'entrée B)

Annexe 4 : Extrait d'un relevé de flore dans les années 1970. Ici relevé de 1974

Annexe 5 : Calcul de l'abondance

Annexe 6 : Calcul de la richesse spécifique

Annexe 7 : Postulats de l'analyse de variance de la richesse spécifique

Annexe 8 : Postulats de l'analyse de variance pour l'abondance

Annexe 9 : Caractéristiques du sol de Boigneville

Annexe 10 : Exemple d'ininéraire technique codifié dans le modèle

Annexe 11 : Rapprochement entre différentes variétés de blé et celles paramétrées dans FLORSYS

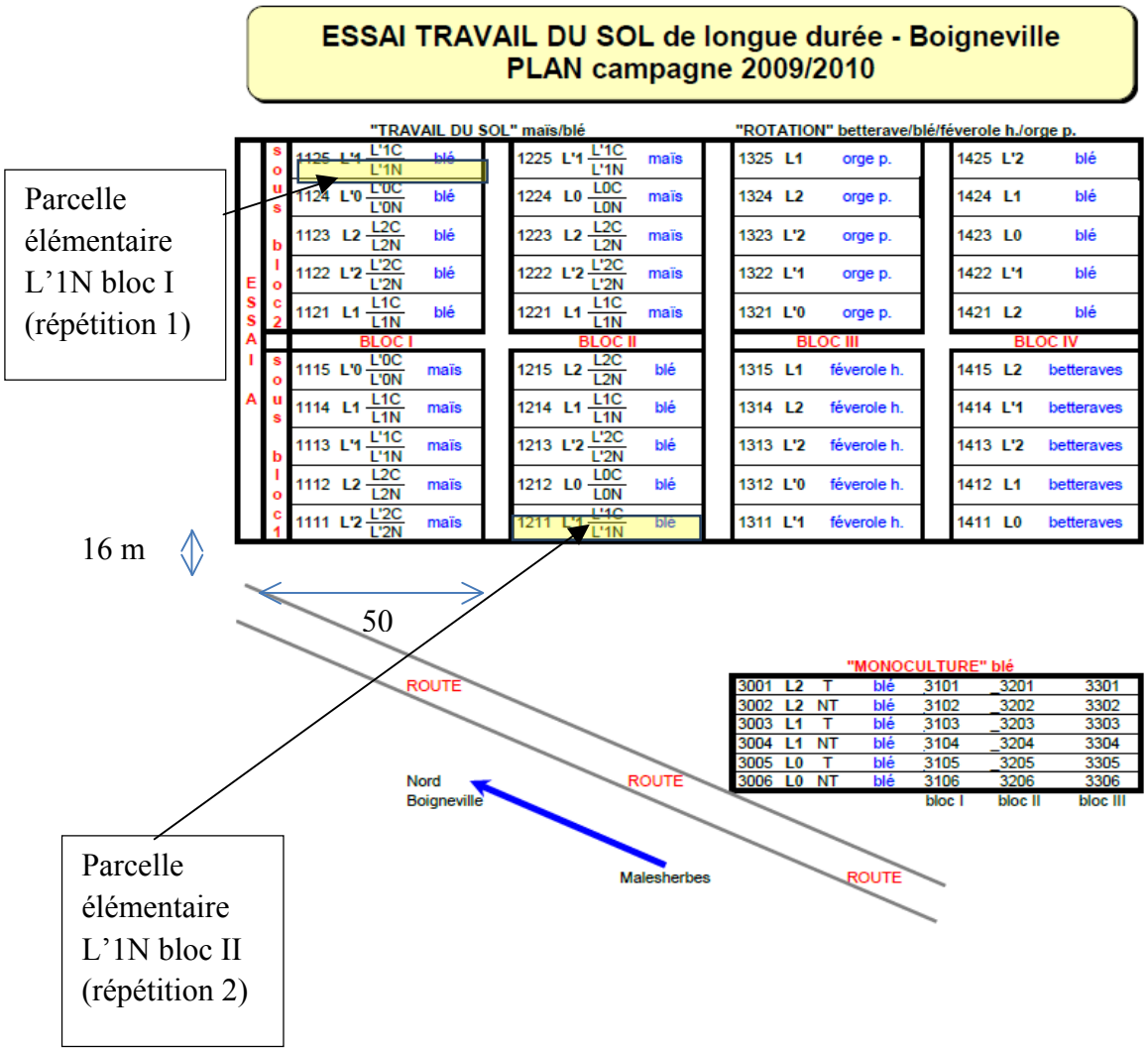
Annexe 12 : Calcul de l'abondance des données simulées

Annexe 13 : Calculs des indicateurs de comparaison entre les données simulées et observées

Annexe 14 : Calcul de la variance des données observées et simulées

Annexe 15 : Comparaison des espèces d'adventices présentes entre les années 1970 et 2010

Annexe 1 : Plan détaillé de l'essai Travail du sol et de l'essai Rotation et présentation des deux répétitions



Annexe 2 : Itinéraires d'implantation mis en œuvre sur l'essai travail du sol sur blé précédent maïs (point d'entrée A)

Modalité	Période (années de récolte)	Itinéraire d'implantation type
L0 ou L'0	1971 à 1978	Broyeur tracté ; Labour ; Reprise de labour (herse ou vibroculteur) sur 1 à 3 passages, éventuellement roulage ; Semoir à socs ou à disques
	1979	Broyeur tracté ; Labour ; Reprise de labour (herse rotative) sur 2 passages ; Semoir à socs ; Ressemis de blé tendre de printemps : herse alternative + semoir à disques
	1980 à 1994	Broyeur tracté (sauf L'0 entre 83 et 94 : précédent maïs ensilé) ; Labour ; Herse alternative + Semoir à socs ou à disques
	1995 à 2001	Broyeur sous becs cueilleurs ; Labour ; Herse alternative + Semoir à socs ou à disques
	1999 à 2012	Broyeur tracté ; Labour ; Herse rotative + Semoir à socs
	2013 à 2016	Broyeur tracté ; Labour ; Herse rotative + Semoir à disques
	2017	Labour ; Herse rotative + Semoir à socs
L1	1971	Broyeur tracté ; Semavator
	1972 à 1978	Broyeur tracté ; Rotavator + Semoir à disques
	1979	Broyeur tracté ; Rotavator + Semoir à disques ; Ressemis de blé tendre de printemps : semoir « semis direct » Huard SD 300
	1980 à 1994	Broyeur tracté ; Rotavator + Semoir à disques
	1995 à 2001	Broyeur sous becs cueilleurs ; Rotavator + Semoir à disques
	2002 à 2012	Broyeur tracté ; Rotavator + Semoir à disques
	2013 à 2016	Broyeur tracté ; Semavator
	2017	Semavator
L'1	1971	Broyeur tracté ; Semavator
	1972 à 1978	Broyeur tracté ; Rotavator + Semoir à disques
	1979	Broyeur tracté ; Rotavator + Semoir à disques ; Ressemis de blé tendre de printemps : semoir « semis direct » Huard SD 300
	1980 à 1994	Broyeur tracté (sauf entre 83 et 94 : précédent maïs ensilé) ; Rotavator + Semoir à disques
	1995 à 2001	Broyeur sous becs cueilleurs ; Rotavator + Semoir à disques
	2002	Broyeur tracté ; Rotavator + Semoir à disques
	2003 à 2012	Semavator
	2013 à 2016	Broyeur tracté ; Semavator
	2017	Semavator
L2	1971 à 1974	Broyeur tracté ; Semoir prototype « semis direct » Nodet à socs et couteaux tournants
	1975 à 1978	Broyeur tracté ; semoir « semis direct » Bettinson 3D
	1979	Broyeur tracté ; Semoir semis direct à disques Bettinson 3D ; Ressemis de blé tendre de printemps : semoir « semis direct » Huard SD 300
	1980 à 1994	Broyeur tracté ; Huard SD300
	1995 à 2001	Broyeur sous becs cueilleurs ; Semoir « semis direct » Huard SD 300
	2002 à 2012	Semoir « semis direct » Huard SD 300
	2013	Semoir « semis direct » Semeato TDNG
	2014 à 2017	Semoir « semis direct » Huard SD 300 puis broyeur tracté
L'2	1971 à 1974	Broyeur tracté ; Semoir prototype « semis direct » Nodet à socs et couteaux tournants
	1975 à 1978	Broyeur tracté ; semoir « semis direct » Bettinson 3D
	1979	Broyeur tracté ; semoir « semis direct » Bettinson 3D ; Ressemis de blé tendre de printemps : semoir « semis direct » Huard SD 300
	1980 à 1994	Broyeur tracté (sauf entre 83 et 94 : précédent maïs ensilé) ; Semoir « semis direct » Huard SD 300
	1995 à 2001	Broyeur sous becs cueilleurs ; Semoir « semis direct » Huard SD 300
	2002 à 2006	Semoir « semis direct » Huard SD 300
	2007 à 2012	Semoir « semis direct » Huard SD 300 ; Broyeur tracté après semis
	2013	Semoir « semis direct » Semeato TDNG
	2014 à 2016	Broyeur tracté ; Semoir à dents Guilbart T drill
	2017	Semoir « semis direct » Huard SD 300 puis broyeur tracté

Annexe 3 : Itinéraires d'implantation mis en œuvre sur l'essai travail du sol, culture de maïs précédent blé (point d'entrée B)

Culture	Modalité	Itinéraire d'implantation type
L0N	1971 à 1979	Broyeur tracté, Rotavator en aout, labour en novembre, reprise en mars-avril (herse, vibroculteur, herse alternative), Pneumasem Nodet à socs
	1980 à 2001	Broyeur tracté certaines années, labour en novembre, reprise en mars-avril (herse rotative, Rau Combi, vibroculteur, herse alternative, herse), Planteur Nodet à socs et disques ou Pneumasem Nodet à socs
	2002 à 2009	Labour en novembre, reprise en mars-avril (herse rotative, vibroculteur), semoir semis direct Ribouleau NX
	2010 à 2015	Broyeur tracté (2010, 2014), déchaumages entre août et octobre (déchaumeur à disques indépendants, vibro-déchaumeur), Labour en novembre, reprise en février à 10 cm avec un cultivateur (2015), reprise avant semis (herse rotative, vibroculteur), semoir semis direct Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Déchaumage (cover crop) ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Labour mi à fin-novembre (servant aussi à détruire le couvert), reprise en avril (herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
	2017	
L0C	1971 à 1979	Broyeur tracté, Rotavator en aout, labour en novembre, reprise en mars-avril (herse, vibroculteur, herse alternative), Pneumasem Nodet à socs
	1980 à 2001	Broyeur tracté certaines années, labour en novembre, reprise en mars-avril (herse rotative, Rau Combi, vibroculteur, herse alternative, herse), Planteur Nodet à socs et disques ou Pneumasem Nodet à socs
	2002 à 2009	Semis direct d'un couvert avec Sulky Unidrill sur chaume fin aout-début septembre, Labour mi à fin-novembre (servant aussi à détruire le couvert), reprise en mars-avril (herse rotative, vibroculteur), semoir semis direct Ribouleau NX
	2010 à 2015	Broyeur tracté (2010, 2014), déchaumage en aout (déchaumeur à disques indépendants ou vibro-déchaumeur), Semis d'un couvert mi à fin août (à la volée sur Allrounder ; à la dent avec Semeflex ou T drill), Broyage (2014), Labour mi à fin-novembre (servant aussi à détruire le couvert), reprise en février à 10 cm avec un cultivateur (2015), reprise avant semis (herse rotative, vibroculteur), semoir semis direct Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Déchaumage (cover crop) ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Labour mi à fin-novembre (servant aussi à détruire le couvert), reprise en avril (herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
L1N	1971 à 1978	Broyeur tracté, Rotavator entre aout et octobre, Rotavator entre novembre et avril, reprise en mars-avril (herse, vibroculteur, rotavator), Pneumasem Nodet à socs
	1979	Broyeur tracté, Rotavator en septembre, déchaumeuse à socs Gourdin en décembre, reprise en avril-mai (herse alternative), Pneumasem Nodet à socs
	1980 à 1998	Broyeur tracté, déchaumeuse à socs Gourdin entre novembre et janvier, reprise en avril (herse rotative, Rau Combi, vibroculteur, herse alternative), Planteur Nodet à socs et disques ou Pneumasem Nodet à socs
	1999 à 2001	Rotavator entre novembre et février, reprise en mars-avril (vibroculteur, herse alternative, herse rotative), Planteur Nodet à socs et disques

	2002 à 2009	Rotavator entre novembre et février (avril en 2006), reprise entre mars et mai (vibroculteur, herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
	2010 à 2015	Broyeur tracté (2010, 2014), déchaumages entre aout et octobre (déchaumeur à disques indépendants, vibro-déchaumeur), Rotavator en décembre (2010), cultivateur à 10 cm en novembre (2014), reprise à 10 cm avec un cultivateur en février (2015), reprise en avril (herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Déchaumage (cover crop) ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Cultivateur à 10 cm en novembre (servant aussi à détruire le couvert), reprise en avril (herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
L1C	1971 à 1978	Broyeur tracté, Rotavator entre aout et octobre, Rotavator entre novembre et avril, reprise en mars-avril (herse, vibroculteur, rotavator), Pneumasem Nodet à socs
	1979	Broyeur tracté, Rotavator en septembre, déchaumeuse à socs Gourdin en décembre, reprise en avril-mai (herse alternative), Pneumasem Nodet à socs
	1980 à 1998	Broyeur tracté, déchaumeuse à socs Gourdin entre novembre et janvier, reprise en avril (herse rotative, Rau Combi, vibroculteur, herse alternative), Planteur Nodet à socs et disques ou Pneumasem Nodet à socs
	1999 à 2001	Rotavator entre novembre et février, reprise en mars-avril (vibroculteur, herse alternative, herse rotative), Planteur Nodet à socs et disques
	2002 à 2009	Semis direct d'un couvert avec Sulky Unidrill sur chaume fin aout-début septembre, destruction chimique du couvert mi à fin novembre (sauf 2006 : mi-mars), Rotavator entre novembre et février (avril en 2006), reprise entre mars et mai (vibroculteur, herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
	2010 à 2015	Broyeur tracté (2010, 2014), déchaumage en aout (déchaumeur à disques indépendants ou vibro-déchaumeur), Semis d'un couvert mi à fin août (à la volée sur Allrounder ; à la dent avec Semeflex ou T drill), destruction chimique du couvert mi-novembre sauf 2014, Cultivateur à 10 cm en novembre (2014, servant aussi à détruire le couvert), Rotavator en décembre (2010), cultivateur en février à 10 cm (2015), reprise en avril (herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Déchaumage (cover crop) ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Cultivateur à 10 cm en novembre (servant aussi à détruire le couvert), reprise en avril (herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
L'1N	1971 à 1978	Broyeur tracté, Rotavator entre aout et octobre, Rotavator entre novembre et avril, reprise en mars-avril (herse, vibroculteur, rotavator), Pneumasem Nodet à socs
	1979	Broyeur tracté, Rotavator en septembre, déchaumeuse à socs Gourdin en décembre, reprise en avril-mai (herse alternative), Pneumasem Nodet à socs
	1980 à 1998	Broyeur tracté, déchaumeuse à socs Gourdin entre novembre et janvier, reprise en avril (herse rotative, Rau Combi, vibroculteur, herse alternative), Planteur Nodet à socs et disques ou Pneumasem Nodet à socs
	1999 à 2001	Rotavator entre novembre et février, reprise en mars-avril (vibroculteur, herse alternative, herse rotative), Planteur Nodet à socs et disques
	2002 à 2009	Rotavator et/ou herse rotative en avril ou mai (novembre en 2006), semoir semis direct Ribouleau NX
	2010 à 2015	Broyeur tracté (2010, 2014), déchaumages entre aout et octobre (déchaumeur à disques indépendants, vibro-déchaumeur), cultivateur en février à 10 cm (2015), Herse rotative en avril, semoir semis direct Ribouleau NX

	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Déchaumage (cover crop) ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Rolo faca en février pour détruire le couvert, reprise avant semis (herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
L'1C	1971 à 1978	Broyeur tracté, Rotavator entre aout et octobre, Rotavator entre novembre et avril, reprise en mars-avril (herse, vibroculteur, rotavator), Pneumasem Nodet à socs
	1979	Broyeur tracté, Rotavator en septembre, déchaumeuse à socs Gourdin en décembre, reprise en avril-mai (herse alternative), Pneumasem Nodet à socs
	1980 à 1998	Broyeur tracté, déchaumeuse à socs Gourdin entre novembre et janvier, reprise en avril (herse rotative, Rau Combi, vibroculteur, herse alternative), Planteur Nodet à socs et disques ou Pneumasem Nodet à socs
	1999 à 2001	Rotavator entre novembre et février, reprise en mars-avril (vibroculteur, herse alternative, herse rotative), Planteur Nodet à socs et disques
	2002 à 2009	Semis direct d'un couvert avec Sulky Unidrill sur chaume fin aout-début septembre, destruction chimique du couvert mi-mars à début avril (sauf 2006 : mi-novembre, sauf 2009 : fin février), Rotavator et/ou herse rotative en avril ou mai (novembre en 2006), semoir semis direct Ribouleau NX
	2010 à 2015	Broyeur tracté (2010, 2014), déchaumage en aout (déchaumeur à disques indépendants, vibro-déchaumeur), Semis d'un couvert mi à fin août (à la volée sur Allrounder ; à la dent avec Semeflex ou T drill), destruction chimique du couvert fin février-début mars (sauf 2012 : gel en février ; sauf 2015 : cultivateur à 10 cm en février), Herse rotative avant semis, semoir semis direct Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Déchaumage (cover crop) ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Rolo faca en février pour détruire le couvert, reprise en avril (herse rotative), semoir semis direct Ribouleau NX
L2N	1971	Semoir prototype « semis direct » Benac à disques ouvreurs et socs semeurs
	1972 à 1977	Broyeur tracté, semoir prototype « semis direct » Nodet à socs et couteaux tournants
	1978 à 1986	Broyeur tracté, semoir Huard SDM2 avec bandes fraisées et semoir à disques et socs
	1987 à 1998	Rotasemis : bandes fraisées avec rotalabour Howard + semoir Pneumasem Nodet à socs
	1999 à 2001	Rotasemis : bandes fraisées avec rotalabour Howard + semoir Planteur Nodet à disques et à socs
	2002 à 2015	Semoir « semis direct » Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Destruction chimique du couvert ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Destruction chimique en novembre ; Semoir semis direct Ribouleau NX
L2C	1971	Semoir prototype « semis direct » Benac à disques ouvreurs et socs semeurs
	1972 à 1977	Broyeur tracté, semoir prototype « semis direct » Nodet à socs et couteaux tournants
	1978 à 1986	Broyeur tracté, semoir Huard SDM2 avec bandes fraisées et semoir à disques et socs
	1987 à 1998	Rotasemis : bandes fraisées avec rotalabour Howard + semoir Pneumasem Nodet à socs
	1999 à 2001	Rotasemis : bandes fraisées avec rotalabour Howard + semoir Planteur Nodet à disques et à socs

	2002 à 2015	Semis direct d'un couvert sur chaume début aout à début septembre (SD à disques avec Sulky Unidrill de 02 à 13 ; SD à dents avec Guilbart T drill de 14 à 15) ; destruction chimique du couvert mi à fin novembre (sauf 2006 : mi-mars) ; Semoir « semis direct » Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Destruction chimique du couvert ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Destruction chimique en novembre ; Semoir semis direct Ribouleau NX
L'2N	1971	Semoir prototype « semis direct » Benac à disques ouvreurs et socs semeurs
	1972 à 1977	Broyeur tracté, semoir prototype « semis direct » Nodet à socs et couteaux tournants
	1978 à 1986	Broyeur tracté, semoir Huard SDM2 avec bandes fraisées et semoir à disques et socs
	1987 à 1998	Rotasemis : bandes fraisées avec rotalabour Howard + semoir Pneumasem Nodet à socs
	1999 à 2001	Rotasemis : bandes fraisées avec rotalabour Howard + semoir Planteur Nodet à disques et à socs
	2002 à 2015	Semoir « semis direct » Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Destruction chimique du couvert ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Rolo faca en février pour détruire le couvert ; Semoir semis direct Ribouleau NX
L'2C	1971	Semoir prototype « semis direct » Benac à disques ouvreurs et socs semeurs
	1972 à 1977	Broyeur tracté, semoir prototype « semis direct » Nodet à socs et couteaux tournants
	1978 à 1986	Broyeur tracté, semoir Huard SDM2 avec bandes fraisées et semoir à disques et socs
	1987 à 1998	Rotasemis : bandes fraisées avec rotalabour Howard + semoir Pneumasem Nodet à socs
	1999 à 2001	Rotasemis : bandes fraisées avec rotalabour Howard + semoir Planteur Nodet à disques et à socs
	2002 à 2015	Semis direct d'un couvert sur chaume début aout à début septembre (SD à disques avec Sulky Unidrill de 02 à 13 ; SD à dents avec Guilbart T drill de 14 à 15) ; destruction chimique du couvert fin février à début avril (sauf 2006 : mi-novembre ; sauf 2012 : gel en février) ; Semoir « semis direct » Ribouleau NX
	2016	Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques (couvert détruit car très sale) ; Destruction chimique du couvert ; Semis d'un couvert avec un semoir SD à disques ; Rolo faca en février pour détruire le couvert ; Semoir semis direct Ribouleau NX

Annexe 4 : Extrait d'un relevé de flore dans les années 1970. Ici relevé de 1974

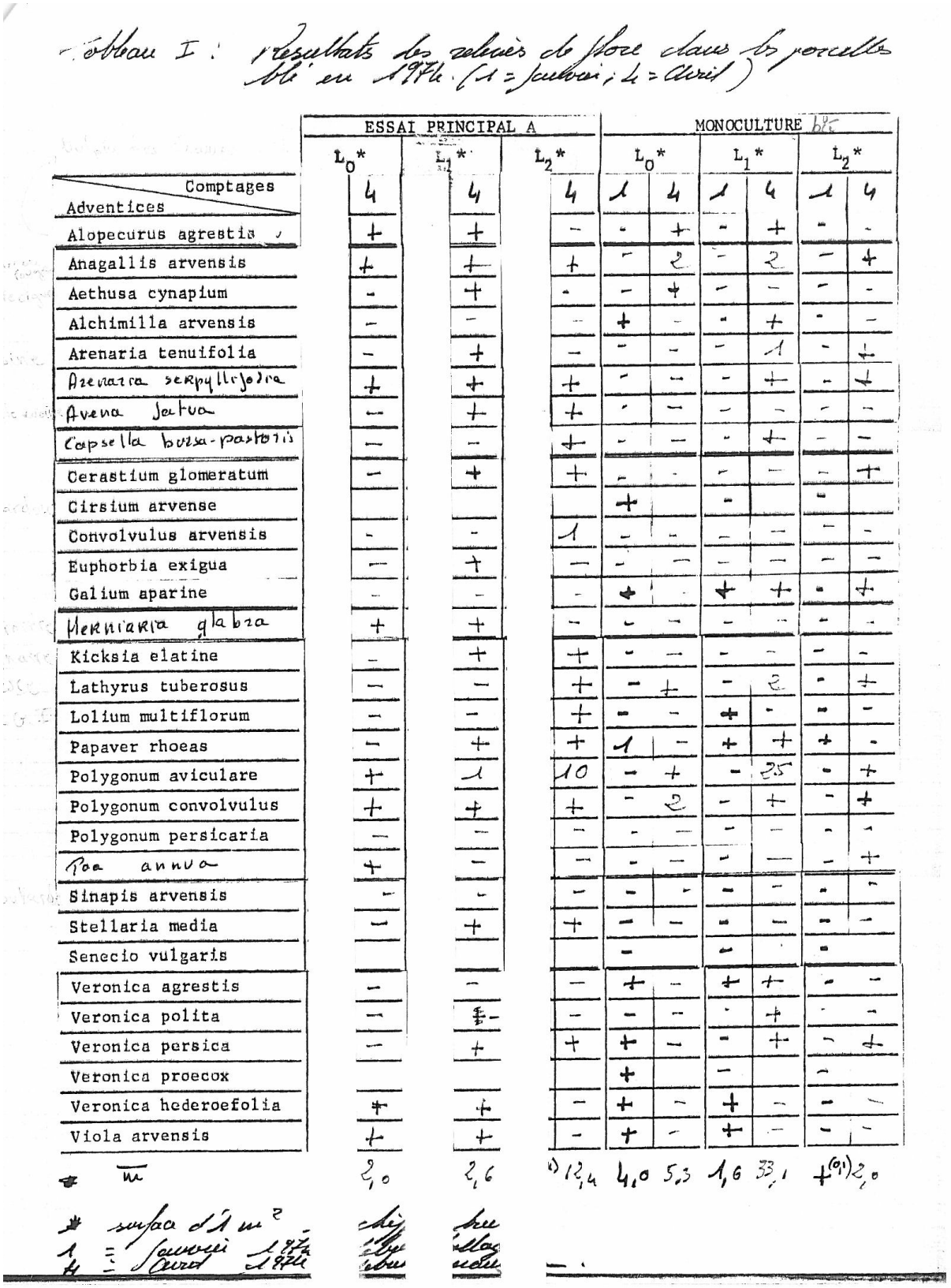


Tableau I : Résultats des relevés de flore dans les parcelles labourées en 1974. (1 = janvier ; 4 = avril)

Adventices \ Comptages	ESSAI PRINCIPAL A L_0* 4	ESSAI PRINCIPAL A L_1* 4	ESSAI PRINCIPAL A L_2* 4	MONOCULTURE L_0* 1	MONOCULTURE L_0* 4	MONOCULTURE L_1* 1	MONOCULTURE L_1* 4	MONOCULTURE L_2* 1	MONOCULTURE L_2* 4
Alopecurus agrestis	+	+	-	-	+	-	+	-	-
Anagallis arvensis	+	+	+	-	2	-	2	-	+
Aethusa cynapium	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Alchimilla arvensis	-	-	-	+	-	-	+	-	-
Arenaria tenuifolia	-	+	-	-	-	-	1	-	+
Arenaria serpyllifolia	+	+	+	-	-	-	+	-	+
Avena fatua	-	+	+	-	-	-	-	-	-
Capsella bursa-pastoris	-	-	+	-	-	-	+	-	-
Cerastium glomeratum	-	+	+	-	-	-	-	-	+
Cirsium arvense				+		-		-	
Convolvulus arvensis	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Euphorbia exigua	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Galium aparine	-	-	-	+	-	+	+	-	+
Herniaria glabra	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Kicksia elatine	-	+	+	-	-	-	-	-	-
Lathyrus tuberosus	-	-	+	-	+	-	2	-	+
Lolium multiflorum	-	-	+	-	-	+	-	-	-
Papaver rhoeas	-	+	+	1	-	+	+	+	-
Polygonum aviculare	+	1	10	-	+	-	25	-	+
Polygonum convolvulus	+	+	+	-	2	-	+	-	+
Polygonum persicaria	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Poa annua	+	-	-	-	-	-	-	-	+
Sinapis arvensis	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stellaria media	-	+	+	-	-	-	-	-	-
Senecio vulgaris				-		-		-	
Veronica agrestis	-	-	-	-	+	-	+	+	-
Veronica polita	-	±	-	-	-	-	·	+	·
Veronica persica	-	+	+	+	-	-	+	-	+
Veronica proecox				+		-		-	
Veronica hederoefolia	+	+	-	+	-	+	-	-	-
Viola arvensis	+	+	-	+	-	+	-	-	-
# $\overline{m}$	2,0	2,6	1) 12,4	4,0	5,3	1,6	33,1	+(0,1)	2,0

# surface d'1 m²
1 = janvier 1974
4 = avril 1974

Annexe 5 : Calcul de l'abondance

$$D_{i,j} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{Q_{1,j}} \sum_{q_{1,j}}^{Q_{1,j}} d_{q_1} + \frac{1}{Q_{2,j}} \sum_{q_{2,j}}^{Q_{2,j}} d_{q_2}\right)$$

Avec $D_{i,j}$: l'abondance toute espèce confondue de la modalité i au jour j de l'observation. Avec i= L0N, L0C, L1N, L1C, L'1N, L'1C, L2N, L2C, L'2N, L'2C pour une culture donnée.

$Q_{1,j}$: le nombre de cadres lancés sur la parcelle élémentaire du bloc I au jour j

$Q_{2,j}$: le nombre de cadres lancés sur la parcelle élémentaire du bloc II au jour j

d_{q_1} : la somme des densités de toutes les espèces présentes dans le cadre $q_{1,j}$ de la parcelle élémentaire du bloc 1 au jour j

d_{q_2} : la somme des densités de toutes les espèces présentes dans le cadre $q_{2,j}$ de la parcelle élémentaire du bloc 2 au jour j

Annexe 6 : Calcul de la richesse spécifique

$$E_{i,j} = \frac{1}{2} \times (\frac{1}{Q_{1,j}} \sum_{q_{1,j}}^{Q_{1,j}} e_{q_{1,j}} + \frac{1}{Q_{2,j}} \sum_{q_{2,j}}^{Q_{2,j}} e_{q_{2,j}})$$

Avec $E_{i,j}$: La richesse spécifique moyenne de la modalité i au jour j de l'observation. Avec i= L0N, L0C, L1N, L1C, L'1N, L'1C, L2N, L2C, L'2N, L'2C pour une culture donnée.

$Q_{1,j}$: le nombre de cadres lancés sur la parcelle élémentaire du bloc 1 au jour j

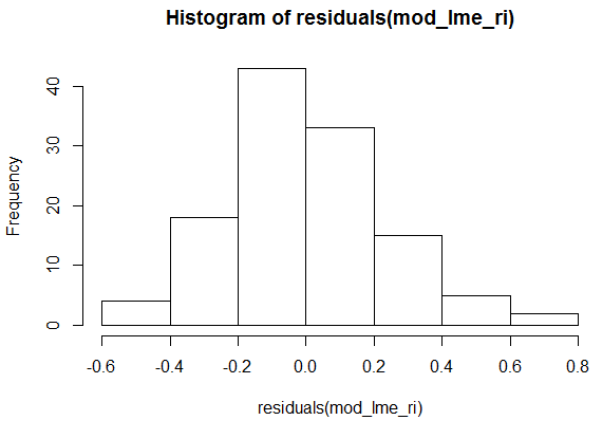
$Q_{2,j}$: le nombre de cadres lancés sur la parcelle élémentaire du bloc 2 au jour j

$e_{q_{1,j}}$: le nombre d'espèces différentes dans le cadre q_1 de la parcelle (bloc 1)

$e_{q_{2,j}}$: le nombre d'espèces différentes dans le cadre q_2 de la parcelle (bloc 2)

Annexe 7 : postulats de l'analyse de variance de la richesse spécifique

Distribution des résidus :



On voit ici que la distribution des résidus est normale.

Test d'homogénéité des variances

Bartlett test of homogeneity of variances

data: residri by Modalite
Bartlett's K-squared = 6.592, df = 4, p-value = 0.1591

Bartlett test of homogeneity of variances

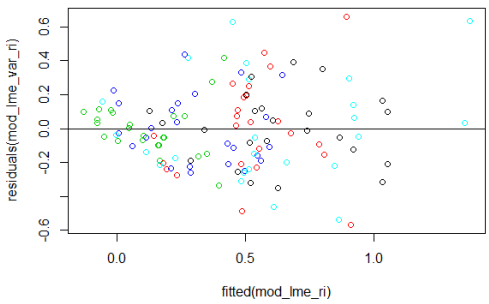
data: residri by Interculture
Bartlett's K-squared = 2.6041, df = 1, p-value = 0.1066

Bartlett test of homogeneity of variances

data: residri by Point_entree
Bartlett's K-squared = 0.80113, df = 1, p-value = 0.3708

L'homogénéité des variances est confirmée pour les 3 facteurs : Modalité, Interculture et Point d'entrée.

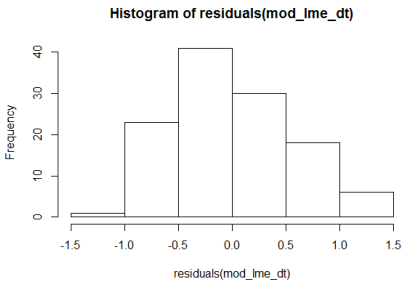
Vérification de l'indépendance des résidus :



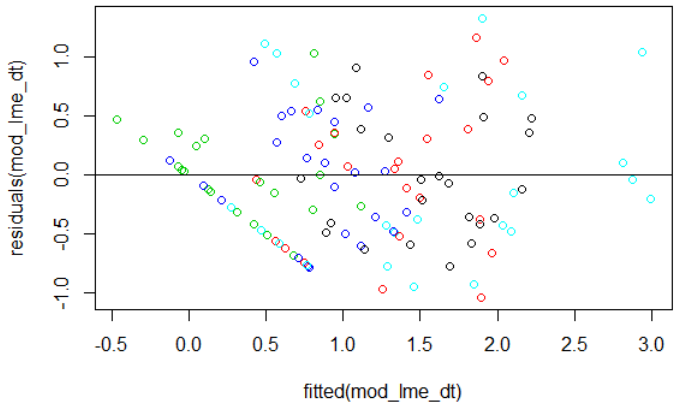
Les résidus présentent une répartition indépendante.

Annexe 8 : Postulats de l'analyse de variance pour l'abondance

Distribution des résidus :



Vérification de l'indépendance des résidus :



Test d'homogénéité des variances

Bartlett test of homogeneity of variances

data: residdt by Modalite
Bartlett's K-squared = 8.0931, df = 4, p-value = 0.08823

> bartlett.test(residdt~Interculture, DF2)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: residdt by Interculture
Bartlett's K-squared = 0.25963, df = 1, p-value = 0.6104

> bartlett.test(residdt~Rotation, DF2)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: residdt by Point_entree
Bartlett's K-squared = 0.90326, df = 1, p-value = 0.3419

20110315					
structure_initiale_sol	TERRE_FINE				initial soil structure: either a file name (see initialSoilStructure sheet) or a soil structure class (TERRE_FINE MOTTEUX TASSE)
conditions_humidités_initiales	MOYEN_SEC				soil moisture at simulation onset, choose HUMIDE,MOYEN_HUM,MOYEN_SEC, or SEC
texture_du_sol_ALS(0-100)		24	68	8	soil texture of simulated field, in % with sum of three variables = 100: clay, silt, sand
cailloux(0-100)		2			%gravel and stones (0-100%)
profondeur_du_sol		80			soil depth (cm)
					Caution: these percentages and cm must be integers (not floats)

sol_name	Sol_bloc_D	nom du sol
argi	25.3	teneur en argile de la couche de surface [%]
Norg	0.12	teneur massique en azote organique dans l'horizon d'humification (de la surface du sol à profhum) [0.05%-0.3%]
profhum	30	profondeur équivalente d'humification entre la profondeur de labour et 60cm [cm]
calc	0.1	teneur en calcaire dans la couche de surface [%]
pH	7	
concseuil	0	concentration minimale du sol en NH4
albedo	0.18	albédo du sol nu à l'état sec (SD)
q0	8	limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol [mm]
ruisolnu	0	fraction de la pluie ruisselée (par rapport à la pluie totale) en conditions de sol nu
obstarac	200	limitation de l'enracinement par la profondeur du sol [cm] (pour info, profondeur maximale simulable = 10m)
capiljour	1	remontées capillaires [mm/j]
humcapil	10	humidité minimale pour activation remontées capillaires [geau/gsol]
profimper	10	profondeur de l'imperméable [cm]
ecartdrain	0	écartement entre drains [cm]
ksol	0	conductivité hydraulique à saturation pour le transport de l'eau vers les drains [cm/j]
profdrain	0	profondeur des drains [cm]

epc : épaisseur de l'horizon [cm] :
HCCF : humidité à la capacité au champ [geau/gsol]
humidité minimale exploitable par la plante [geau/gsol]
DAF: densité apparente
cailloux : teneur volumique en cailloux des horizons [%]
typecailloux
infil : infiltrabilité à la base de chaque horizon [mm/j]
epd : épaisseur de chaque couche de la microporosité [cm]

Num_horiz	epc	HCCF	HMINF	DAF	cailloux	typecailloux	infil	epd
HORIZON_	25	25.9	10.2	1.49	0	*1*	***50***	1
HORIZON_	30	23.5	13.3	1.51	0	*1*	***50***	1
HORIZON_	40	21	14.6	1.52	0	*1*	***50***	1
HORIZON_	0	0	0	1.2	0	*4*	***2.87***	1
HORIZON_	0	0	0	1.3	0	*4*	***2.28***	1

duree		11 YEARS							Number of PERIODS or number of YEARS
									If Number of crop management strategies to simulate (N PERIODS). Two poss: Below are listed N crop management strategies
									Below are listed m (with m<N) crop management strategies, followed by REP
									If number fo years (N YEARS), N years are simulated - either enough crop management strategies are listed below to cover N years
									- if fewer strategies are listed, they must be followed by REPEAT to be used sufficiently often to cover th
									If the listed strategies cover more than N years, they are run at least once .
herbicideTechni	OPTIMUM								Technical ability of the farmer for applying herbicides
									- OPTIMUM: l'efficacité potentielle de l'herbicide sera celle indiquée dans herbicides.par (en cas de taux entre 0 et 1) ou la borne supérieure d
									- SUB_OPTIMUM: l'efficacité potentielle de l'herbicide sera égale à 0.975 fois celle indiquée dans herbicides.par (en cas de taux entre 0 et 1)
									- LOW: l'efficacité potentielle de l'herbicide sera égale à 0.95 fois celle indiquée dans herbicides.par (en cas de taux entre 0 et 1) ou la valeur i
PERIOD	BLE	291	2005						**Crop management name**
STRAWBURIAL		NO							Beginning (date DDD YYYY) : The following period begins the day after the harvest of the previous main cro **Caution** Check whether this date is the day afte
NEXT	TILLAGE	293	2005	ROTAVATOR	7	0	4		**Burial of previous crop residues**: options are YES or NO. **Caution:** no effect yet in FLORSYS
ORIENTATION		WE							For each operation then give: date (DDD YYYY). If last tillage operation on sowing date, both operations are considered associated on a single tract
NEXT	SOWING	293	2005	NO	17.6	0	NO	NO	tool: LABOUR,HROT,VIBRO,CHISEL,ROTAVATOR, BECHAGE MELANGE10, MELANGE5. ROULEAU COVERCF
		1							For each operation other than ROULE: speed (km/h)
		BLE\CAPHOI	PRIM/	280	3	NONE			width (cm): distance between two plough shares in case of LABOUR, 0 otherwise
SEED_FUNGICI	NO								depth (cm): tillage depth. In case of combination of tools (i.e. ACTISOL, VIBRO_ROULEAU, ROTA_ROULEAU, CC_F
									For LABOUR also indicate: width (cm) of skim-coulter. Put zero if no skim-coulter
									depth (cm) of skim-coulter. Put zero if no skim-coulter
									Orientation de semis : NS | WE
									For each operation, give
NEXT	HERBICIDE	291	2005	GLYFOS	1.08	KG/HA	GLOBAL		date (DDD YYYY). If last tillage operation on sowing date, both operations are considered associated on a single tractor passage
NEXT	HERBICIDE	95	2006	ARCHIPEL	0.25	KG/HA	GLOBAL		semis à la volée : YES | NO
NEXT	HERBICIDE	110	2006	MONDIUM	1.5	L/HA	GLOBAL		si semis à la volée = NO: interrang moyen [cm]
									distance à la première culture [cm] : distance avec le rang de la 1ère culture
									alignement parfait : YES | NO (écart-type interrang = 0 | > 0)
									précision : YES | NO (écart-type intrarang = 0 | > 0)
									Number of sown crops
NEXT	MOWING	291	2005		5	NO	0		For each crop: Culture (format "SPECIES" ou "SPECIES!VARIETY"). These w **Caution:** when using the disease submodel, cro
NEXT	MOWING	291	2005		3	NO	0		statut : PRIMARY | SECONDARY | TEMPORARY (seules les cultures principales PRIMARY sont récoltées)
NEXT	FUNGICIDE	117	2006	UNIX	0.8	L/HA			densité de semis en graines/m² **Caution:** the number of sown seeds must exceed the number of crop rows
NEXT	FUNGICIDE	131	2006	ACANTO	0.4	L/HA			si semis à la volée = NO: profondeur de semis [cm] entre 0 et 29
NEXT	FUNGICIDE	131	2006	OPUS	0.3	L/HA			if more than 1 crop: nbrangs/total : proportion du rang de cette culture (ex: 2
NEXT	FUNGICIDE	152	2006	TRIADE	0.75	L/HA			mélange : YES | NO (oui si la culture est semée mélangée
NEXT	FUNGICIDE	152	2006	ACANTO	0.5	L/HA			numérodeculture/total (si 3 cultures mélangées, 1/3 pour
									Caution: do not sow a mixture comprising the same SP
NEXT	INSECTICIDE	318	2005	KARATE	0.08	L/HA			Weed seed contamination of crop seed lot: NONE (no contamination) or file names corresponding to CropSeedLotC
									Fungicide seed treatment on cereals against take-all. Options are: YES or NO. SILTHIOFAM instead of YES is also accepted. **Caution**: if FUNGICIDE is pre
NEXT	FERTILIZATION	66	2006	58	75				If missing, no seed fungicide is used
NEXT	FERTILIZATION	94	2006	120	50				WARNING : If several herbicides are sprayed as a mixture, list them individually, using the same treatment date. However, because of stochasticity in herbicide
									For each application then give: date (DDD YYYY)
									commercial name (see herbicides.par files) **Caution:** if you want a herbicide to destroy a cro
									rate
NEXT	HARVEST	200	2006	15					unit of rate: l/ha, kg/ha or g/ha. The latter is transformed into kg/ha in the program

Annexe 11 : Rapprochement entre différentes variétés de blé et celles paramétrées dans FlorSys

WHEAT			
Actual varieties grown in fields	**Closest FLORSYS varieties**		
	Caphorn	Orvantis	Cézanne
Hyno-rista		x	x
Pactole		x	
Renan		x	x
Isengrain		x	
Somme		x	
Malacca	x		
Apache			x
Folio		x	
soissons		x	
virtuose		x	
arezzio		x	
premio		x	
goncourt		x	
charger	x		
sankara	x		
nirvana	x		
tremie	x		

Annexe 12 : Calcul de l'abondance des données simulées

$$\widehat{D}_{i,j} = \frac{1}{R}\sum_{r=1}^{R} \hat{d}_{r,j}$$

Avec $\widehat{D}_{i,j}$: la densité moyenne simulée de la modalité i toute espèce confondue au jour j (en plantes/m²)

R : le nombre de répétitions simulées (ici 10)

$\hat{d}_{r,j}$: la somme des densités de toutes les espèces présentes dans la répétition r le jour j

Annexe 13 : Calculs des indicateurs de comparaison entre les données simulées et observées

- **Calcul de la RMSEP :**

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{i,j}(D_{i,j} - \widehat{D}_{i,j})^2}{20 \times d}}$$

Avec

$\widehat{D}_{i,j}$: la densité moyenne simulée de la modalité i toute espèce confondue au jour j (en plantes/m²)

$D_{i,j}$: la densité moyenne toute espèce confondue de la modalité i au jour j de l'observation. Avec i= L0N, L0C, L1N, L1C, L'1N, L'1C, L2N, L2C, L'2N, L'2C pour une culture donnée.

d : nombre de dates d'observations en parcelles

20 : nombre de modalités dans l'essai

- **Calcul de la $\boldsymbol{RMSEP_{corr}}$:**

$$RMSEP_{corr} = \sqrt{\frac{\sum_{i,j}(D_{i,j} - \widehat{D}_{i,j})^2}{20 \times d} - var_{obs} - var_{sim}}$$

Avec :

var_{obs} : Variance observée intercadre toutes dates et toutes modalités confondues

var_{sim} : Variance simulée inter « répétitions » toutes dates et toutes modalités confondues

- **Calcul du coefficient de Pearson (r)**

$$r = \frac{(D_{i,j} - \overline{D})(\widehat{\mathbb{D}}_{i,j} - \overline{\widehat{D}})}{\sqrt{\sum(D_{i,j} - \overline{D})^2} * \sqrt{\sum(\widehat{D}_{i,j} - \overline{\widehat{D}})^2}}$$

- **Calcul de l'efficience du modèle (EF)**

$$EF = 1 - \frac{\sum(D_{i,j} - \widehat{D}_{i,j})^2}{\sum(D_{i,j} - \overline{D})^2}$$

- **Calcul du biais du modèle (B)**

$$B = \frac{1}{N} \times \sum(D_{i,j} - \widehat{D}_{i,j})$$

Avec N : le nombre de modalités par année d'observation

Annexe 14 : Calcul de la variance des données observées et simulées

- **Variance observée intercadre toutes dates et toutes modalités confondues :**

$$var_{obs} = \frac{1}{2\times J\times I}\times(\frac{1}{Q_1}\sum_{i,j,q_1}^{Q_1,J,I}\left(d_{1,i,j} - d_{i,j,q_1}\right)^2 + \frac{1}{Q_2}\sum_{i,j,q_2}^{Q_2,J,I}\left(d_{2,i,j} - d_{i,j,q_2}\right)^2)$$

Avec

J : le nombre de jours d'observation en parcelle (ici 5)

I : le nombre de modalités soit 20

Q_1: le nombre de cadre dans le bloc 1 (répétition 1)

Q_2 : le nombre de cadres dans le bloc 2 (répétition 2)

$d_{1,i,j}$: la densité moyenne dans la répétition 1 de la modalité i au jour j (bloc 1)

$d_{2,i,j}$: la densité moyenne dans la répétition 2 de la modalité i au jour j (bloc 2)

$\hat{d}_{i,j,q_1}$: la densité totale, toute espèce confondue, dans le cadre q_1 de la répétition 1 de la modalité i (bloc 1)

d_{i,j,q_2} : la densité totale, toute espèce confondue, dans le cadre q_2 de la répétition 2 de la modalité i (bloc 2)

- **Variance simulée inter « répétitions » toutes dates et toutes modalités confondues :**

$$var_{sim} = \frac{1}{R\times I\times J}\sum_{r,i,j}(\hat{d}_{i,j} - \hat{d}_{r,i,j})^2$$

Avec

R : le nombre de cadres lancés dans la modalité i

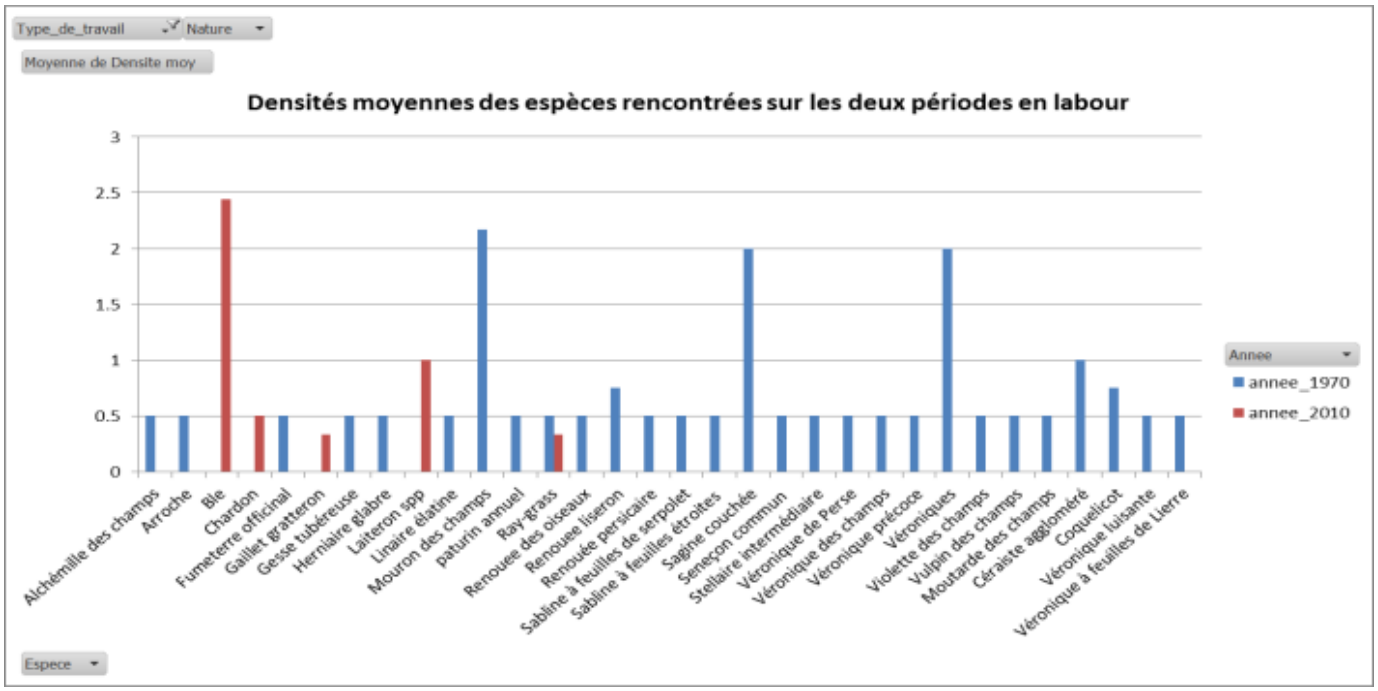
I : le nombre de modalités soit 20

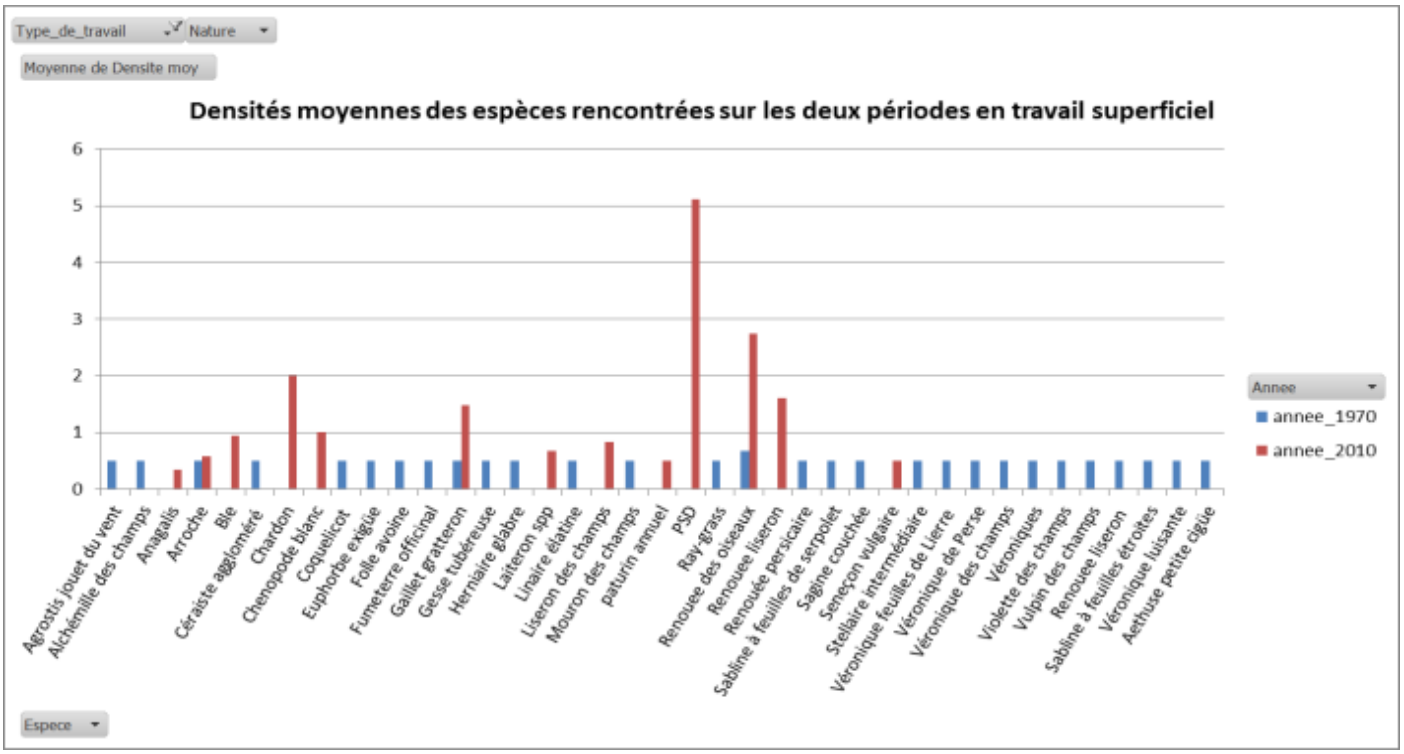
J : Le nombre de jour d'observation en parcelle (ici 5)

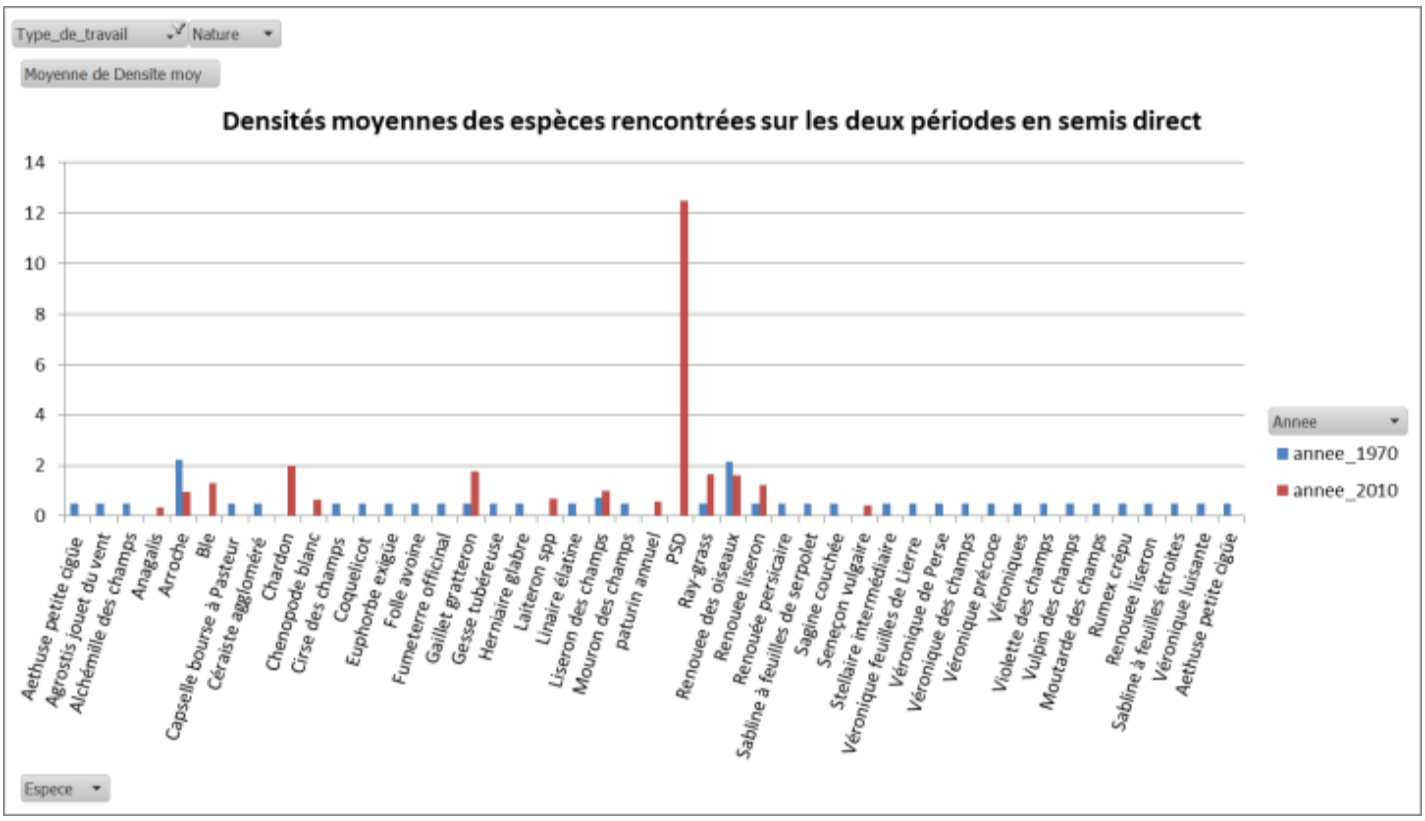
$\hat{d}_{i,j}$: la densité moyenne de la modalité i au jour j

$\hat{d}_{r,i,j}$: la densité moyenne (et non pas totale ici car ce sont des répétitions de modalité et non pas un nombre de cadre) dans la répétition r de la modalité i au jour j

Annexe 15 : Comparaison des espèces d'adventices présentes entre les années 1970 et 2010






Type_de_travail
Nature
Moyenne de Densite moy
Densités moyennes des espèces rencontrées sur les deux périodes en semis direct
14
12
10
8
6
4
2
0
Aethuse petite cigüe
Agrostis jouet du vent
Alchémille des champs
Anagalis
Arroche
Ble
Capselle bourse à Pasteur
Céraiste aggloméré
Chardon
Chenopode blanc
Cirse des champs
Coquelicot
Euphorbe exigüe
Folle avoine
Fumeterre officinal
Gaillet gratteron
Gesse tubéreuse
Herniaire glabre
Laiteron spp
Linaire élatine
Liseron des champs
Mouron des champs
paturin annuel
PSD
Ray-grass
Renouee des oiseaux
Renouee liseron
Renouée persicaire
Sabline à feuilles de serpolet
Sagine couchée
Seneçon vulgaire
Stellaire intermédiaire
Véronique feuilles de Lierre
Véronique de Perse
Véronique des champs
Véronique précoce
Véroniques
Violette des champs
Vulpin des champs
Moutarde des champs
Rumex crépu
Renouee liseron
Sabline à feuilles étroites
Véronique luisante
Aethuse petite cigüe
Annee
annee_1970
annee_2010
Espece

	Diplôme / Mention : Master 2 Sciences Technologie Santé Mention Biologie Agronomie Santé Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV) Parcours II. Sélection, Production et Valorisation des Végétaux (SP Option : Productions Végétales Intégrées Responsable d'option : M. Carof
Auteur(s) : Alice Guesdon Vennerie Date de naissance* : 12 Août 1989 Nb pages : 25 Annexe(s) : 19 Année de soutenance : 2017	Organisme d'accueil : Arvalis-Institut du Végétal Adresse : Station expérimentale 91720 Boigneville Maître de stage : Pascale METAIS

Titre français : Impact du travail du sol sur les adventices : Enseignements de l'essai travail du sol de longue durée de Boigneville et simulation

Titre anglais : Analysis of different degrees of tillage effects on weed dynamic with observations in the Boigneville long term cropping system trial and simulations

Résumé : Dans un contexte de simplification du travail du sol et de réduction de l'usage des produits phytosanitaires, la lutte contre les adventices apparaît comme un enjeu majeur dans l'agriculture ces dernières années. Des dispositifs expérimentaux comme l'essai travail du sol de longue durée de Boigneville permettent le suivi des adventices en lien avec différentes modalités de travail du sol et d'autres facteurs. La modélisation se révèle être également un bon moyen d'étude des effets de pratiques culturales comme le travail du sol sur la flore adventice. Le modèle mécaniste, plurispécifique et pluriannuel FLORSYS, développé par l'INRA de Dijon, peut prédire les effets à long terme de systèmes de cultures futurs sur le développement des adventices. Les résultats de l'analyse sur le dispositif expérimental ont montré que la richesse spécifique et l'abondance en adventices augmentent avec la simplification du travail du sol. L'effet d'autres facteurs comme la présence ou non de couverts en interculture ou la gestion des résidus de culture n'a pas été mise en évidence. L'évaluation du modèle FLORSYS dans le contexte de la station de Boigneville a montré une surévaluation des densités en adventices par rapport aux densités expérimentales. Cependant, l'effet travail du sol a bien été mis en évidence, avec un classement cohérent des modalités par rapport aux résultats expérimentaux. Le modèle peut être utilisé pour comparer plusieurs systèmes sur du long terme mais pas pour prédire une densité en adventices absolue.

Abstract : In a context of tillage simplification and pesticide reduction, weed management seems to be a major issue in actual agriculture. Boigneville long term cropping system trial enable study of weed flora dynamic through different modalities of tillage and others factors. Modelling also turn out to be a good way to study cultural techniques as tillage on weed flora dynamic. Mechanistic, multispecific weed and multiannual model FLORSYS, developed by Dijon's INRA predict long-term effects of future cropping systems on weed flora dynamic. Experimental data results show that richness in weed species and weed abundance increase with the tillage simplification and with no till. Others factors effects like plant-covered presence or not, or cultural residues management have not proven their effect on weed dynamic. FLORSYS evaluation in Boigneville context shows simulated weed abundance overestimated in comparison to observed data. However, tillage effect has been proved with coherent tillage modalities ordering compared to experimental results. FLORSYS can be used to compare several long-term cropping systems but not for predict absolute weed abundance.

Mots-clés : labour, travail superficiel, semis-direct, adventice, expérimentation, modélisation

Key Words: ploughing, reduce tillage, no-till, weed, testing, modelling