



Ecole supérieure d'agricultures
55, rue Rabelais – B.P. 748
49007 ANGERS Cedex 01



Chambre Régionale
d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine
INRAE Les Verrines
86600 LUSIGNAN

Maitre de stage : Nicolas FERRAND

Intérêt des associations céréales/légumineuses pour produire des Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique d'hiver dans le Centre-Ouest de la France



Stage réalisé dans le cadre du projet PAMPA financé par l'AAP FranceAgriMer 2020

Mémoire de Fin d'Etudes

Promotion 2016

Alexis MOREAU
Elève-Ingénieur ESA

Date : 08/09/2021

Patron de mémoire : Nathalie CASSAGNE

CONFIDENTIALITE ET DIFFUSION**Année 2020-2021**

Mémoire de : MOREAU Alexis Organisme d'accueil : Chambre d'Agriculture
Nouvelle - Aquitaine

Confidentialité requise par l'organisme d'accueil¹

Non Oui
 Si Oui, 1 an 3 ans 5 ans > Sans (durée :)
 Motif (si > Sans) :

Accès externe autorisé Mémoire consultable à la Médiathèque

Titre du mémoire confidentiel :

oui non

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 tuteur de stage² : 26/08/2021

Droits d'auteur (stagiaire)

L'auteur³ autorise la diffusion de son travail (archive numérique)

- Référence bibliographique*
- Référence bibliographique et résumé
- Texte intégral du mémoire

L'auteur atteste que la version numérique est conforme à l'exemplaire imprimé remis au jury.

Autorisez-vous la consultation à la médiathèque ? oui non

Date et signature de l'auteur : 26/08/2021

Autorisation de diffusion par l'enseignant-référent de l'ESA

Mémoire de référence pour diffusion postérieure.

- Oui Non

Si non, seul le Résumé apparaîtra dans la base d'archivage numérique

Date et signature de l'enseignant :

Conditions de soutenance

- Soutenance à huis-clos selon les conditions d'évaluation décrites

Date et signature du tuteur :

Informations particulières

¹ L'administration, les enseignants et le service de documentation de l'E.S.A. s'engagent à respecter cette confidentialité

² Signature et cachet de l'organisme

³ Auteur = étudiant qui réalise son Mémoire de Fin d'Etudes

* La référence bibliographique [=Nom de l'auteur, titre du Mémoire, année de soutenance, diplômé, spécialité et spécialisation/options] sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Auteur : Alexis MOREAU

Promotion : 2016

Patron de mémoire : Nathalie CASSAGNE

Signalement du mémoire : « Intérêt des associations céréales/légumineuses pour produire des Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique d'hiver dans le Centre-Ouest de la France », 38 pages, 7 tableaux, 38 figures, 73 références bibliographiques, 7 annexes.

Mots-clés : CIVE d'hiver, associations céréale/féverole, réseau d'expérimentations

RÉSUMÉ D'AUTEUR	
PLAN INDICATIF	<ul style="list-style-type: none">- Introduction- Eléments de contexte et de bibliographie- Question de travail- Matériel et méthodes- Résultats- Discussion- Conclusion
BUTS DE L'ÉTUDE	<p>Les associations céréales/légumineuses sont identifiées comme un levier potentiel pour répondre aux problématiques identifiées sur les CIVE d'hiver. Néanmoins, les connaissances et les références sur ces associations en tant que CIVE manquent. Cette étude vise donc à apporter des éléments de connaissance sur ces associations, et notamment sur les associations céréale/féverole.</p>
MATÉRIELS & MÉTHODES	<p>L'étude se base sur l'analyse globale d'un réseau de 20 essais sur lesquels du seigle fourrager et du triticale ont été implantés seuls et associés à la féverole durant l'année 2020-2021. Pour identifier les différences entre céréales pures et associées à la féverole, les rendements, les taux de matière sèche, la biomasse d'adventices, les reliquats azotés et les marges semi-nettes ont été étudiés et comparés grâce à des ANOVA et à des comparaisons de rangs. L'impact de la fertilisation azotée a également été étudié.</p>
RÉSULTATS	<p>Les associations céréale/féverole et les céréales pures ont des rendements équivalents quel que soit le niveau de fertilisation. Néanmoins, en absence d'azote, les associations produisent plus que les céréales pures et, dans certains cas, elles permettent une réduction de la fertilisation azotée. La réduction du taux de MS en association n'est pas toujours significative. Peu de différences d'adventices et de reliquats azotés à la récolte ont été observées. Les résultats permettent de mettre en évidence de grandes tendances : les rendements très hétérogènes selon les essais et le faible développement de la féverole limitent leur significativité.</p>
CONCLUSIONS	<p>Les associations céréale/féverole semblent permettre de produire des CIVE d'hiver sans modifier en profondeur les itinéraires techniques actuels. Les résultats obtenus sont cohérents avec la bibliographie mais nécessitent cependant d'être complétés par une seconde année d'expérimentations. Cela permettra d'appréhender l'impact d'un développement différent de la féverole ainsi que les services écosystémiques que peuvent fournir les associations céréales/légumineuses.</p>

BIBLIOGRAPHIC NOTE

Author: Alexis MOREAU

Promotion: 2016

Dissertation tutor : Nathalie CASSAGNE

Description of the dissertation: « Interest of cereals/legumes intercrops to produce biogas catch crops in the middle-west of France », 38 pages, 7 tables, 38 illustrations, 73 references, 7 annexes.

Keywords: Biogas catch crops, cereals/faba bean intercrops, experimental network

AUTHOR'S ABSTRACT

INDICATIVE PLAN	<ul style="list-style-type: none">- Introduction- Context and bibliographic elements- Work issue- Material and methods- Results- Discussion- Conclusion
AIMS OF THE STUDY	Cereals/legumes intercrops are identified as way to reduce biogas catch crops problems. However, knowledge and references on these intercrops to produce biogas catch crops are not well developed. So, this study aims to provide information on these intercrops, particularly on cereals/faba bean intercrops.
MATERIALS & METHODS	This study is based on the analysis of an experimental network (20 field experiments) where forage rye and triticale were sown as sole crop or associated with faba bean during the year 2020-2021. To identify differences between sole crops and intercrops, biomass yield, dry matter rates, weed biomass, soil nitrogen residues and semi-net margin were studied and compared with ANOVA and rank comparisons. Other factors were also studied to explain biomass yield (nitrogen fertilization, sowing date).
RESULTS	Cereals/faba bean intercrops and cereals sole crops have similar biomass yield for a same nitrogen fertilization input. Nevertheless, without fertilization, intercrops seem to have higher yield than sole crops. Moreover, they sometimes allow reducing fertilization input. Dry matter rates reduction with intercrops is not always significant. Weed biomass and soil nitrogen residues are not different between sole crops and intercrops. Results allow us to give great trends. Yields are different between field experiments and faba bean yield is quite low, therefore the significance of these results is limited.
CONCLUSIONS	Cereals/faba bean intercrops could be used to produce biogas catch crops without important modifications of the way to manage biogas catch crops. But, even if these results are consistent with bibliography, they have to be completed with another year of field experiments. It will allow seeing if same results are achieved with a different development of faba bean and it will also permit to study other ecosystem services provided by cereals/legumes intercrops.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Nicolas Ferrand, mon maître de stage, pour la confiance qu'il m'a accordée au cours de ces 6 mois de stage qui clôturent mes études. J'ai pu travailler sur un sujet innovant qui prendra certainement une place importante dans le monde agricole des années à venir. Merci à lui pour son encadrement ainsi que pour les conseils qu'il m'a apportés tout au long de ce stage.

Je remercie également Sébastien Minette pour son accompagnement ainsi que ses remarques et idées qui ont permis le bon déroulement de cette étude et la rédaction de ce mémoire.

Merci à tous ceux qui ont réalisé le suivi des essais sur lesquels se basent cette étude et qui ont participé aux mesures : les conseillers et stagiaires des Chambres d'Agriculture et de la structure ACE Méthanisation. Je les remercie aussi pour les conseils et remarques qu'ils ont pu m'apporter durant ce stage.

Je tiens aussi à remercier les agriculteurs qui m'ont accordé une partie de leur temps pour répondre aux questions de mon enquête et partager leurs expériences.

Merci à l'ensemble du personnel présent sur le site des Verrines (INRAE, Institut de l'Elevage et GEVES) pour leur accueil et leur bonne humeur au cours des pauses et des repas. Merci à Louise, Elsa, Emma, Meghan et Romain, stagiaires sur le site des Verrines pour tous les bons moments passés ensemble.

Enfin, je remercie mon patron de mémoire, Nathalie Cassagne, pour le suivi de mon stage et pour ses conseils et remarques concernant le bon déroulement de mon stage et la rédaction de ce mémoire.

Table des matières

Remerciements	
Table des figures	
Table des tableaux	
Sigles et abréviations	
INTRODUCTION	1
ELEMENTS DE CONTEXTE	2
1. L'agriculture en Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire	2
1.1. Des régions tournées vers l'élevage et les grandes cultures.....	2
1.2. Situation économique des exploitations agricoles	2
2. La méthanisation et les CIVE	2
2.1. Une filière en développement	2
2.2. Un contexte réglementaire favorable au développement des CIVE.....	3
3. La Chambre Régionale d'Agriculture de Nouvelle-Aquitaine et le projet PAMPA	4
4. Présentation de l'étude	4
ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE	5
1. Les CIVE actuellement	5
1.1. Définition des CIVE.....	5
1.2. Critères de qualité et rendement visés.....	5
1.3. Impacts des CIVE sur la fertilité des sols	6
1.4. Limites de la production de CIVE	7
2. Intérêts des associations céréales/légumineuses	8
2.1. Meilleure utilisation des ressources du milieu	8
2.2. Productivité et teneur en protéines supérieures	9
2.3. Robustesse face aux phénomènes biotiques et abiotiques	9
2.4. Fourniture d'azote pour la culture suivante	11
3. Le choix des espèces à associer	11
3.1. Utilisation des traits fonctionnels des espèces	11
3.2. Utilisation des connaissances empiriques sur les espèces	12
4. Les impacts de l'introduction de légumineuses dans les CIVE d'hiver	12
4.1. Rendements proches des céréales pures avec une fertilisation azotée réduite...13	13
4.2. Taux de MS souvent inférieur aux céréales pures	14
4.3. Un état du sol à la récolte équivalent	15
4.4. Des intérêts économiques peu connus	15
QUESTION DE TRAVAIL.....	16
MATERIELS & METHODES	18
1. Enquête auprès d'agriculteurs	18
2. Présentation des essais.....	18
2.1. Dispositif expérimental.....	18
2.2. Choix des essais étudiés	19
3. Réalisation des mesures.....	19
3.1. Mesure des biomasses et du taux de MS à la récolte	19
3.2. Mesure du taux de couverture du sol.....	20
3.3. Mesure des reliquats azotés et de l'humidité du sol	20
3.4. Mesure de la teneur en azote de la biomasse aérienne	20
3.5. Mesure de la dynamique de séchage des andains	20
4. Analyses des données.....	21
4.1. Etude du rendement	21
4.2. Etude du taux de MS à la récolte	21
4.3. Etude de la dynamique de séchage	22
4.4. Etude des adventices.....	22

4.5. Etude de l'état du sol à la récolte	22
4.6. Etude de l'intérêt économique.....	22
RESULTATS	23
1. Rendements hétérogènes influencés par de nombreux facteurs.....	23
1.1. Rendement des CIVE	23
1.2. Hétérogénéité de présence de féverole selon les essais	23
1.3. Facteurs influençant le rendement.....	24
2. Taux de MS et préfanage	26
2.1. Différences de taux de MS entre CIVE	26
2.2. Intérêt du préfanage	27
3. Impact limité des associations sur les adventices	28
3.1. Couverture du sol au cours du cycle	28
3.2. Biomasse d'adventices à la récolte	28
4. Impact peu favorable des associations sur l'état du sol à la récolte	29
4.1. Impact sur les reliquats azotés.....	29
4.2. Impact sur l'humidité du sol à la récolte	30
5. Des associations intéressantes économiquement.....	31
DISCUSSION	32
1. Effet des associations sur le rendement.....	32
1.1. Des rendements équivalents entre céréales pures et associées	32
1.2. Mais une forte hétérogénéité de rendements et de féverole.....	33
2. Effet des associations sur le taux de MS.....	34
2.1. Réduction du taux de MS pas toujours significative	34
2.2. Raisonnement du préfanage	34
3. Effet des associations sur les adventices.....	35
4. Effet des associations sur l'état du sol à la récolte	35
5. Intérêt économique	36
6. Bilan de l'impact des associations céréale/féverole	36
PERSPECTIVES.....	37
1. Résultats à compléter par une seconde année d'expérimentations.....	37
2. Autres variétés et espèces à étudier	37
CONCLUSION	38
Bibliographie	
Annexes	

Table des figures

Figure 1 : Evolution des cotations de cinq cultures entre 1998 et 2018	2
Figure 2 : Evolution du RCAI par Utans selon les OTEX.....	2
Figure 3 : Répartition des substrats méthanisés en Nouvelle-Aquitaine en 2018 et potentiellement méthanisables en 2030	3
Figure 4 : Exemple de deux modes d'insertion des CIVE au sein d'une succession de cultures : CIVE d'été et CIVE d'hiver	5
Figure 5 : Potentiel méthanogène d'espèces utilisées en tant que CIVE	5
Figure 6 : Espèces ou mélanges majoritairement implantés par les agriculteurs pour produire des CIVE d'hiver.....	6
Figure 7 : Rendement de CIVE d'hiver en fonction de la date de semis	6
Figure 8 : Production de biomasse aérienne et souterraine de différentes CIVE d'hiver	7
Figure 9 : Evolution du stock de carbone organique de l'horizon 0-30 cm du sol dans une rotation blé/orge d'hiver/maïs grain irrigué	7
Figure 10: Schéma des interactions entre espèces pour l'acquisition des ressources et leur déclinaison en exemples concrets.....	8
Figure 11 : Rendement et taux de MS du seigle Protector seul ou associé avec de la féverole selon le niveau de fertilisation	13
Figure 12 : Evolution du taux de MS et du rendement selon les espèces et le niveau de fertilisation..	14
Figure 13 : Bilan des reliquats azotés en entrée hiver et à la récolte de CIVE d'hiver par rapport à un sol nu.....	15
Figure 14 : Schéma de la démarche globale de réalisation de la mission.....	17
Figure 15 : Carte de la répartition des essais.....	18
Figure 16 : Schéma du dispositif expérimental des essais en bandes chez les agriculteurs	19
Figure 17 : Exemple de photographie utilisée pour la détermination du taux de couverture du sol.....	20
Figure 18 : Cage de séchage disposée au sein d'un andain de seigle	20
Figure 19 : Exemple de calcul de la vitesse d'augmentation du taux de MS en fonction du temps.....	22
Figure 20 : Equations de calcul du coût de production et de la marge semi-nette.....	22
Figure 21 : Rendement et écart-types des CIVE testées sur tous les essais	23
Figure 22 : Part moyenne de féverole dans les associations pour chaque essai	23
Figure 23 : Rendement et écart-types des CIVE selon la part de féverole sur les essais.....	24
Figure 24 : Rendement des CIVE selon la quantité d'azote apportée.....	24
Figure 25 : Part de féverole dans les associations selon la quantité d'azote apportée	25
Figure 26 : Rendement des CIVE selon la date de semis toutes doses d'azote confondues.....	25
Figure 27 : Rendement moyen des CIVE selon le type de sol, tous niveaux de fertilisation.....	26
Figure 28 : Rendement moyen des CIVE sur chaque essai selon la somme de température accumulée entre le semis et le 21 avril 2021	26
Figure 29 : Taux de MS moyen des CIVE observé sur l'ensemble des essais.....	26
Figure 30 : Taux de MS des CIVE selon la durée du cycle de la CIVE	27
Figure 31 : Taux de MS du seigle et de l'association seigle/féverole en fonction de la durée de séchage à deux dates de fauche.....	27
Figure 32 : Taux de couverture du sol par les CIVE sur l'essai en micro-parcelles de Lusignan le 20/11/2020 et le 16/02/2021.....	28
Figure 33 : Biomasse d'adventices à la récolte des CIVE selon le niveau de fertilisation azotée sur les essais CA86_1, CA37_1 et Lusignan	28
Figure 34 : Reliquats azotés à la récolte des CIVE dans les horizons 0-30 cm et 30-60 cm du sol sur les essais CA86_2, CA47_1 et Lusignan	29
Figure 35 : Humidité du sol à la récolte des CIVE dans les horizons 0-30 cm et 30-60 cm sur l'essai de Lusignan	30
Figure 36 : Marge semi-nette (hors main d'œuvre) en fonction du rendement des CIVE	31
Figure 37 : Marge semi-nette (hors main d'œuvre) des CIVE selon la dose de fertilisation azotée apportée	31
Figure 38 : Schéma de synthèse des hypothèses et des résultats de l'étude	36

Table des tableaux

Tableau 1 : Mécanismes en jeu dans les associations végétales et leurs interactions avec les ravageurs et les maladies	10
Tableau 2 : Caractéristiques des espèces utilisées en tant que CIVE ou mélange	12
Tableau 3 : Caractéristiques pédoclimatiques et dates de semis et de récolte des essais	18
Tableau 4 : Mesures réalisées sur les essais du réseau et sur l'essai en micro-parcelles	19
Tableau 5 : Coût de production, marge semi-nette et rendement moyens pour les CIVE avec un rendement supérieur ou égal à 6 tMS/ha.....	31
Tableau 6 : Facteurs explicatifs des rendements faibles et élevés observés sur les essais et nombre d'essais concernés	33
Tableau 7 : Facteurs explicatifs des rendements faibles et élevés de féverole selon Terres Inovia et essais potentiellement concernés.....	33

Sigles et abréviations

AAMF : Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France

ANOVA : Analyse de la variance

AREC : Agence Régionale d'Evaluation Environnement & Climat

CIPAN : Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates

CIVE : Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique

CRA : Chambre Régionale d'Agriculture

grains/m² : grains par mètre carré

ha : hectare

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

IRD : Innovation Recherche et Développement

kg N/ha : Kilogramme d'azote par hectare

kg N/tMS : Kilogramme d'azote par tonne de matière sèche

LER : Land Equivalent Ratio

MS : Matière sèche

MSN : Marge semi-nette

NA : Nouvelle-Aquitaine

Nm³/tMS : Normo mètre cube par tonne de matière sèche

PAMPA : Promouvoir Agroécologie & Méthanisation Par les Associations culturelles

Ratio C/N : Ratio carbone/azote

RCAI : Revenu Courant Avant Impôts

SAU : Surface Agricole Utile

SdC : Système de culture

tMS : Tonne de matière sèche

tMS/ha : Tonne de matière sèche par hectare

Utans : Unité de travail agricole non salarié

VAM : Vienne Agri Métha

INTRODUCTION

Face à des situations économiques parfois fragiles, les agriculteurs, éleveurs ou céréaliers, cherchent à optimiser leur système de production afin d'améliorer leurs revenus. L'une des solutions qui s'offre à eux est la valorisation des périodes d'interculture en produisant des Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE). Celles-ci sont valorisées au sein de la filière méthanisation, en plein développement ces dernières années grâce à son rôle dans la transition énergétique engagée par l'Etat depuis 2015¹.

Deux types de CIVE se distinguent : les CIVE d'hiver et les CIVE d'été. Cette étude est consacrée aux CIVE d'hiver. Elles présentent l'avantage d'être moins sensibles à l'alimentation hydrique et d'avoir des rendements plus stables que les CIVE d'été. De plus, aux intérêts économiques s'ajoutent des atouts agronomiques et environnementaux indéniables : réduction des pertes d'azote, lutte contre l'érosion, gestion des adventices, ... Fortes d'un potentiel de production de biomasse élevé et d'une compétitivité vis-à-vis des adventices importante, les céréales sont majoritairement utilisées pour produire des CIVE d'hiver. Cependant, ces cultures monospécifiques possèdent des besoins importants en énergie (fertilisation azotée) et pourraient également, à moyen terme, faire face à des problèmes de gestion des bioagresseurs, à une irrégularité des rendements ou bien pénaliser le rendement de la culture suivante.

Dans ce contexte, l'utilisation des associations céréales/légumineuses est identifiée par la Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine, comme un levier potentiel pour réduire ces problématiques grâce à leurs nombreux atouts agronomiques. Divers essais ont mis en évidence la cohérence de ces associations pour produire des CIVE d'hiver. Néanmoins, les connaissances pour mettre en place ces associations manquent. Les agriculteurs et conseillers sont en attente de références sur les espèces et les variétés les plus adaptées, sur les itinéraires techniques et sur les impacts de ces associations par rapport aux céréales pures. La Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine cherche donc à évaluer les impacts agronomiques, environnementaux et économiques des associations céréales/légumineuses pour produire des CIVE d'hiver dans le Centre-Ouest de la France. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet PAMPA (Promouvoir Agroécologie et Méthanisation par les Associations culturales) dans les régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire. Elle s'appuie sur un réseau d'essais chez des agriculteurs.

Dans un premier temps, le contexte et les objectifs de l'étude seront présentés. Puis, une synthèse bibliographique sur les CIVE d'hiver et les intérêts des associations céréales/légumineuses sera réalisée. Elle sera complétée par des informations recueillies au cours d'entretiens auprès d'agriculteurs. Cela permettra d'éclaircir l'objet d'étude et d'aboutir à une question et des hypothèses de travail qui seront vérifiées à partir du matériel et des méthodes présentées. Enfin, les résultats obtenus seront présentés et discutés avant de conclure sur les principaux enseignements de ce travail et sur les connaissances encore à acquérir.

¹ LOI n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, JORF n°0189 du 18 août 2015.

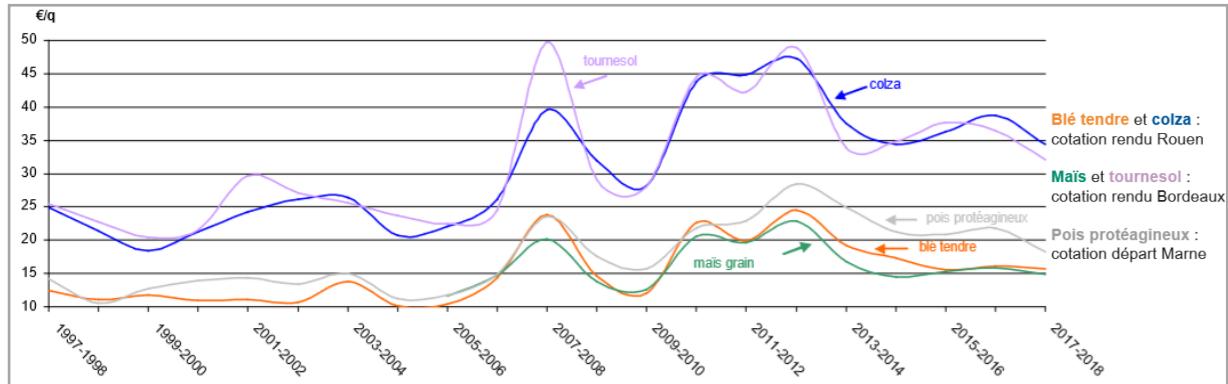


Figure 1 : Evolution des cotations de cinq cultures en €/quintal entre 1998 et 2018
 (AGRESTE Nouvelle-Aquitaine, 2019)

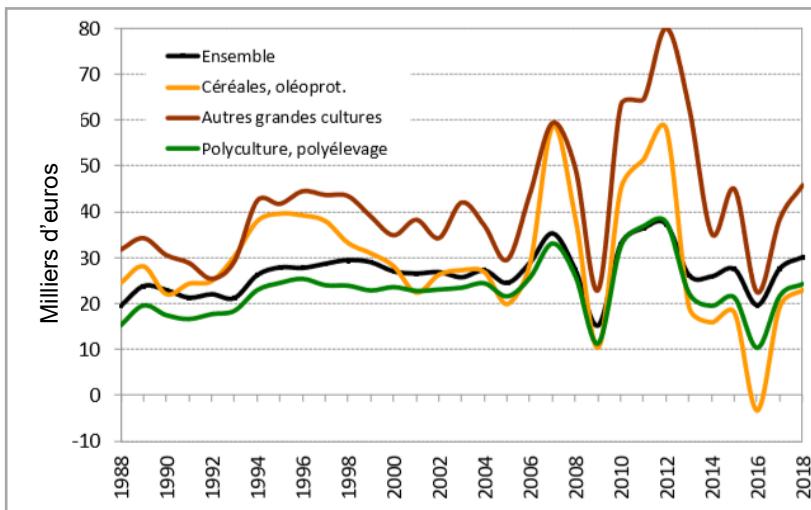


Figure 2 : Evolution du Revenu Courant Avant Impôts (RCAI) par unité de travail agricole non salariée (Utans) en milliers d'euros selon les orientations technico-économiques des exploitations
 (AGRESTE, 2020b)

ELEMENTS DE CONTEXTE

1. L'agriculture en Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire

1.1. Des régions tournées vers l'élevage et les grandes cultures

Les régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire comptent parmi les régions importantes de l'agriculture française. En effet, avec 15 % de la Surface Agricole Utile (SAU) française, la Nouvelle-Aquitaine représente la première région agricole de France et de l'Union Européenne tandis que le Centre-Val de Loire fait partie des premières régions céréalieras françaises.

L'agriculture y occupe une place importante du territoire : 46 % en Nouvelle-Aquitaine et 60 % en Centre-Val de Loire (AGRESTE, 2019 ; AGRESTE, 2020a). Ces deux territoires possèdent chacun une agriculture très diversifiée résultant de leur hétérogénéité pédoclimatique et culturelle. Néanmoins, les grandes cultures et l'élevage restent majoritaires dans ces régions. En effet, en Nouvelle-Aquitaine, l'élevage est bien représenté puisque 36 % des exploitations sont spécialisées en élevage et 12% en polyculture-élevage tandis que 29 % des exploitations sont spécialisées en grandes cultures (AGRESTE, 2019). Au contraire, en Centre-Val de Loire, une majorité d'exploitation est spécialisée en grandes cultures (43 %) alors que seulement 20 % comportent un atelier d'élevage (AGRESTE, 2020a).

1.2. Situation économique des exploitations agricoles

Ces exploitations agricoles présentent des situations économiques parfois fragiles, notamment à cause des fluctuations des prix des produits agricoles (figure 1). En effet, notamment depuis 2006, le prix des produits issus des grandes cultures dépend de moins en moins du marché français et évolue selon les cours mondiaux. Les aléas climatiques, les relations internationales et la spéculation financière sont autant d'éléments susceptibles de faire varier ces prix (AGRESTE Nouvelle-Aquitaine, 2019). De plus, les charges des exploitations ont tendance à s'accroître étant donné l'augmentation du coût des intrants (engrais et produits phytosanitaires), du carburant et des aliments du bétail (AGRESTE, 2020b).

Ces éléments conduisent à une variabilité des revenus des agriculteurs selon les années. Ainsi, le Revenu Courant Avant Impôts (RCAI) par unité de travail agricole non salarié (Utans) fluctue fortement depuis 2006 et présente une baisse fortement prononcée pour les exploitations en grandes cultures entre 2012 et 2016 (figure 2) (AGRESTE, 2020b).

Face à la fluctuation des revenus agricoles, les éleveurs et céréaliers cherchent à optimiser leur système de production afin de bénéficier de nouvelles sources de revenus et de limiter les charges. L'une des solutions à leur disposition est de valoriser les cultures intermédiaires afin de produire trois cultures en deux ans. Elles peuvent notamment être valorisées par la méthanisation.

2. La méthanisation et les CIVE

2.1. Une filière en développement

La méthanisation est une technique qui permet, grâce à des processus biologiques, de transformer des effluents d'élevage ou des produits végétaux en biogaz (méthane). Le biogaz produit peut ensuite être utilisé pour produire de la chaleur, de l'électricité ou bien être injecté sur le réseau de gaz naturel (ADEME, 2019a).

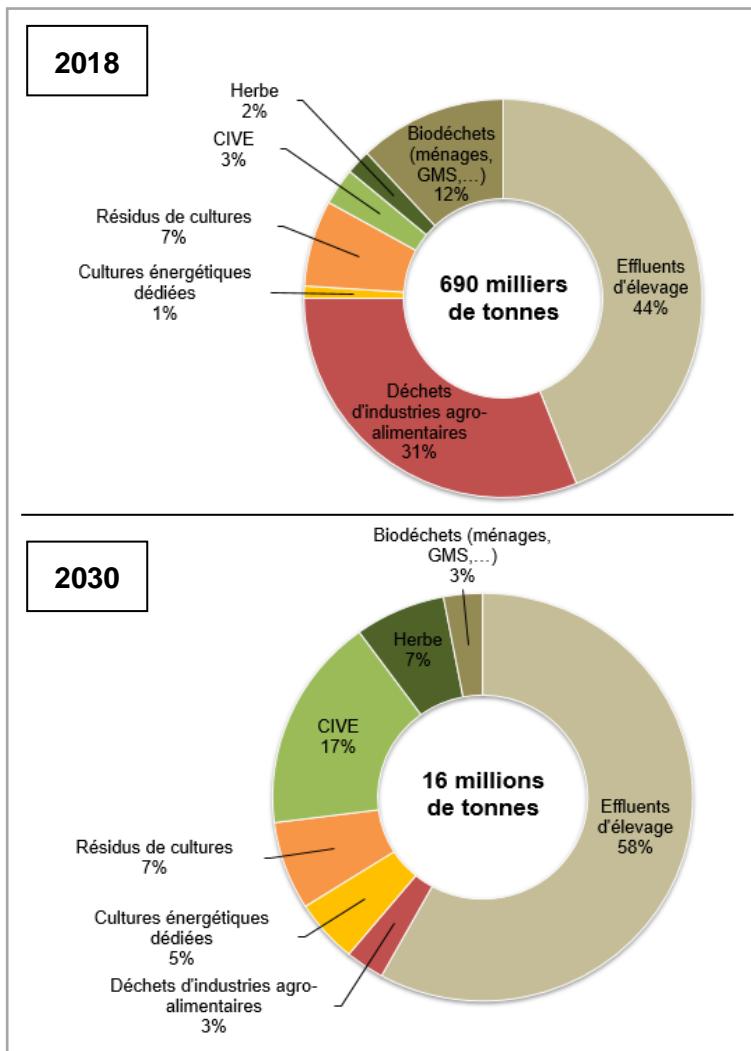


Figure 3 : Répartition des substrats méthanisés en Nouvelle-Aquitaine en 2018 (en haut) et potentiellement méthanisables en 2030 (en bas) (AREC, 2019 ; 2020)

Actuellement, le développement de la filière méthanisation en France est important. Début 2019, plus de 700 unités de méthanisation étaient dénombrées sur le territoire français (ADEME, 2019a), et l'objectif est d'atteindre 1000 unités de méthanisation d'ici 2023 (ADEME, 2019b). Sur les territoires de Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire, le développement de cette filière est similaire avec respectivement 68 et 60 unités de méthanisation en fonctionnement en 2019.

Alors que les politiques publiques ont, historiquement, majoritairement incité le développement d'une méthanisation valorisant les coproduits agricoles et notamment les effluents d'élevage, de plus en plus de céréaliers sont aujourd'hui impliqués au sein de cette filière (Berthe et al., 2020). En effet, d'une part, ils sont estimés plus solvables pour porter des projets plus lourds financièrement, et d'autre part, les produits végétaux comme les céréales possèdent un potentiel méthanolé plus important que les effluents d'élevage. Cette évolution traduit une place de plus en plus importante des produits végétaux au sein de la filière méthanisation. Ces derniers peuvent être issus de cultures spécifiquement dédiées à la méthanisation ou de cultures intermédiaires nommées CIVE d'hiver ou d'été.

2.2. Un contexte réglementaire favorable au développement des CIVE

En France, la valorisation des végétaux par l'intermédiaire de la méthanisation est encadrée par la loi. Ainsi, le décret du 7 juillet 2016¹ limite l'approvisionnement des installations de méthanisation en cultures principales² à hauteur de 15 % du tonnage total des sources d'approvisionnement. Cette réglementation ne s'applique pas aux cultures intermédiaires, qui permettent donc d'alimenter les installations de méthanisation en complément des cultures principales. De plus, les cultures intermédiaires possèdent l'avantage de ne pas entrer en concurrence directe avec les cultures destinées à la production alimentaire contrairement aux cultures principales dédiées à la méthanisation.

Ainsi, les CIVE sont utilisées par la plupart des unités de méthanisation. Entre 2012 et 2019, près de 80 % d'entre elles ont mobilisé des CIVE bien qu'elles représentent souvent moins de 10 % des sources d'approvisionnement (Marsac et al., 2019). Les scénarios d'évolution de la filière méthanisation prévoient une augmentation de l'utilisation des CIVE, comme en témoignent les projections de l'AREC pour 2030 en Nouvelle-Aquitaine (figure 3). Ainsi, l'AREC estime qu'en 2018, seulement 2 % du gisement potentiel de CIVE à l'horizon 2030 était utilisé en méthanisation en Nouvelle-Aquitaine (AREC, 2020). Le potentiel de développement est donc important. Pour assurer ce développement tout en veillant à leurs bénéfices agronomiques, environnementaux ou économiques, le développement des connaissances sur la mise en place des CIVE est donc nécessaire.

Actuellement, la tendance est d'implanter les CIVE en cultures pures (Bes de Berc, 2020), cependant cela peut, à moyen terme, induire des problèmes de gestion des bioagresseurs, causer une irrégularité des rendements face aux aléas climatiques ou pénaliser la culture suivante. Afin de répondre à ces problématiques sur les CIVE d'hiver, principalement cultivées en céréales pures (Bes de Berc, 2020), les associations de cultures céréales/légumineuses sont identifiées comme un levier potentiel. Cependant, les connaissances sur ces associations en tant que CIVE sont peu nombreuses et les agriculteurs et les conseillers sont en attente de références sur celles-ci.

¹ Décret n°2016-929 du 7 juillet 2016 pris pour l'application de l'article L.541-39 du code de l'environnement, JORF n°0158 du 8 juillet 2016

² Est considéré comme « culture principale », la culture d'une parcelle qui est : soit présente le plus longtemps sur un cycle annuel ; soit identifiable entre le 15 juin et le 15 septembre sur la parcelle, en place ou par ses restes ; soit commercialisée sous contrat (Décret n°2016-929 du 7 juillet 2016).

3. La Chambre Régionale d'Agriculture de Nouvelle-Aquitaine et le projet PAMPA

Dans ce contexte, la Chambre Régionale d'Agriculture (CRA) de Nouvelle-Aquitaine (NA) mène un projet nommé PAMPA (Promouvoir Agroécologie & Méthanisation Par les Associations culturelles) visant à évaluer les intérêts des CIVE d'hiver en association céréales/légumineuses dans le contexte climatique du Centre-Ouest de la France.

La CRA NA est un établissement consulaire au service des agriculteurs piloté par la profession agricole. Comme toutes les Chambres d'Agriculture, elle est investie de trois principales missions selon le Code rural : (i) accompagner les démarches entrepreneuriales des agriculteurs dans les territoires, (ii) assurer une fonction de représentation de la profession agricole auprès des différentes instances et (iii) contribuer à l'amélioration de la performance économique, sociale et environnementale des exploitations agricoles (Chambre d'Agriculture France, n.d.).

Au sein de la CRA NA, le service Innovation Recherche et Développement (IRD) est en charge de la gestion du programme régional de développement agricole et rural, de la production de connaissances par l'intermédiaire de projets de recherche et développement et de la diffusion de ces connaissances auprès des acteurs du monde agricole, sous forme d'outils d'aide à la décision ou de journées techniques par exemple. Ces connaissances portent notamment sur les itinéraires techniques innovants et les cultures intermédiaires.

Le projet PAMPA est l'un des projets menés par le service IRD en partenariat avec de nombreuses structures telles que 12 Chambres d'Agriculture départementales des régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire, la société de conseil ACE Méthanisation ou encore l'association Vienne Agri Métha (VAM). Ce projet comporte deux années d'expérimentations (2021 et 2022) et est financé par FranceAgriMer dans le cadre de l'appel à projet Expérimentation 2020. Ses objectifs sont multiples : (i) définir les associations de CIVE les plus pertinentes afin d'allier production et économie d'intrants, (ii) évaluer les bénéfices économiques et environnementaux de la valorisation énergétique de ces associations, (iii) identifier leur impact sur la culture suivante (gestion des bioagresseurs, conduite de la fertilisation, ...) et (iv) communiquer ces résultats auprès d'agriculteurs des filières « méthanisation » et « élevage ». Pour cela, ce projet s'appuie sur un réseau d'essais chez des agriculteurs de Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire. L'originalité de ce projet est l'implication forte des agriculteurs puisqu'ils participent aux choix et à la mise en place des expérimentations.

4. Présentation de l'étude

L'étude présentée dans le cadre de ce mémoire s'inscrit au sein du projet PAMPA et vise à acquérir des connaissances agronomiques sur les associations de CIVE d'hiver. Le but est d'objectiver l'intérêt ou non d'implanter des CIVE d'hiver en association céréales/légumineuses plutôt que des céréales pures. Les questions auxquelles cette étude doit apporter des réponses sont les suivantes :

- Quels sont les intérêts agronomiques, environnementaux et économiques des associations céréales/légumineuses (adventices, bilan azoté, bilan hydrique, coût de production, ...) ?
- Quelles espèces sont les plus adaptées pour cette pratique ?
- Quels itinéraires techniques faut-il mettre en place pour réussir cette culture (fertilisation, méthode de récolte, ...) ?

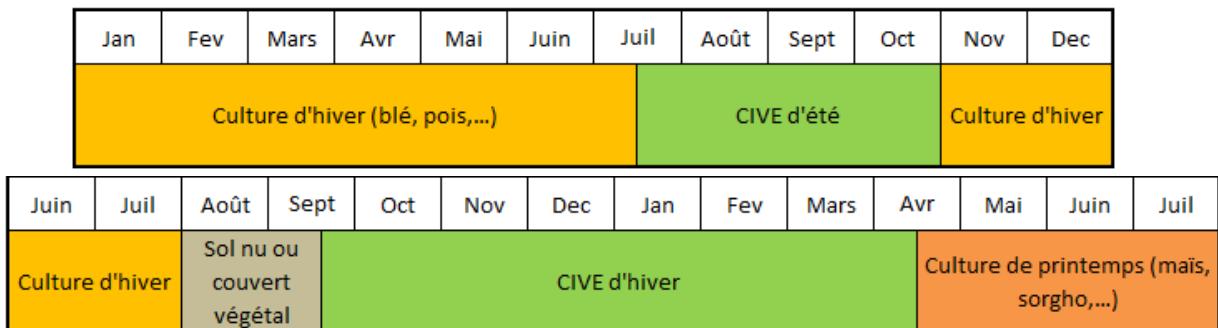


Figure 4 : Exemple de deux modes d'insertion des CIVE au sein d'une succession de cultures : CIVE d'été et CIVE d'hiver

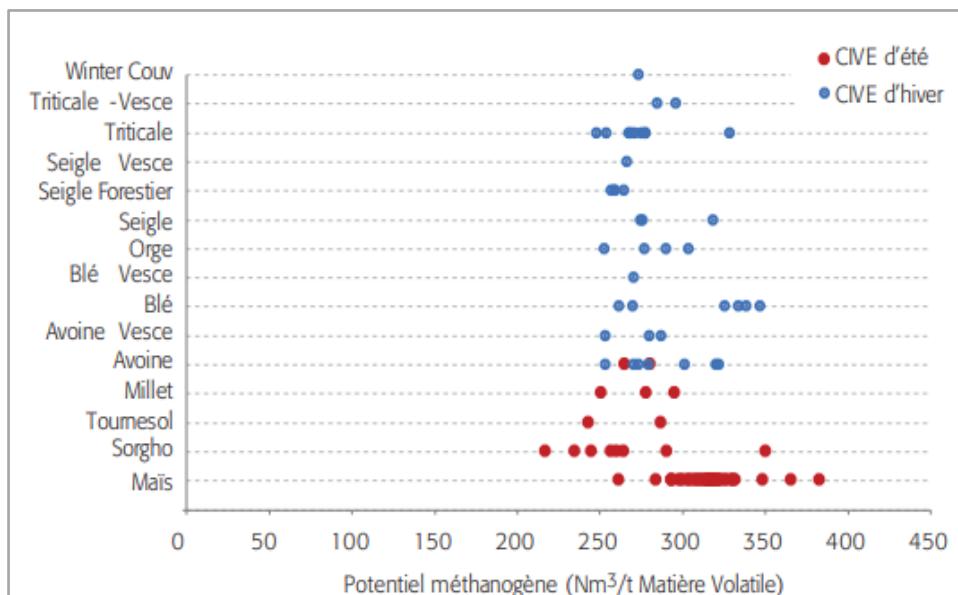


Figure 5 : Potentiel méthanogène en Nm^3/t d'espèces utilisées en tant que CIVE (projet Opticive, ARVALIS) (ARVALIS-Institut du Végétal, 2021)

ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE

1. Les CIVE actuellement

1.1. Définition des CIVE

Les CIVE sont implantées durant la période d'interculture, c'est-à-dire la période entre deux cultures principales. En fonction de l'enchaînement des cultures sur une parcelle, différentes possibilités existent. Cela conduit à distinguer deux types de CIVE : les CIVE d'été et les CIVE d'hiver (figure 4). Les CIVE d'été sont semées en été après une culture d'hiver (blé, orge, pois, ...) et récoltées à l'automne tandis que les CIVE d'hiver sont implantées en fin d'été ou début d'automne et sont récoltées au printemps avant une culture de printemps (maïs, sorgho, ...). Par la suite, seules les CIVE d'hiver seront traitées dans cette étude.

Grâce à une faible sensibilité à l'alimentation hydrique, les CIVE d'hiver possèdent un potentiel de production de biomasse stable contrairement aux CIVE d'été (Marsac et Heredia, 2020). Comme toutes les cultures intermédiaires, elles permettent de fournir de multiples services écosystémiques (réduction des pertes de nitrates, lutte contre l'érosion, amélioration de la structure du sol, ...) (Justes et Richard, 2017 ; Marsac et al., 2019). De plus, elles peuvent également être valorisées en tant que fourrages dans les exploitations avec un atelier d'élevage, ce qui permet de sécuriser le système fourrager. Enfin, elles offrent la possibilité d'ajouter un intérêt économique à une contrainte réglementaire. En effet, la réglementation impose d'implanter une Culture Intermédiaire Piège A Nitrates (CIPAN) durant l'automne, la CIVE d'hiver peut jouer ce rôle.

1.2. Critères de qualité et rendement visés

L'objectif final des CIVE est de produire du méthane. La production de méthane par une surface donnée de CIVE dépend de deux facteurs : le potentiel méthanogène de l'espèce cultivée et le rendement en biomasse de la CIVE. Le potentiel méthanogène correspond à la quantité de méthane produite par une quantité de biomasse donnée. Il est souvent exprimé en norme mètre cube par tonne de matière sèche (Nm^3/tMS). Des études ont montré que le potentiel méthanogène est maximal au stade épiaison des céréales (Agro-Transfert-RT, 2020) et qu'il varie très peu en fonction des espèces (figure 5) (Marsac et al., 2019). Ainsi, la production de méthane dépend principalement de la production de biomasse de la CIVE exprimée en tonnes de matière sèche par hectare (tMS/ha). Un objectif de production minimal de l'ordre de 4 à 5 tMS/ha est nécessaire pour rentabiliser les coûts de production de la culture (Chambre d'Agriculture des Landes, 2017 ; ADEME, 2019b).

Les CIVE d'hiver sont récoltées et conservées sous forme d'ensilage. Cette méthode permet de conserver le potentiel méthanogène de la CIVE, cependant les conditions de réalisation doivent être maîtrisées (Teixeira Franco, 2017). L'une des propriétés ayant une influence importante sur la réussite de l'ensilage est le taux de matière sèche (MS) (Teixeira Franco, 2017 ; Peyrelasse et al., 2017). Afin que la conservation soit optimale, le taux de MS à la récolte doit être compris entre 30 et 35 % (Demarquilly, 1973 ; Peyrelasse et al., 2017), cependant ce taux est souvent difficilement atteint pour les CIVE d'hiver (Marsac et Heredia, 2020). En cas de taux de MS inférieur à 27 %, un dispositif de récupération des jus est nécessaire pour conserver l'ensilage. Le taux de MS souhaitable pour la récolte des CIVE est donc compris entre 28 et 35 % de MS.

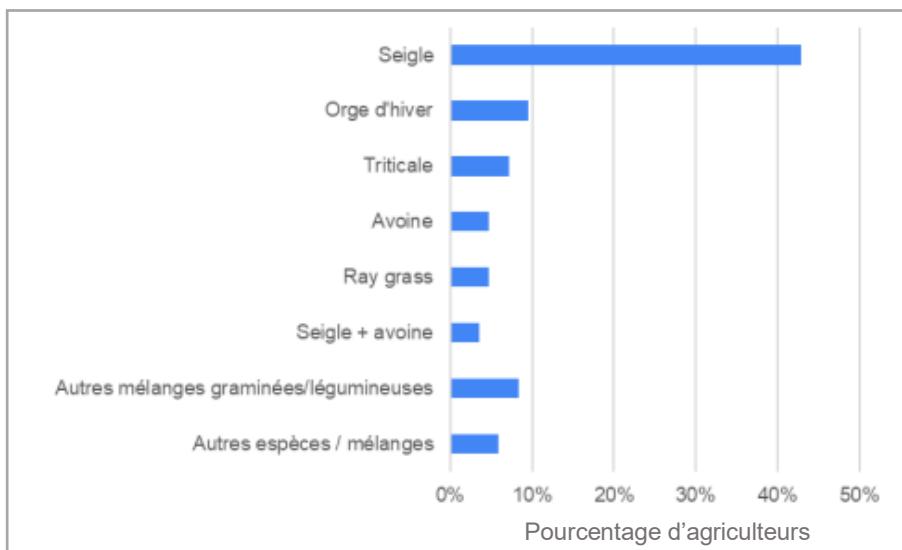


Figure 6 : Espèces ou mélanges majoritairement implantés par les agriculteurs pour produire des CIVE d'hiver (*Enquête réalisée en 2019 auprès de 100 agriculteurs de l'AAMF*) (Bes de Berc, 2020)

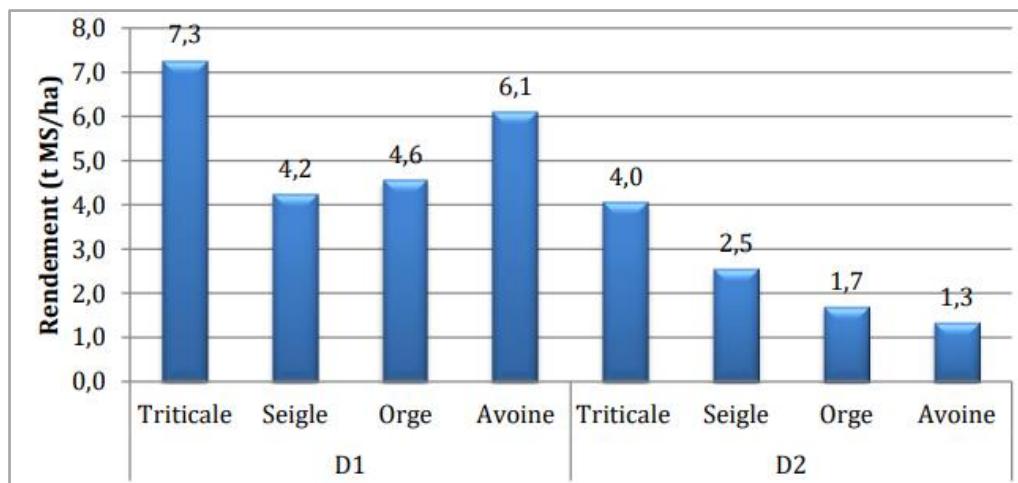


Figure 7 : Rendement en tMS/ha de CIVE d'hiver en fonction de la date de semis (D1 : semis le 20/09/2015 ; D2 : semis le 10/10/2015 ; récolte le 12/04/2016) (*projet Opticive, ARVALIS, 2016*) (Marsac et al., 2019)

Production de biomasse et taux de MS sont donc à prendre en compte pour la réussite des CIVE d'hiver. De nombreux éléments de l'itinéraire technique permettent de jouer sur ces paramètres : choix de l'espèce, date de semis, fertilisation, date et méthode de récolte.

Choix de l'espèce/variété : Les critères de choix des espèces ou variétés sont multiples : caractère non-gélif, précocité élevée, forte production de biomasse, faible sensibilité aux bioagresseurs ou encore faible sensibilité à la verse. Aujourd'hui, les graminées sont majoritairement cultivées pour produire des CIVE d'hiver, comme en témoignent les résultats d'une enquête réalisée auprès de 100 agriculteurs de l'Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France (AAMF) en 2019 (figure 6). Plus de 40 % des agriculteurs déclarent utiliser en majorité du seigle pur tandis que moins de 10 % déclarent planter majoritairement des mélanges graminées/légumineuses (Bes de Berc, 2020).

Date de semis : La date de semis possède un impact sur la production de biomasse ainsi que sur la période de récolte. Un semis précoce permet de produire plus de biomasse qu'un semis tardif, à même date de récolte. Les essais menés par Marsac et al. (2019) dans le Béarn ont mis en évidence une production de biomasse supplémentaire de l'ordre de 2 à 5 tMS/ha pour un semis précoce (20/09) par rapport à un semis plus tardif (10/10) (figure 7). Selon eux, la période de semis optimale dans le Sud-Ouest est du 20/09 au 10/10.

Fertilisation : L'utilisation de la fertilisation azotée est très souvent nécessaire afin d'améliorer la production de biomasse et d'assurer la rentabilité de la CIVE. Marsac et al. (2019) ont ainsi montré que l'apport de 80 kg N/ha permettait, selon les espèces cultivées, d'améliorer le rendement à hauteur de 2 à 4 tMS/ha. Quelles que soient les espèces cultivées, un apport de 70 kg N/ha au moment de la montaison de la céréale est l'optimum conseillé suite aux résultats du projet Opticive (Marsac et al., 2020).

Stade de récolte : Le stade de récolte est important car il influence à la fois le rendement en biomasse et le taux de MS. Le stade de récolte optimal pour les CIVE d'hiver semble être autour du stade épiaison-début floraison de la céréale (Chambre d'Agriculture des Landes, 2017 ; Marsac et Chavassieux, 2019). Il permet de concilier plusieurs objectifs : un rendement assurant la rentabilité de la culture, un potentiel méthanogène optimal et une récolte peu tardive qui limite l'impact négatif sur la culture suivante. Néanmoins, le taux de MS des plantes est parfois trop faible pour la conservation en ensilage. Un préfanage peut donc être réalisé pour l'augmenter.

Le choix des espèces et des variétés ainsi que la date de semis impactent également la date de récolte. En effet, une espèce ou variété précoce atteindra plus rapidement le stade de récolte souhaité au printemps, il en va de même pour un semis précoce.

1.3. Impacts des CIVE sur la fertilité des sols

Les cultures intermédiaires participent à l'amélioration de la fertilité des sols lorsqu'elles sont restituées au sol (Justes et Richard, 2017). L'exportation des CIVE pose donc question quant au maintien de la fertilité des sols sur le long terme. Les travaux réalisés dans le cadre des projets Opticive et Méthalae ont apporté des réponses à cette problématique.

Tout d'abord, les résultats d'Opticive montrent que la biomasse restituée au sol par une CIVE est de l'ordre de 3 tMS/ha : les chaumes (0-10cm) représentent 1 tMS/ha tandis que les racines représentent 2 tMS/ha (figure 8). Dans le contexte pédoclimatique de leurs essais, cette biomasse est supérieure à la biomasse produite par une CIPAN, qui est de l'ordre de 2 tMS/ha. La biomasse restituée au sol par les CIVE est donc similaire voire supérieure à celle restituée par une CIPAN (Marsac et al., 2019).

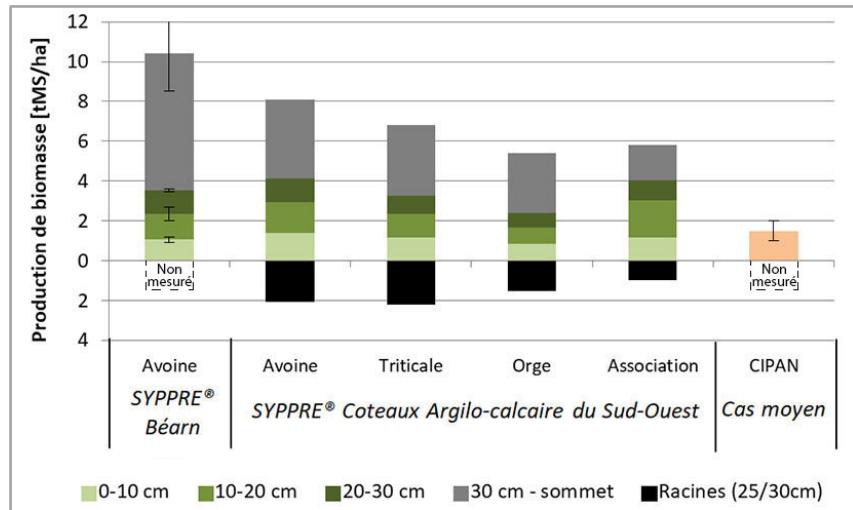


Figure 8 : Production de biomasse aérienne et souterraine de différentes CIVE d'hiver en tMS/ha (projet Opticive, ARVALIS, 2017) (Marsac et Heredia, 2020)

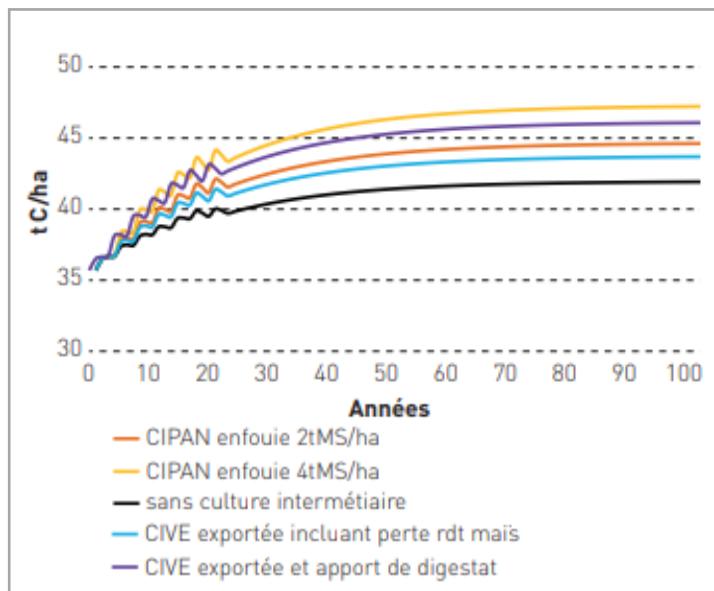


Figure 9 : Evolution du stock de carbone organique de l'horizon 0-30 cm du sol dans une rotation blé/orge d'hiver/maïs grain irrigué, avec une CIVE d'hiver, une CIPAN ou un sol nu avant le maïs en tonne de carbone par ha (sols de terreforts moyens) (projet Opticive, ARVALIS) (Lagrange et al, 2020)

Ensuite, ces projets ont simulé l'évolution du stock de carbone organique du sol grâce au modèle AMG. Ils ont mis en évidence que la présence d'une CIVE est favorable au stockage de carbone dans le sol par rapport à une situation sans culture intermédiaire (figure 9) (Marsac et al., 2019). De plus, le remplacement d'une CIPAN par une CIVE fertilisée avec un engrais organique (digestat) fait évoluer positivement le stock de carbone des 30 premiers centimètres du sol (Marsac et al., 2019 ; Laboubée et al, 2020). Cela est particulièrement vrai lorsque la production de biomasse de la CIPAN est limitée à 2 tMS/ha (figure 9).

Les CIVE possèdent donc un impact positif sur la fertilité des sols proche de celui des cultures intermédiaires de type CIPAN. Cet effet est d'autant plus renforcé si les CIVE sont fertilisées avec des effluents organiques qui peuvent être issus de la méthanisation (digestats).

1.4. Limites de la production de CIVE

Aujourd'hui, en cumulant les bénéfices environnementaux d'une culture intermédiaire et les intérêts économiques d'une culture de rente, les CIVE d'hiver sont un atout pour les agriculteurs et pour le développement de la filière méthanisation. Néanmoins, leur mode de production actuel, reposant sur l'utilisation majoritaire de céréales pures, pourrait être confronté à différents problèmes.

Premièrement, les céréales à paille sont très présentes dans l'assoulement français et au sein des rotations culturales (Schneider et al., 2010) puisqu'elles représentent un peu plus de 27 % de la SAU française (AGRESTE, 2021). La forte présence de ces espèces liée à la simplification des systèmes de cultures (SdC) favorise le risque d'infestation par les bioagresseurs (pucerons, graminées annuelles, JNO, ...) qui retrouvent fréquemment les conditions favorables à leur cycle de vie. Les CIVE d'hiver en céréales pures sont donc susceptibles d'être affectées par ces mêmes bioagresseurs mais également de favoriser leur conservation au sein du SdC.

Ensuite, les rendements des CIVE d'hiver en céréales pures présentent une variabilité interannuelle parfois importante (Marsac et al., 2019) qui peut à la fois être due aux conditions climatiques ou aux bioagresseurs.

Enfin, les céréales sont des espèces avec des forts besoins en azote, l'utilisation d'engrais azotés minéral est donc fréquente pour obtenir un rendement maximal. Cependant, les conséquences environnementales des engrains azotés sont plurielles (pollution des eaux, contribution au changement climatique, ...) (Basosi et al., 2014) et la dépendance à ses intrants pourrait impacter économiquement les exploitations agricoles en cas d'augmentation des prix (Lecuyer et al., 2013). De plus, ces forts besoins en azote contribuent à réduire la disponibilité du sol en azote pour la culture suivante dont le rendement peut être impacté.

Alors que l'agriculture doit limiter son impact sur l'environnement, diminuer sa contribution au changement climatique et répondre aux attentes sociétales d'une agriculture plus durable, les CIVE d'hiver en céréales pures ne semblent répondre que partiellement à ces attentes.

Afin de répondre à ces problématiques, des pratiques agroécologiques comme les associations de cultures entre céréales et légumineuses pourraient être mobilisées.

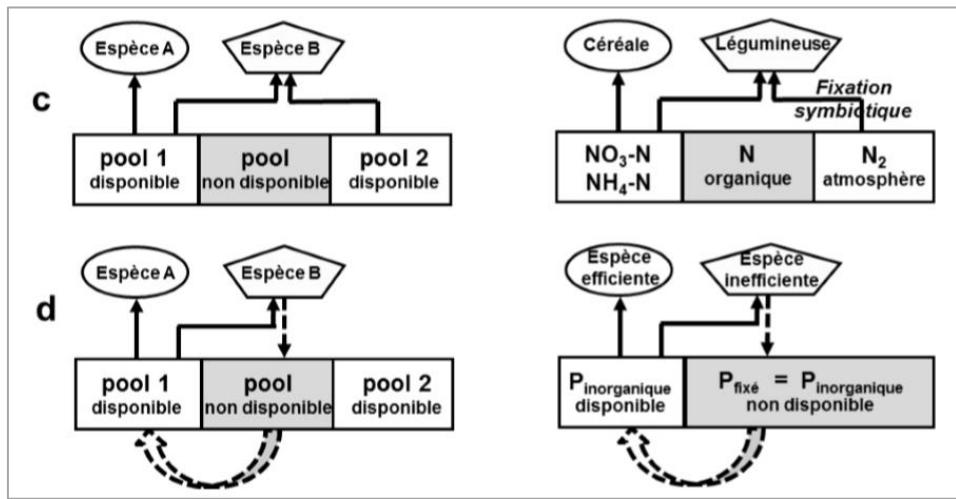


Figure 10 : Schéma des interactions entre espèces pour l'acquisition des ressources et leur déclinaison en exemples concrets (c : compétition et complémentarité de niche pour l'azote ; d : compétition et facilitation pour le phosphore) (Justes et al., 2014)

2. Intérêts des associations céréales/légumineuses

Une association de cultures est une pratique agroécologique (Wezel et al., 2014) qui consiste à cultiver simultanément deux espèces ou plus sur une même surface et pendant une durée significative de leur cycle (Willey, 1979).

Les associations entre graminées et légumineuses font partie des associations les plus répandues (Justes et al., 2014). Elles présentent de multiples effets bénéfiques, notamment dans les situations avec de bas niveaux d'intrants (Pelzer et al., 2012 ; Bedoussac et al., 2015). Cette partie se concentrera sur les mélanges céréales/légumineuses annuels valorisés à la fois en grain ou en fourrages (Protin et al., 2009 ; Corre-Hellou et al., 2013), car leur cycle est proche de celui des CIVE d'hiver.

2.1. Meilleure utilisation des ressources du milieu

2.1.1. Complémentarité d'utilisation de l'azote

Les associations céréales/légumineuses permettent de bénéficier d'une meilleure valorisation des ressources du sol, notamment pour l'azote. En effet, bien que les céréales et les légumineuses soient en compétition pour l'azote minéral du sol, les légumineuses possèdent également la capacité de fixer l'azote atmosphérique grâce à la fixation symbiotique qu'elles mobilisent de façon plus importante en association (Bedoussac et al., 2015). Ces deux familles d'espèces exploitent des ressources en azote différentes ce qui permet de diminuer la compétition entre elles par la mise en place d'une complémentarité de niche pour la ressource azotée et ainsi d'accéder à une plus grande source d'azote pour les plantes (figure 10, schéma c) (Justes et al., 2014 ; Rodriguez et al., 2020). L'augmentation de la quantité d'azote acquise par l'association par rapport à une culture pure peut aller jusqu'à 50 % dans des conditions de faible disponibilité en azote du sol (Justes et al., 2014).

La meilleure utilisation des ressources en azote identifiée dans le cas des associations céréales/légumineuses permet de réduire l'utilisation des engrains azotés par rapport à une céréale pure (Corre-Hellou et al., 2013 ; Pelzer et al., 2014a). Pelzer et al. (2012) ont mis en évidence que l'association blé-pois est plus efficiente que le blé pur en termes de quantité d'engrais azotés utilisée pour produire une tonne de blé. D'après leurs résultats, il faut 1,8 fois moins d'engrais azotés par tonne de blé produite en association par rapport à du blé pur.

2.1.2. Facilitation pour le phosphore

Des essais menés en Asie par Li et al. (2007) ont mis en évidence que les associations céréales/légumineuses ont un impact sur l'absorption du phosphore par la culture. Ainsi, en situation de faible disponibilité en phosphore, l'association maïs/féverole a permis d'augmenter le rendement du maïs de 43 % par rapport au maïs seul et de 26 % le rendement de la féverole. Grâce à des essais en pots, Li et al. (2007) ont montré que des processus ayant lieu au niveau racinaire influençaient la disponibilité du phosphore. Ainsi, la libération de protons et d'exsudats racinaires par la légumineuse améliore la biodisponibilité du phosphore pour les espèces associées (Li et al., 2007 ; Hinsinger et al., 2011 ; Justes et al., 2014). Ce phénomène est appelé facilitation (figure 10, schéma d): une espèce (ici la céréale) peut utiliser des nutriments initialement non disponibles grâce aux processus rhizosphériques¹ engendrés par l'autre espèce (ici, la légumineuse) (Justes et al., 2014).

¹ Processus ayant lieu dans la partie du sol dans laquelle se développent les racines des plantes.

2.2. Productivité et teneur en protéines supérieures

Afin de comparer la production de grain entre cultures pures ou associées, le Land Equivalent Ratio (LER) est couramment utilisé (Pelzer et al., 2014b ; Bedoussac et al., 2015). Il correspond à la surface relative nécessaire en cultures pures pour avoir la même production qu'en association. Le LER observé pour les associations céréales/légumineuses est très souvent supérieur à 1 (Corre-Hellou et al., 2013 ; Pelzer et al., 2014b ; Bedoussac et al., 2015), ce qui signifie qu'il faudrait une surface plus importante pour obtenir, en cultures pures, la même production qu'en cultures associées. La productivité est donc supérieure en association.

La productivité des associations est également intéressante pour les récoltes en fourrage. Des essais menés dans plusieurs départements français ont montré que les associations céréales/légumineuses pouvaient atteindre des rendements entre 7,3 et 9,1 tMS/ha selon les espèces associées sans fertilisation azotée ni traitements phytosanitaires (Protin et al., 2009). De même, des essais réalisés en Bretagne ont mis en évidence le potentiel de rendement de l'association triticale/avoine/pois/vesce avec un rendement de 8,2 tMS/ha, soit de 2 tMS/ha inférieur au rendement du maïs ensilage, avec un recours faible ou nul à la fertilisation et aux produits phytosanitaires (Nezet et Tharreau, 2008 in Protin et al, 2009).

De plus, les associations céréales/légumineuses permettent d'améliorer la qualité de la récolte. Dans le cas de récolte en grain, une augmentation de la teneur en protéines de la céréale est observée (Fontaine et al., 2013 ; Bedoussac et al., 2015). Dans le cas d'une récolte en fourrage, elles permettent de produire des fourrages riches en azote avec des teneurs en Matière Azotée Totale supérieures à des céréales pures (Protin et al., 2009 ; Corre-Hellou et al., 2013).

2.3. Robustesse face aux phénomènes biotiques et abiotiques

Les associations céréales/légumineuses se révèlent plus robustes vis-à-vis des phénomènes biotiques et abiotiques que les cultures pures, ainsi il en résulte une plus grande stabilité de la productivité de ces associations (Corre-Hellou et al., 2013).

2.3.1. Meilleur contrôle des adventices

La complémentarité d'utilisation des ressources évoquée précédemment permet de rendre les associations de cultures plus compétitives vis-à-vis des adventices (Corre-Hellou et al., 2014). En effet, les ressources disponibles sont mieux utilisées par les espèces cultivées et deviennent donc moins disponibles pour les adventices qui ont plus de mal à se développer. Une réduction de la présence d'adventices est surtout observée par rapport à une culture pure de légumineuses, qui sont de faibles compétitrices, alors qu'aucune différence significative n'est observée avec une culture pure de céréales (Fontaine et al., 2013 ; Corre-Hellou et al., 2014 ; Bedoussac et al., 2015).

Par ailleurs, lors d'une récolte en fourrage, les adventices sont récoltées en même temps que l'association ce qui limite leur montée à graines et leur dispersion.

Tableau 1 : Mécanismes en jeu dans les associations végétales et leurs interactions avec les ravageurs (R) et les maladies (M) (Corre-Hellou et al., 2014)

Facteurs	Mécanismes
Confusion visuelle (R)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Protection de la plante hôte par des plantes compagnes qui la recouvrent ◆ Certains phytophages sont plus attirés par une couleur particulière ou une texture de végétation uniforme
Dilution des stimuli (R)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ La présence de plantes non-hôtes peut masquer ou diluer les stimuli attractifs émis par la plante hôte. ◆ Cela peut provoquer chez le phytopophage des perturbations altérant l'orientation de l'insecte et nuisant aux processus de recherche de nourriture et de reproduction. ◆ Les insectes se trouvant sur une plante non-hôte pourront quitter la parcelle plus rapidement.
Confusion (R)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Des composés aromatiques de certaines plantes compagnes peuvent altérer les capacités des phytophages à trouver leur plante-hôte.
Barrière mécanique (R)(M)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Des plantes compagnes peuvent bloquer ou ralentir la dispersion des phytophages et la propagation des champignons parasites; cela peut aussi être dû au fait que les plantes compagnes sont non-hôtes. ◆ La nouvelle architecture de l'association peut modifier les modalités de dispersion entre organes d'une plante hôte (par exemple la projection des spores de champignon d'une feuille à l'autre).
Microclimat (R)(M)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Dans les associations végétales, les microhabitats sont plus diversifiés et les insectes peuvent avoir des difficultés pour localiser les endroits où les conditions leurs sont favorables. ◆ Les couverts associés peuvent modifier les conditions de température et d'humidité impactant le processus d'infection et le développement de champignons pathogènes.
Facteurs biotiques (R)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Les associations peuvent favoriser la présence de prédateurs et parasitoïdes.
Etat physiologique des tissus (M)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ L'architecture des couverts associés et la nouvelle allocation des ressources peuvent modifier l'état physiologique des tissus et leur réceptivité à la maladie (résistance ontogénique).
Effets allélopathiques (M)	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Les exsudats racinaires d'une espèce peuvent inhiber la germination des spores et la sporulation de champignons pathogènes du sol.

2.3.2. Sensibilité réduite vis-à-vis des maladies

Les associations possèdent un impact variable sur les maladies selon les espèces associées, les SdC, et plus globalement les conditions environnementales (Corre-Hellou et al., 2014). Plusieurs mécanismes sont mis en évidence par Corre-Hellou et al. (2014) afin d'expliquer les effets des associations de cultures sur les maladies (tableau 1).

Ainsi, dans des associations pois-céréales, une réduction de l'infestation du pois par l'ascocytose a pu être expliquée par une combinaison de ces mécanismes : la modification du microclimat au sein du couvert et la réduction de la dispersion des spores grâce à la présence d'une espèce non-hôte ont permis de limiter cette infestation (Schoeny et al., 2010 in Corre-Hellou et al., 2014). Des diminutions d'infestations de plusieurs maladies foliaires des céréales (oïdium, septoriose et rouilles) ont également été observées sur des céréales associées à des légumineuses par rapport à des céréales pures (blé ou orge associé au pois) (Corre-Hellou et al., 2004; Biarnès et al., 2008).

D'autres expérimentations ont mis en évidence un effet négatif des associations sur les maladies. Par exemple, Bedoussac (2009) a observé une augmentation de l'oïdium sur du blé dur associé à de la féverole, car la forte biomasse de la féverole a conduit à une humidité importante du couvert favorisant le développement de la maladie.

2.3.3. Sensibilité réduite vis-à-vis des ravageurs

De même, différents mécanismes permettent d'expliquer la réduction de la sensibilité aux ravageurs observée sur les associations de cultures (tableau 1) (Corre-Hellou et al., 2014). Par exemple, les modifications du microclimat et de l'architecture végétale du couvert en association perturbent les insectes ravageurs qui ont plus de difficultés à trouver leur plante hôte et à se développer que dans une culture pure. Cet effet est particulièrement marqué sur les insectes spécialistes qui se nourrissent d'une gamme d'espèces limitée contrairement aux insectes généralistes (Corre-Hellou et al., 2014).

Les associations semblent néanmoins avoir des effets variables sur la réduction des ravageurs. Ndzana et al. (2014) ont ainsi mis en évidence que les associations pois/blé dur permettent de réduire la présence de pucerons verts sur le pois par rapport à un pois cultivé seul. Au contraire, Bedoussac (2009) a mis en évidence une augmentation des dégâts de sitones sur de la féverole associée au blé dur par rapport à la féverole seule.

2.3.4. Compensation face aux phénomènes abiotiques

La présence de deux espèces ou plus permet de bénéficier de phénomènes de compensation entre les espèces face aux phénomènes abiotiques. En effet, si l'une des espèces est impactée négativement par des conditions de cultures particulières (gel, températures excessives, excès d'eau, ...), les autres espèces présentes peuvent exprimer un développement plus important garantissant ainsi une production à l'agriculteur. Des essais menés sur une association blé/pois, en 2011, ont montré que malgré le fait que le pois soit affecté par la sécheresse, l'association présente une production satisfaisante grâce à la compensation permise par la présence du blé (Fontaine et al., 2013).

D'autre part, certains phénomènes comme les problèmes de verre chez le pois peuvent être réduits en associant cette espèce à une autre telle que le triticale. La céréale joue alors le rôle de tuteur pour le pois (Fontaine et al., 2013, Pelzer et al., 2014a).

2.4. Fourniture d'azote pour la culture suivante

Les légumineuses présentent l'avantage de laisser au sol des reliquats azotés supérieurs à des non-légumineuses. Cependant, lorsqu'elles sont associées aux céréales, les reliquats azotés observés à la récolte sont généralement inférieurs à ceux des légumineuses pures et se rapprochent de ceux observés après des céréales pures (Pelzer et al., 2012). La disponibilité de l'azote dans le sol à la récolte ne semble donc pas améliorée par les associations céréales/légumineuses.

Néanmoins, par la suite, la dégradation des résidus de culture tels que les chaumes et les racines permet de restituer au sol de l'azote minéral en quantité variable selon les espèces (Tribouillois et al., 2017). Le ratio C/N des résidus est considéré comme un bon indicateur du potentiel de minéralisation de l'azote qu'ils contiennent, plus celui-ci est faible plus la quantité d'azote restituée est importante (Guinet et al., 2019). Dans le cas de cultures intermédiaires restituées au sol, Tribouillois et al. (2017) ont montré qu'un mélange céréale/légumineuse (seigle/vesce velue ou seigle/trèfle incarnat) possède des résidus avec un C/N inférieur à ceux d'une céréale pure. Cela facilite la minéralisation et permet de mettre à disposition plus rapidement de l'azote à la culture suivante par rapport aux céréales pures dont la minéralisation des résidus peut induire, au contraire, une « faim d'azote », c'est-à-dire une réorganisation de l'azote minéral du sol.

Les associations céréales/légumineuses présentent donc de multiples effets bénéfiques pouvant répondre aux problématiques observées dans le cas des CIVE d'hiver. Cependant, afin d'accéder aux services souhaités, le choix des espèces associées est une étape primordiale car toutes les espèces ne possèdent pas les mêmes caractéristiques et ne permettent pas de fournir tous les services recherchés.

3. Le choix des espèces à associer

Le choix des espèces ou variétés à associer repose encore aujourd'hui majoritairement sur des connaissances empiriques dont l'intérêt n'a pas toujours été montré scientifiquement, ce qui peut potentiellement être un frein au développement des associations de cultures (Barot et al., 2017). Cependant, depuis quelques années, des recherches scientifiques basées sur les traits écologiques s'intéressent aux caractéristiques des espèces afin d'optimiser les associations de cultures et de maximiser les services qu'elles peuvent rendre (Garnier et Navas, 2012 ; Barot et al., 2017).

3.1. Utilisation des traits fonctionnels des espèces

Un trait fonctionnel est défini comme une caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique d'une espèce qui impacte les performances de celle-ci (croissance, reproduction et survie) (Violle et al., 2007). Ces traits fonctionnels peuvent être reliés à différentes fonctions de la plante telles que l'interception de la lumière, la croissance ou l'absorption des ressources (eau, nutriments, ...) (Garnier et Navas, 2012). Ainsi, en associant des espèces ou variétés avec des traits fonctionnels différents, les services rendus par l'association peuvent être maximisés (Gaba et al., 2015 ; Barot et al., 2017) grâce aux mécanismes de complémentarité et de facilitation (Justes et al., 2014). C'est ce qu'on observe au sein des associations céréales/légumineuses en ce qui concerne l'utilisation de l'azote (Corre-Hellou et al., 2013 ; Justes et al., 2014). Néanmoins, les connaissances précises sur les traits fonctionnels des espèces et des variétés sont encore peu nombreuses, d'autant plus que certains traits sont susceptibles d'évoluer selon les conditions de croissance des plantes (seules ou associées) (Gaba et al., 2015 ; Barot et al., 2017).

Tableau 2 : Caractéristiques des principales espèces utilisées en tant que CIVE ou mœtuels (d'après Biarnès et al., 2011 ; Legendre et al., 2018 ; Chambre d'Agriculture du Gers, 2018)

Espèces	Avantages	Inconvénients
Graminées		
Triticale	Rendement élevé Peu sensible aux maladies Bonne couverture du sol Développement précoce de certaines variétés	Sensibilité à la verse de certaines variétés
Avoine d'hiver	Bonne couverture du sol Effet allélopathique	Développement tardif Sensible aux maladies et à la verse
Avoine rude	Production de biomasse Précoce	Sensible au gel si semis trop précoce
Orge d'hiver	Bonne couverture du sol Précoce	Sensible à la verse
Seigle fourrager	Rendement élevé Développement très précoce de certaines variétés Bonne couverture du sol Peu sensible aux maladies	Etouffant pour les légumineuses Appétant pour les limaces Sensible à la verse
Seigle forestier	Bonne couverture du sol Peu sensible aux maladies	Tardif Destruction difficile
Légumineuses		
Pois fourrager	Fort développement végétatif	Risque de verse
Pois protéagineux	Plus précoce que le pois fourrager	Sensible à la concurrence Sensible aux maladies
Féverole	Structuration du sol Port dressé, rôle de tuteur Forte production de biomasse Plus précoce que le pois et la vesce Résistante à l'aphanomyces	Sensible aux maladies Faible couverture du sol
Vesce commune	Fort développement végétatif	Risque de verse
Vesce velue	Développement rapide en fin d'hiver Plus résistante au froid que la vesce commune	Risque d'étouffement des autres espèces

Divers travaux ont permis de déterminer les traits fonctionnels des légumineuses permettant d'expliquer le contrôle des adventices (Den Hollander et al., 2007 ; Dayoub et al., 2017 ; Lorin et al., 2017) ou l'acquisition de l'azote (Tribouillois et al., 2015 ; Dayoub et al., 2017).

Ainsi, Dayoub et al. (2017) ont mis en évidence que la masse de la semence et l'expansion racinaire latérale sont des traits fonctionnels qui permettent d'expliquer l'absorption précoce d'azote par les légumineuses et donc leur compétitivité vis-à-vis des adventices. La lentille et la vesce commune apparaissent moins compétitives pour l'azote du fait d'un faible enracinement latéral et d'une faible masse de semence contrairement au pois et à la féverole. Par ailleurs, la féverole possède la particularité d'absorber et de fixer l'azote plus précocement que les autres espèces (Dayoub et al., 2017).

De même, dans le cas des associations entre colza et légumineuses gélives, Lorin et al. (2017) ont mis en évidence deux traits fonctionnels permettant d'expliquer la vitesse de croissance aérienne des légumineuses et donc leur compétitivité vis-à-vis des adventices : la surface foliaire unitaire et la vitesse de croissance en hauteur. Ainsi, les espèces à larges feuilles et qui sont capables de croître rapidement en hauteur comme le pois fourrager et la féverole sont celles qui sont susceptibles d'être les plus compétitives vis-à-vis des adventices contrairement à la vesce commune et à la lentille.

3.2. Utilisation des connaissances empiriques sur les espèces

Des connaissances empiriques permettent aussi de choisir les espèces d'une association. Le tableau 2 décrit les principaux avantages et inconvénients des espèces pouvant être utilisées pour produire des CIVE d'hiver ou des méteils (Biarnès et al., 2011 ; Legendre et al., 2018 ; Chambre d'Agriculture du Gers, 2018).

Comme évoqué auparavant, dans le cas des CIVE d'hiver, les services principalement recherchés sont la production de biomasse, la compétitivité vis-à-vis des adventices, une récolte précoce ainsi que la réduction des pertes d'azote à l'automne.

Parmi les graminées, les espèces qui semblent répondre le plus à ces attentes sont le triticale et le seigle fourrager car ils réunissent toutes ces caractéristiques et sont peu sensibles aux maladies, ce qui peut expliquer qu'ils soient majoritairement utilisés aujourd'hui (Bes de Berc, 2020).

Concernant les légumineuses, elles sont peu compétitives vis-à-vis des adventices et de l'azote du sol par rapport aux céréales. Le choix se fait donc principalement sur la capacité à produire précocement une biomasse importante au printemps. Pour cela, la féverole et la vesce velue semblent particulièrement adaptées.

4. Les impacts de l'introduction de légumineuses dans les CIVE d'hiver

L'introduction des associations céréales/légumineuses en remplacement des céréales pures représente une opportunité non-négligeable pour la production de CIVE d'hiver, cependant cela est susceptible de modifier la conduite de cette culture. Les références sur la conduite technique des associations en tant que CIVE sont peu nombreuses, elles peuvent néanmoins être apparentées à des mélanges céréales/légumineuses récoltés en fourrage. Ces références ont été complétées dans le cadre de ce mémoire par des entretiens semi-directifs auprès de 12 agriculteurs de Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire produisant des CIVE en associations céréales/légumineuses ou céréales pures (annexes 1 et 2).

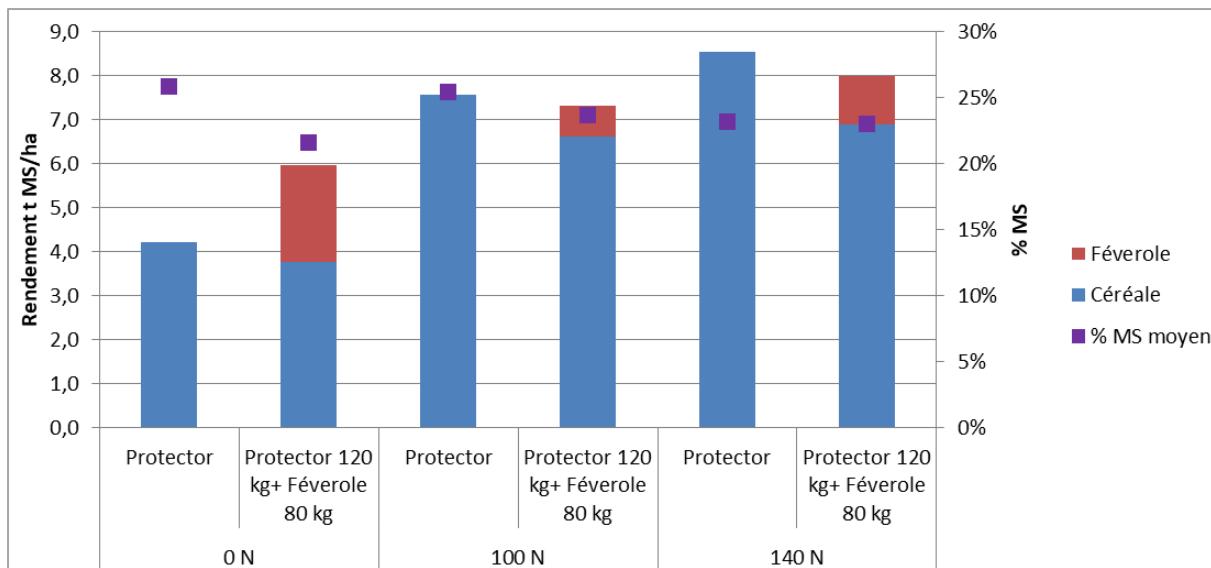


Figure 11 : Rendement en tMS/ha et taux de MS en % du seigle Protector seul ou associé avec de la féverole selon le niveau de fertilisation (sol de groie, semis le 27/09/2019, récolte le 27/04/2020)
(Résultats CRA NA, 2020)

4.1. Rendements proches des céréales pures avec une fertilisation azotée réduite

Des essais de la Chambre d'Agriculture des Landes (2019) mettent en évidence que les mélanges céréales/légumineuses permettent d'obtenir des rendements proches voire supérieurs aux rendements des céréales pures. Ainsi, avec une fertilisation de 78 kg N/ha au printemps, l'association seigle fourrager/féverole a permis d'atteindre un rendement de 8,8 tMS/ha alors que le seigle fourrager seul présentait un rendement de 6,5 tMS/ha. De même, des métaux associant trois espèces de céréales (triticale/avoine/blé tendre ou seigle forestier) à trois espèces de légumineuses (pois fourrager/pois protéagineux/vesce) ont atteint des rendements qui dépassent les 10 tMS/ha (Chambre d'Agriculture des Landes, 2019).

Néanmoins, d'autres essais montrent qu'une proportion trop importante de légumineuses peut pénaliser le rendement. Ainsi, une proportion de légumineuses comprise entre 20 et 40 % au semis serait l'optimum pour ne pas pénaliser le rendement (Marsac et al., 2019 ; Marsac et Heredia, 2020).

De plus, l'effet de l'association sur le rendement semble variable selon la période de récolte : plus la récolte est tardive, plus le rendement des associations est supérieur à celui des céréales pures. En effet, les essais de la Chambre d'Agriculture des Landes (2017) montrent que le rendement des mélanges contenant de la vesce et du pois fourrager continue d'augmenter au cours de la première quinzaine de juin tandis que celui des céréales pures plafonne ou diminue à cette période. De même, des essais menés par Agro-Transfert-RT ont mis en évidence que dans le cas de récolte précoce (25/04/2019), les légumineuses comme la vesce et le pois participent peu au rendement de la CIVE contrairement aux céréales mais elles expriment mieux leur potentiel de biomasse en cas de récolte tardive (27/05/2019) (Agro-Transfert-RT, 2020). En cas de récolte précoce, fréquente chez de nombreux agriculteurs, les légumineuses comme la vesce et le pois semblent donc avoir un impact négatif sur le rendement à cause de leur développement plus tardif que celui des céréales. Ce problème semble moins important dans les associations avec de la féverole car son développement est plus précoce. Des essais menés en 2020 au sein du réseau de l'association VAM par la CRA NA et ACE Méthanisation ont mis en évidence que le rendement de l'association seigle/féverole est supérieur à celui du seigle associé à une autre légumineuse (pois, vesce ou trèfle), ce qui peut être expliqué par sa précocité plus importante par rapport aux autres légumineuses.

Par ailleurs, la diminution de la fertilisation azotée que permettent les associations semble se vérifier dans le cas des CIVE d'hiver. En effet, Pelzer et al. (2014c) ont observé des rendements similaires entre des CIVE d'hiver en triticale pur fertilisé et des CIVE d'hiver avec du triticale associé à de la vesce, du pois ou du trèfle sans fertilisation. De même, les essais menés par la CRA NA et ACE Méthanisation avec VAM tendent à montrer que le seigle associé à de la féverole permet d'obtenir un rendement supérieur au seigle pur en absence de fertilisation et qui se rapproche de celui du seigle pur fertilisé (figure 11).

De plus, ces essais mettent en évidence que la fertilisation azotée impacte négativement le rendement en biomasse des légumineuses au profit de celui des céréales, comme démontré par Naudin et al. (2010) sur l'association blé/pois. Ici, le rendement de la féverole tend à diminuer avec l'augmentation de la quantité d'azote apportée contrairement au rendement du seigle (figure 11).

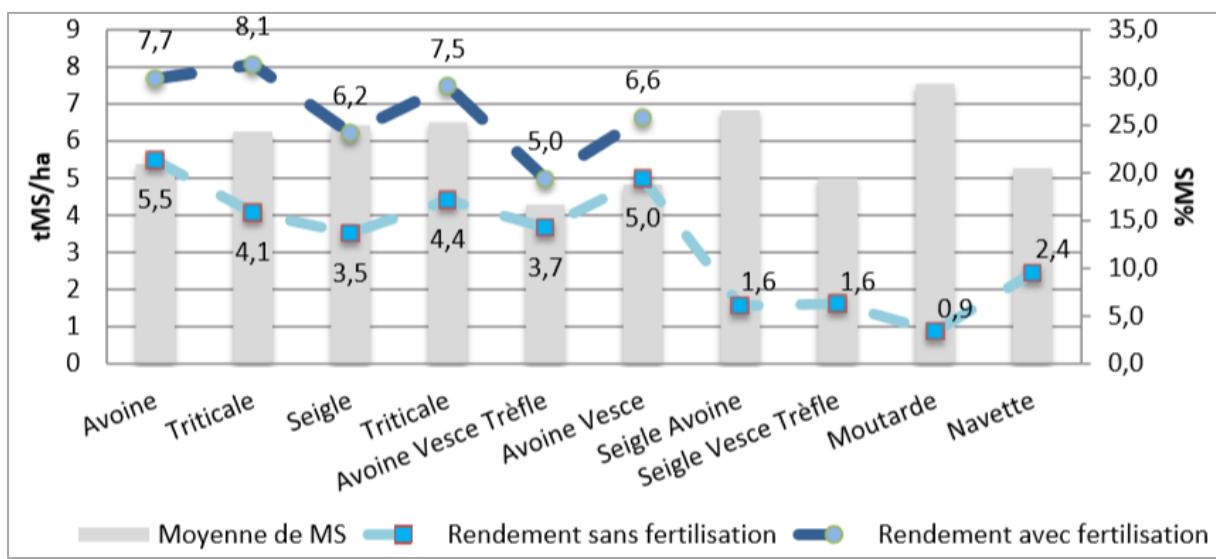


Figure 12 : Evolution du taux de MS en % et du rendement en tMS/ha selon les espèces et le niveau de fertilisation (semis le 23/10/2015, récolte le 12/04/2016) (*projet Opticive, ARVALIS, 2016*)
(Marsac et al., 2019)

L'enquête réalisée auprès d'agriculteurs met en évidence une fertilisation légèrement inférieure sur les associations céréales/légumineuses par rapport aux céréales pures. En effet, d'après ces résultats, les agriculteurs enquêtés qui produisent des CIVE en associations apportent au printemps en moyenne 80 kg N/ha alors que ceux qui produisent des CIVE en céréales pures en apportent 90 kg N/ha. De plus, les apports de matière organique à l'automne sont plus fréquents avant les associations que les céréales pures.

4.2. Taux de MS souvent inférieur aux céréales pures

Pour la récolte des CIVE, le taux de MS souhaitable est compris entre 28 et 35 %. Plusieurs essais ont mis en évidence que le taux de MS à la récolte des CIVE associées est inférieur à celui des céréales pures, d'autant plus en cas de récolte précoce. Dans les essais menés durant le projet Opticive, lors de la récolte le 12/04/2016, les taux de MS de l'avoine et du seigle associé à du trèfle ou de la vesce étaient compris entre 15 et 20 % tandis que les taux de MS des céréales pures étaient supérieurs à 25 % (figure 12) (Marsac et al., 2019). Il en va de même, dans les essais de la Chambre d'Agriculture des Landes (2018) : le mélange avoine/pois fourrager/vesces possédait un taux de MS de 15,4 % lors de la récolte le 24/04/2018 alors que celui du seigle fourrager était de 26,9 %. Cela s'explique par une humidité plus importante des légumineuses : par exemple, la féverole possédait un taux de MS de 16 % au moment de la coupe le 30/04/2019, tandis que celui du seigle fourrager était de 36 % (Chambre d'Agriculture des Landes, 2019). En moyenne, les légumineuses présentent 5 points de taux de MS en moins que les céréales à une même date (Biarnès et al., 2011).

Pour atteindre le taux de MS souhaitable, un préfanage peut donc être nécessaire (Teixeira Franco, 2017). Il vise à augmenter le taux de MS de la CIVE en la laissant sécher au sol quelques jours après la fauche avant de la récolter. Le séchage est alors influencé par différents paramètres : température, humidité de l'air, vent et rayonnement solaire (Munier et Morlon, 1987). Les agriculteurs enquêtés ont recours à cette méthode pour les associations et les céréales pures, ils laissent sécher la CIVE au sol pendant deux jours en cas de récolte précoce et généralement une demi-journée en cas de récolte tardive.

Lors de cette phase de séchage, l'eau des plantes sort principalement par les stomates situés au niveau des feuilles (Uijttewaal, 2020). Cependant, au moment de la récolte, les légumineuses (vesce, pois fourrager et surtout féverole) possèdent peu de feuilles et une part importante de tige avec une cuticule épaisse ce qui limite l'évacuation de l'eau et le séchage par rapport aux céréales (Uijttewaal et al., 2018). Pour atteindre un taux de MS donné, le temps de séchage est donc plus long pour les légumineuses que pour les céréales.

L'impact d'un préfanage d'une durée de deux jours a été mis en évidence sur CIVE d'hiver par la Chambre d'Agriculture des Landes (2018 ; 2019), il permet d'atteindre voire de dépasser 28 à 35 % de MS pour toutes les associations céréales/légumineuses. Néanmoins, aucune référence n'aborde le raisonnement de cette technique concernant la durée de séchage, la dynamique de séchage ainsi que les différences potentielles entre céréales pures et associations céréales/légumineuses.

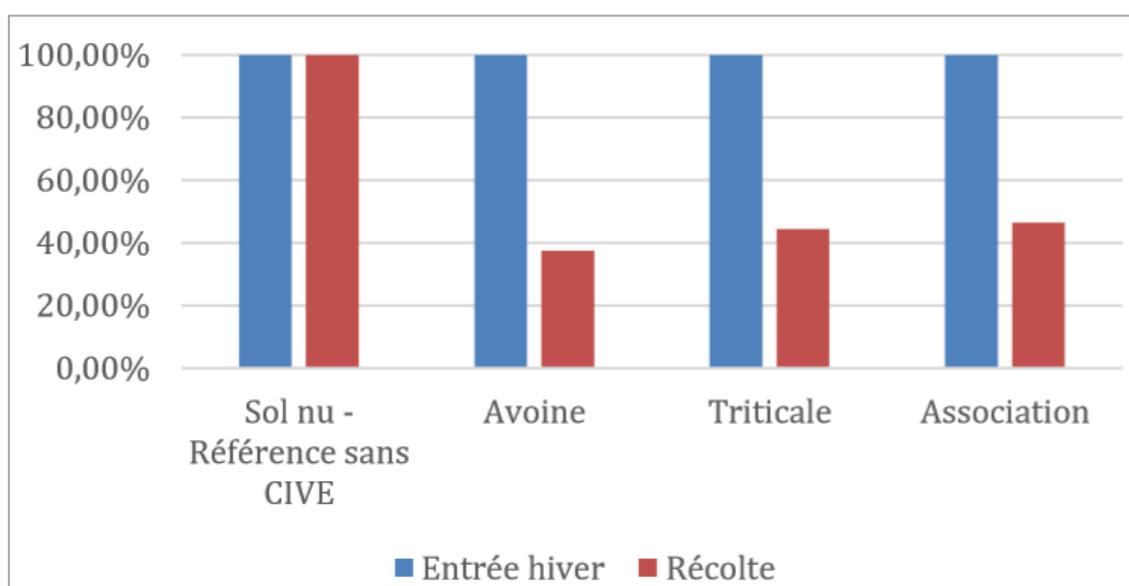


Figure 13 : Bilan des reliquats azotés en entrée hiver et à la récolte (fin avril) de CIVE d'hiver par rapport à un sol nu en % (essai Syppre en coteaux argilo-calcaire du Lauraguais, projet Opticive, ARVALIS, 2018) (Marsac et al., 2019)

4.3. Un état du sol à la récolte équivalent

Afin d'appréhender l'impact des CIVE d'hiver en association céréales/légumineuses sur la culture suivante, l'état du sol à la récolte peut être étudié grâce aux bilans hydriques et aux reliquats azotés. Cependant, peu d'études ont abordé ce sujet.

Concernant le bilan hydrique, Marsac et al. (2019) ont observé que la quantité d'eau dans le sol à la récolte des CIVE d'hiver était proche de la réserve de survie. Aucune différence significative n'a été observée entre les différentes espèces (avoine, triticale, avoine/vesce). D'après ces résultats, les associations valorisent aussi bien l'eau du sol que les céréales pures et ne permettent pas de conserver un stock plus important pour la culture suivante. Cependant, la pluviométrie du mois de mai, l'un des mois les plus pluvieux dans de nombreuses régions françaises, permet de recharger la réserve hydrique du sol et de ne pas pénaliser la culture suivante (Marsac et al., 2019).

Ces mêmes auteurs ont mis en évidence que les reliquats azotés à la récolte de l'association avoine/vesce sont inférieurs au sol nu et proches voire légèrement supérieurs à ceux observés en céréales pures (avoine, triticale et orge) (figure 13). Cela témoigne de la capacité de cette association à prélever l'azote du sol et donc à réduire les risques de lixiviation. Cependant, cette association ne permet pas de laisser au sol des reliquats azotés plus élevés que les céréales pures.

Par ailleurs, les légumineuses pourraient permettre des restitutions d'azote par minéralisation supérieures aux céréales pures (Tribouillois et al., 2017), ce qui semble favorable à la culture suivante.

4.4. Des intérêts économiques peu connus

D'un point de vue économique, le coût supérieur des semences de légumineuses (Pislor, 2016) et la réduction possible d'intrants sont susceptibles de faire varier les coûts de production des CIVE d'hiver dans le cas des associations céréales/légumineuses. Néanmoins, peu de comparaisons des coûts de production entre CIVE d'hiver en céréales pures et associées sont disponibles. Marsac et al. (2019) ont mis en évidence l'absence de différence significative de coût de production par tMS entre de l'avoine pure et l'association avoine/vesce lors de trois années d'expérimentations.

Pour les agriculteurs enquêtés, les associations céréales/légumineuses peuvent avoir un intérêt économiquement. En effet, d'une part elles assurent un revenu équivalent d'une année sur l'autre grâce à un rendement stable chaque année. Celui-ci est permis par la complémentarité entre les espèces qui assure une meilleure robustesse face aux évènements climatiques ou aux bioagresseurs. D'autre part, pour les éleveurs, ces associations sont un moyen de sécurisation du système fourrager. Valorisées en fourrages, les associations céréales/légumineuses possèdent une valeur alimentaire supérieure aux céréales pures notamment d'un point de vue protéique (Corre-Hellou et al., 2013 ; Pelzer et al., 2014a).

QUESTION DE TRAVAIL

Aujourd’hui majoritairement produites avec des céréales pures, les CIVE d’hiver sont de plus en plus utilisées dans la filière méthanisation. Cependant, ce mode de production pourrait, à moyen terme, faire face à différents problèmes : irrégularité du rendement, sensibilité vis-à-vis des bioagresseurs, pénalisation de la culture suivante, …

Les associations céréales/légumineuses possèdent de multiples bénéfices et semblent pouvoir répondre aux problèmes observés dans le cas de CIVE d’hiver en permettant de diminuer leur sensibilité vis-à-vis des bioagresseurs, de réduire l’utilisation d’engrais azotés et de limiter la variabilité interannuelle des rendements.

Les quelques études réalisées sur les CIVE d’hiver en association céréales/légumineuses ainsi que l’enquête réalisée auprès d’agriculteurs dans le cadre de ce stage tendent à montrer qu’elles permettent d’obtenir des rendements proches de ceux des céréales pures voire supérieurs lorsque la disponibilité de l’azote est un facteur limitant. Néanmoins, les agriculteurs font état d’un manque de connaissances sur ces cultures, ces résultats nécessitent donc d’être complétés afin d’acquérir des références dans différents contextes pédoclimatiques et d’appréhender l’intérêt économique des associations.

De plus, alors que les associations céréales/légumineuses présentent une meilleure utilisation des ressources en azote qui permettrait de réduire l’utilisation des engrains azotés par rapport aux céréales, les pratiques de fertilisation azotée des agriculteurs semblent assez proches entre associations et céréales pures. Cette divergence met en évidence la nécessité d’étudier l’impact de la fertilisation azotée sur le rendement des CIVE afin de savoir si les pratiques de fertilisation actuelles sont cohérentes ou s’il est possible de réduire ces apports azotés.

Par ailleurs, la compétitivité des associations céréales/légumineuses vis-à-vis des adventices est similaire à celle des céréales pures. Pour les agriculteurs, la couverture rapide du sol à l’automne permet de gérer les adventices. Cela ne semble donc pas être un frein pour le développement des CIVE d’hiver en association céréales/légumineuses. Cet impact n’a néanmoins jamais été quantifié dans le cas de ces cultures.

Ensuite, le développement plus tardif des légumineuses par rapport aux céréales et leur taux de MS inférieur à une même date de récolte impactent les dates et les méthodes de récolte. Cette caractéristique est un frein à l’implantation d’associations céréales/légumineuses pour certains agriculteurs. Le préfanage, parfois utilisé pour la récolte des CIVE en céréales pures, semble devoir être systématique en présence de légumineuses. Cependant, les conditions de sa réalisation telles que sa durée nécessitent d’être affinées.

Enfin, l’impact des CIVE d’hiver céréales/légumineuses sur l’état du sol à la récolte par rapport aux céréales pures semble être neutre à positif. Ces associations semblent donc en mesure de fournir des services écosystémiques (réduction des pertes d’azote, apport d’azote au sein du SdC, ...) sans compromettre la réussite de la culture suivante, néanmoins peu de références existent à ce sujet.

Face à ces manques de références, l’objectif du travail présenté dans ce mémoire était de répondre à la question suivante : **Comment l’association céréales/légumineuses impacte les performances et la conduite technique des CIVE d’hiver par rapport à une céréale pure ?**

Intérêts des associations céréales/légumineuses pour produire des CIVE d'hiver dans le Centre-Ouest de la France

- De multiples intérêts agronomiques : réduction de la sensibilité aux bioagresseurs, meilleure utilisation des ressources du milieu, stabilité du rendement, ...
- Des rendements similaires aux céréales pures voire supérieurs lorsque la disponibilité de l'azote est limitante.
- MAIS,
 - Des résultats à compléter pour acquérir des références dans différents contextes pédoclimatiques et connaître l'intérêt économique.
 - La sensibilité vis-à-vis des adventices n'a jamais été quantifiée.
 - Un manque de connaissance sur la réalisation du préfanage à la récolte, nécessaire à cause de l'humidité plus importante des légumineuses.
 - Peu de références sur l'impact de l'association sur l'état du sol à la récolte, bien que celui-ci semble assez limité.

Comment l'association céréales/légumineuses impacte les performances et la conduite technique des CIVE d'hiver par rapport à une céréale pure ?

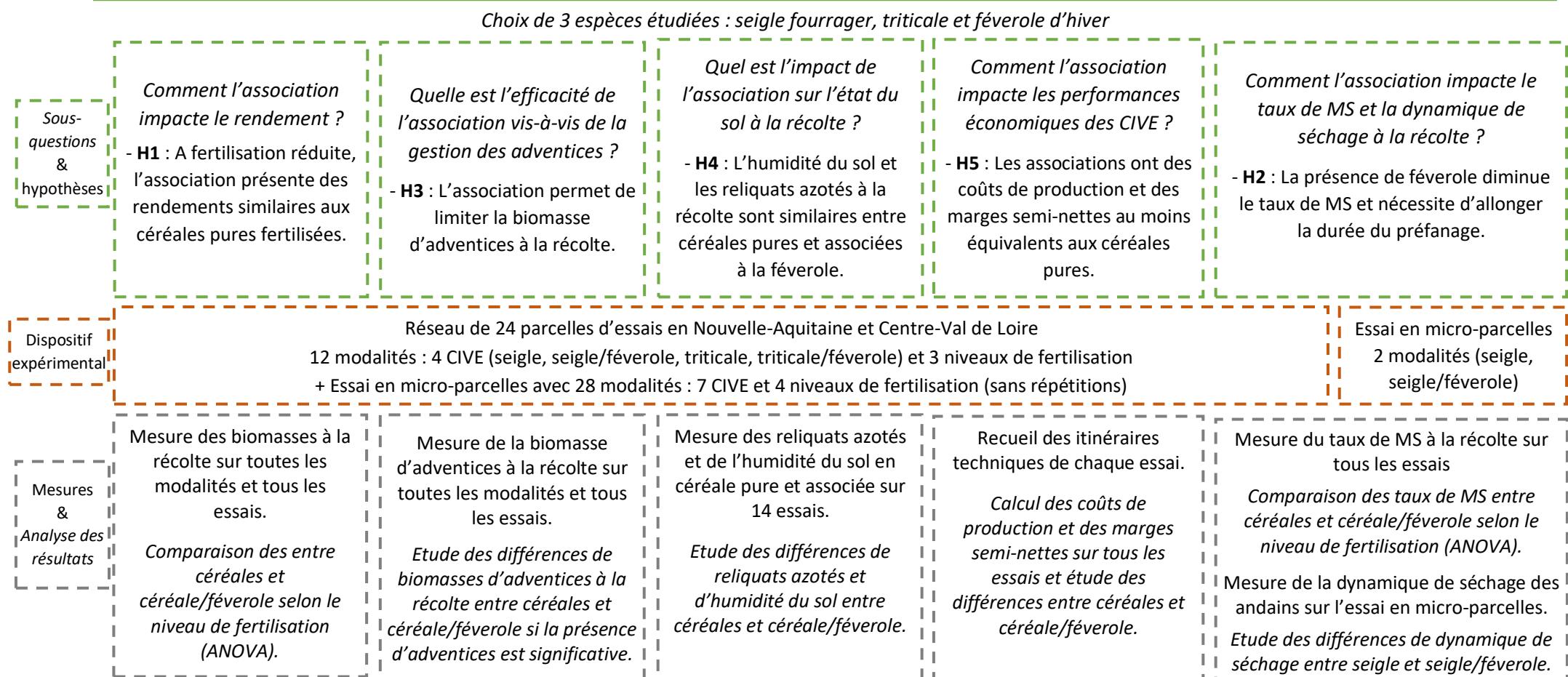


Figure 14 : Schéma de la démarche globale de réalisation de la mission

Pour répondre à cette question, l'étude a ciblé un nombre limité d'espèces. Deux céréales, le seigle fourrager et le triticale, et une légumineuse, la féverole d'hiver, ont été étudiées. Le seigle fourrager et le triticale ont été choisis car ils sont très fréquemment utilisés par les agriculteurs pour produire des CIVE d'hiver étant donné leur important potentiel de production de biomasse, et précocement pour certaines variétés. La féverole d'hiver a été choisie pour sa précocité par rapport aux autres légumineuses.

Au regard de la synthèse bibliographique, de l'enquête réalisée auprès d'agriculteurs et des espèces étudiées, la question de travail soulève cinq sous-questions pour lesquelles des hypothèses de travail (H1 à H5) ont été émises.

- *Comment l'association céréale/féverole impacte le rendement des CIVE ?*

H1 : A fertilisation réduite, les associations céréale/féverole permettent d'obtenir des rendements similaires aux céréales pures fertilisées.

- *Comment l'association céréale/féverole impacte le taux de MS et la dynamique de séchage à la récolte ?*

H2 : Le taux de MS des CIVE en association céréale/féverole est inférieur à celui des céréales pures étant donné l'humidité plus importante de la féverole, ce qui induit une durée de préfanage plus longue à la récolte.

- *Quelle est l'efficacité de l'association céréale/féverole vis-à-vis de la gestion des adventices ?*

H3 : La biomasse d'adventices présente à la récolte dans les céréales associées à la féverole est inférieure à celle des céréales pures.

- *Quel est l'impact de l'association céréale/féverole sur l'état du sol à la récolte ?*

H4 : L'état du sol à la récolte est similaire entre l'association céréale/féverole et les céréales pures. Les reliquats azotés et les conditions d'humidité du sol observés après l'association sont proches de ceux observés après les céréales pures.

- *Comment l'association céréale/féverole impacte les performances économiques des CIVE ?*

H5 : Les associations ont des coûts de production et des marges semi-nettes au moins équivalents aux céréales pures.

Afin de répondre à ces sous-questions et de vérifier les hypothèses, ce travail se base sur un réseau de parcelles d'essais situées chez des agriculteurs de Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire et sur un essai en micro-parcelles situé sur le site INRAE de Lusignan (86) sur lesquels sont implantées du seigle fourrager et du triticale en pur et associés à de la féverole d'hiver.

La démarche suivie pour répondre à la question de travail est synthétisée dans la figure 14.

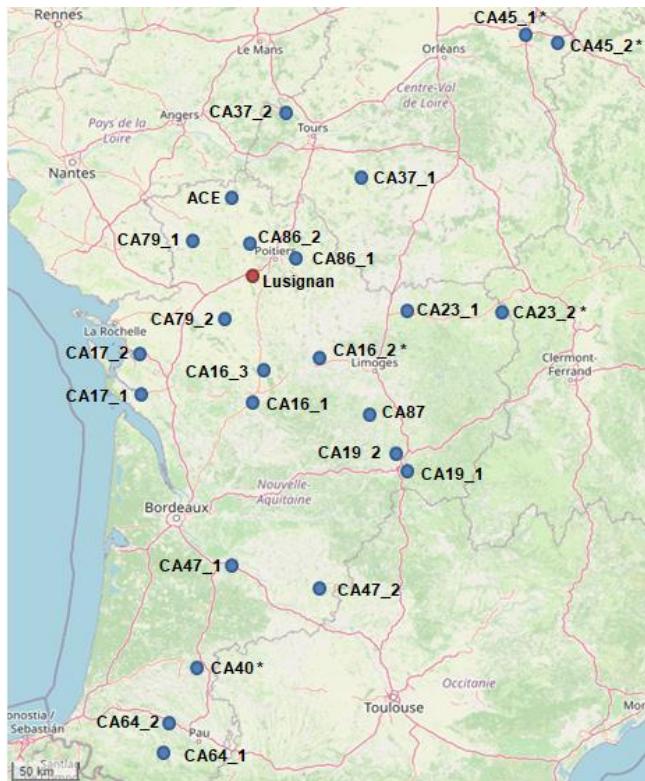


Figure 15 : Carte de la répartition des essais

(en bleu : essais du réseau de parcelles ; en rouge : essai en micro-parcelles) *Essai non inclus dans l'analyse des résultats

Tableau 3 : Caractéristiques pédoclimatiques et dates de semis et de récolte des essais

Essai	Type de sol	Date de semis	Date de récolte	Pluviométrie**	Somme de températures**
ACE	Sableux	25/09/2020	03/05/2021	330 mm	1792°C
CA16_1	Argileux	27/11/2020	12/05/2021	375 mm	1242°C
CA16_2*	Sableux	07/11/2020	18/05/2021	390 mm	1462°C
CA16_3	Sableux	22/10/2020	08/05/2021	425 mm	1672°C
CA17_1	Argileux	18/10/2020	22/04/2021	434 mm	1742°C
CA17_2	Limoneux	20/10/2020	21/04/2021	433 mm	1729°C
CA19_1	Sableux	06/11/2020	04/05/2021	400 mm	1326°C
CA19_2	Sableux	06/11/2020	06/05/2021	400 mm	1326°C
CA23_1	Sableux	19/10/2020	05/05/2021	411 mm	1210°C
CA23_2*	Sableux	05/11/2020	05/05/2021	383 mm	1003°C
CA37_1	Limoneux	30/09/2020	03/05/2021	399 mm	1662°C
CA37_2	Limoneux	30/09/2020	10/05/2021	399 mm	1662°C
CA40*	Limoneux	21/10/2020	-	634 mm	1690°C
CA45_1*				Données non disponibles	
CA45_2*				Données non disponibles	
CA47_1	Limoneux	30/09/2020	29/04/2021	456 mm	1887°C
CA47_2	Argileux	30/11/2020	28/05/2021	304 mm	1184°C
CA64_1	Limoneux	22/10/2020	21/04/2021	545 mm	1710°C
CA64_2	Limoneux	22/10/2020	21/04/2021	545 mm	1710°C
CA79_1	Sableux	15/10/2020	14/04/2021	431 mm	1468°C
CA79_2	Limoneux	20/10/2020	19/04/2021	430 mm	1460°C
CA86_1	Argileux	29/09/2020	22/04/2021	391 mm	1694°C
CA86_2	Argileux	22/09/2020	26/04/2021	411 mm	1788°C
CA87	Sableux	29/09/2020	30/04/2021	671 mm	1555°C
Lusignan	Limoneux	09/10/2020	28/04/2021	429 mm	1540°C

* Essais non retenus. ** Du semis au 21/04/2021 ou jusqu'à la date de récolte pour les récoltes ayant eu lieu avant le 21/04/2021. Somme de températures en base 0°C.

MATERIELS & METHODES

1. Enquête auprès d'agriculteurs

En début de mission, une enquête par entretien téléphonique a été réalisée auprès de 12 agriculteurs de Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire. Les objectifs de cette enquête étaient d'apporter des éléments de réflexion permettant d'affiner la problématique de la mission, de confirmer les choix du dispositif expérimental au regard des pratiques agricoles (espèces implantées, fertilisation, ...) et de fournir des éléments de discussion des résultats issus des essais. Ces enquêtes ne sont donc pas présentées en tant que résultats.

Les 12 agriculteurs enquêtés sont des éleveurs et des céréaliers. Neuf d'entre eux produisent des CIVE d'hiver en associations céréales/légumineuses tandis que trois les produisent avec des céréales pures. Leurs contacts ont été fournis par l'intermédiaire des conseillers des Chambres d'Agriculture départementales partenaires du projet PAMPA. Les informations recueillies portent sur différents sujets : (i) les itinéraires techniques des CIVE d'hiver en association, (ii) les intérêts et inconvénients par rapport à des céréales pures, (iii) les difficultés rencontrées ou encore (iv) les freins à la mise en place d'associations. Le support de recueil des données d'enquête est présenté en annexe 1 et la synthèse des résultats est présentée en annexe 2.

2. Présentation des essais

Ce travail se base sur un réseau de parcelles d'essais composé de 24 parcelles d'agriculteurs des régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire et sur un essai en micro-parcelles situé sur le site INRAE de Lusignan. Ces essais se situent dans des contextes pédoclimatiques variés (type de sol, pluviométrie et somme de températures) (figure 15 et tableau 3).

Le suivi et la réalisation des mesures sur les 24 parcelles d'agriculteurs ont été réalisés par les partenaires du projet PAMPA que sont les 12 Chambres d'Agriculture départementales et la société de conseil ACE Méthanisation. Sur l'essai en micro-parcelles, le suivi et la réalisation des mesures font partie des tâches qui ont été réalisées au cours de ce stage.

2.1. Dispositif expérimental

Les 24 essais du réseau de parcelles ont été conduits en bandes de 6 à 12 mètres de large et 100 mètres de long (figure 16). Quatre CIVE d'hiver avec des espèces différentes ont été implantées à l'automne 2020 : seigle fourrager, seigle fourrager/féverole, triticale et triticale/féverole. Les variétés implantées sont les mêmes sur tous les essais : Vitallo pour le seigle fourrager, Bikini pour le triticale et Diva pour la féverole. Elles ont principalement été choisies pour leur degré de précocité élevé, caractéristique recherchée pour les CIVE d'hiver. Les semences étaient certifiées et sans traitement de semences.

Trois niveaux de fertilisation azotée ont été appliqués sur ces modalités :

- Dose d'azote habituellement apportée par l'agriculteur sur du seigle pur en cohérence avec la méthode du bilan (de 50 à 160 kg N/ha) nommée dose X
- Moitié de dose habituelle (de 25 à 80 kg N/ha) nommée dose X/2
- Absence de fertilisation nommée dose 0

La fertilisation a été réalisée sous forme minérale. Aucune intervention phytosanitaire n'a été réalisée sur ces essais.

Chaque essai compte donc quatre CIVE et trois niveaux de fertilisation soit 12 modalités.

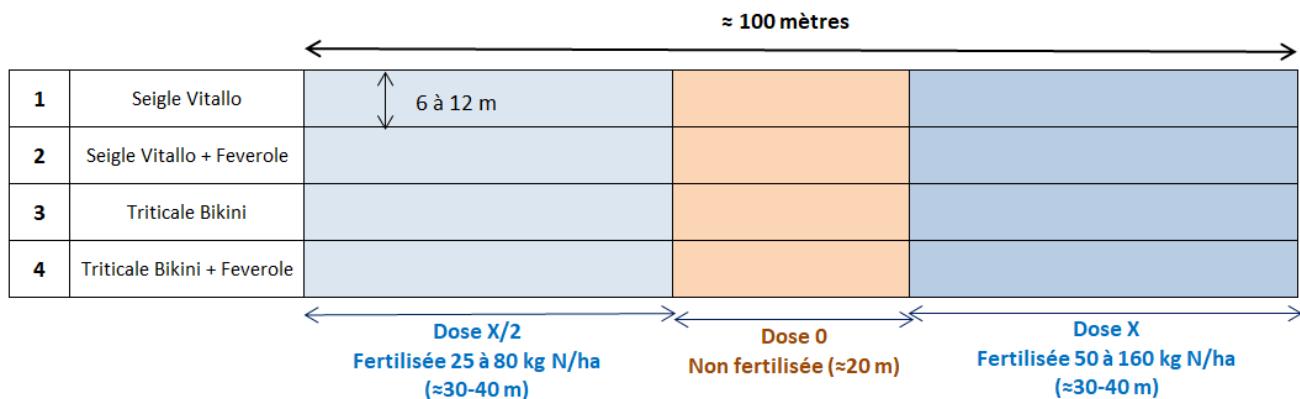


Figure 16 : Schéma du dispositif expérimental des essais en bandes chez les agriculteurs

Tableau 4 : Mesures réalisées sur les essais du réseau et sur l'essai en micro-parcelles

Essai	Taux de couverture du sol	Mesures*						Dynamique de séchage en andains
		Biomasse totale et par espèces	Biomasse d'adventices	Taux de MS	Reliquats azotés/Humidité du sol	Teneur en azote de la biomasse aérienne		
ACE		X	X	X	X	X		
CA16_1		X		X				
CA16_2 **		X		X	X			
		<i>Féverole désherbée</i>						
CA16_3		X		X				
CA17_1		X		X			X	
CA17_2		X		X				
CA19_1		X		X				
CA19_2		X		X				
CA23_1		X		X				
CA23_2 **		X		X				
		<i>Une seule modalité de fertilisation azotée (X)</i>						
CA37_1		X		X				
CA37_2		X	X	X				
CA40 **			<i>Essai non récolté</i>					
CA45_1 **			<i>Données non fournies</i>					
CA45_2 **			<i>Données non fournies</i>					
CA47_1		X		X	X	X		
CA47_2		X		X				
CA64_1		X		X				
CA64_2		X		X				
CA79_1		X		X				
CA79_2		X		X				
CA86_1	X	X	X	X	X	X		
CA86_2	X	X	X	X	X	X		
CA87		X		X	X			
Lusignan	X	X	X	X	X	X		X
Nombre total d'essais	3	20	5	20	6	6	1	

*Mesures réalisées à la récolte hormis la mesure du taux de couverture du sol réalisée en entrée et sortie hiver. **Essais non retenus

L'essai en micro-parcelles (6x16 mètres) est composé des quatre mêmes CIVE que le réseau de parcelles auxquelles s'ajoutent les associations seigle fourrager/vesce velue et seigle fourrager/triticale/vesce velue/pois fourrager qui ne seront pas analysées ici. Quatre niveaux de fertilisation azotée différents (0, 50, 80 et 120 kg N/ha) ont été appliqués sous forme d'ammonitrat. Cet essai compte donc 28 modalités.

Les essais ont été semés à des dates variables qui s'étalement du 22/09/2020 au 30/11/2020 (tableau 3). De même, les dates de récolte sont variables en fonction des essais étant donné la diversité des dates de semis et des contextes climatiques. Elles vont du 19/04/2021 au 28/05/2021 (tableau 3). Néanmoins, sur tous les essais, les CIVE ont été récoltées à des stades de développement proches, c'est-à-dire aux stades début épiaison-floraison.

2.2. Choix des essais étudiés

Pour la suite de ce mémoire, l'essai en micro-parcelles et 19 des 24 essais du réseau de parcelles ont été pris en compte, cinq ayant été écartés pour diverses raisons.

Les essais CA23_2 et CA16_2 n'ont pas été utilisés car ils ont fait l'objet d'erreurs de protocole. Sur le premier, une seule modalité de fertilisation a été réalisée et, sur le deuxième, la féverole a été désherbée par erreur. Ensuite, les données des essais CA45_1 et CA45_2 n'ont pas été récupérées à temps ce qui n'a pas permis de les inclure dans ce mémoire. Enfin, l'essai CA40 n'a pas été récolté car le semis a été réalisé dans de mauvaises conditions ce qui a induit une mauvaise levée des CIVE et un salissement important.

3. Réalisation des mesures

Les mesures réalisées sur les différents essais sont répertoriées dans le tableau 4. Toutes les mesures n'ont pas été réalisées sur tous les essais comme prévu initialement ou n'ont pas été récupérées à temps pour figurer dans ce mémoire.

3.1. Mesure des biomasses et du taux de MS à la récolte

Sur 20 essais, pour chaque modalité, des mesures de biomasse par espèces ont été réalisées à la récolte. Pour cela, sur trois placettes de 1 m² par modalité, les plantes ont été coupées à une hauteur de 5 cm au-dessus du sol et les biomasses fraîches de céréales, légumineuses et adventices¹ ont été pesées séparément.

Puis, à partir des prélèvements réalisés sur les trois placettes, trois échantillons composites (un pour les céréales, un pour les légumineuses et un pour les adventices) ont été réalisés. Ces échantillons ont été pesés puis séchés à l'étuve à 60 °C pendant 72 h avant d'être pesés à nouveau afin de déterminer le taux de MS de chacun d'entre eux.

Ces mesures de biomasses fraîches et de taux de MS ont permis de calculer les biomasses sèches de chaque placette selon la formule suivante :

$$\text{Biomasse sèche} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) = \sum \text{Biomasse fraîche de chaque espèce} \times \text{Taux de MS de chaque espèce}$$

Puis, le rendement de chaque modalité en tMS/ha a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Rendement} \left(\frac{\text{tMS}}{\text{ha}} \right) = \text{Moyenne des biomasses sèches des 3 placettes} (\text{kg/m}^2) \times 10$$

¹ Biomasse d'adventices mesurée uniquement sur cinq essais



Figure 17 : Exemple de photographie utilisée pour la détermination du taux de couverture du sol



Figure 18 : Cage de séchage disposée au sein d'un andain de seigle

3.2. Mesure du taux de couverture du sol

Sur trois essais, le taux de couverture du sol a été mesuré à deux dates : à l'automne/entrée hiver soit 45 à 60 jours après le semis et en sortie hiver soit 90 à 100 jours après le semis.

Pour cela, six photographies par bande de CIVE ont été prises en positionnant l'appareil horizontalement au sol pour obtenir des photographies telles que présentée en figure 17. Puis, ces images ont été analysées grâce au logiciel d'analyse d'images ImageJ qui permet, grâce une macro développée par le GEVES, de mesurer le taux de couverture du sol par la végétation.

3.3. Mesure des reliquats azotés et de l'humidité du sol

Les mesures de reliquats azotés et d'humidité du sol à la récolte ont été réalisées sur cinq essais du réseau de parcelles et sur l'essai en micro-parcelles de Lusignan.

Ces mesures ont été réalisées sur quatre modalités par essai : céréale pure et céréale/féverole sans fertilisation azotée et céréale pure et céréale/féverole avec la dose X de fertilisation azotée. Selon les essais, la céréale sur laquelle ont été réalisées ces mesures est variable (seigle fourrager ou triticale). Cette liberté de choix a permis de réaliser les mesures sur la céréale avec laquelle la présence de féverole était la plus importante, afin de mettre en évidence plus clairement les impacts potentiels de la féverole sur les reliquats azotés et l'humidité du sol. Pour réaliser ces mesures, quatre carottages ont été effectués dans les horizons 0-30 cm et 30-60 cm afin de constituer un échantillon représentatif de chaque horizon pour chaque modalité testée. Ces échantillons ont ensuite été envoyés au laboratoire AUREA pour des analyses de teneur en azote ammoniacal (NH_4) et nitrique (NO_3) ainsi que des analyses de taux d'humidité.

3.4. Mesure de la teneur en azote de la biomasse aérienne

Pour les modalités sur lesquelles la mesure des reliquats azotés a eu lieu, une mesure de la teneur en azote de la biomasse aérienne des plantes a également été réalisée. Pour cela, des échantillons d'environ 200 g de biomasse aérienne de féverole et de céréales, préalablement séchés à l'étuve à 60 °C pendant 72 h, ont été envoyés au laboratoire AUREA pour des analyses de teneur en azote.

Ces mesures ont permis de déterminer les exportations d'azote des CIVE grâce à la formule suivante : $\text{Exportations d'azote} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right) = \text{Rendement} \left(\frac{\text{tMS}}{\text{ha}} \right) \times \text{Teneur en azote} (\%) \times 1000$.

3.5. Mesure de la dynamique de séchage des andains

La comparaison des dynamiques de séchage entre céréales pures et associées a été réalisée uniquement sur l'essai en micro-parcelles de Lusignan à deux dates différentes (D1 : du 21 au 23 avril et D2 : du 27 au 29 avril).

Pour cela, deux modalités de CIVE d'hiver (seigle fourrager et seigle fourrager/féverole) ont été fauchées et mises en andains grâce à une faucheuse conditionneuse. Cela a été réalisé à 15 h pour D1 et à 10 h pour D2. Puis, trois cages de séchages de 60 cm de large et 100 cm de long ont été placées sous une partie d'andain de chaque modalité (figure 18) afin de pouvoir peser cette partie d'andain à l'aide d'un peson (Gaillard, 1998). A partir de la fauche, celles-ci ont été pesées environ toutes les deux heures entre 8 h 30 et 18 h pendant deux jours. Au bout de deux jours, le contenu de chaque cage a été séché à l'étuve afin de déterminer la biomasse sèche de fourrage. A partir de celle-ci, le taux de MS du fourrage lors des différentes pesées a été déterminé, permettant ainsi de suivre l'évolution du taux de MS du fourrage au cours des deux jours de séchage.

4. Analyses des données

4.1. Etude du rendement

Pour étudier le rendement, les mesures réalisées sur 19 essais du réseau de parcelles et sur l'essai en micro-parcelles ont été analysées ensemble en prenant en compte les modalités de CIVE communes (seigle fourrager, seigle fourrager/féverole, triticale, triticale/féverole). Cela représente donc un total de 20 répétitions par modalité (une répétition par essai).

Ces rendements ont tout d'abord été étudiés en observant leur variabilité selon les CIVE et le niveau de fertilisation. Pour cela, une ANOVA¹ à deux facteurs (CIVE et fertilisation) a été utilisée afin d'identifier l'effet de ces deux éléments sur le rendement. L'hypothèse nulle était que toutes les CIVE et niveaux de fertilisation présentent un rendement similaire. Cette hypothèse a été rejetée lorsque la probabilité de l'obtenir était inférieure à 5 % (p-value < 0,05). En cas de rejet, indiquant un impact significatif de l'un des facteurs, un test de comparaisons multiples de moyennes a été utilisé, le test de Newman-Keuls. Un seuil de significativité de 5 % (p-value = 0,05) a été retenu pour conclure à des différences significatives entre les modalités. Ces analyses ont été réalisées avec le logiciel R version 4.1.0.

Ensuite, l'impact de la fertilisation sur les CIVE a été mis en évidence grâce à la construction de courbes de réponse à l'azote pour chaque CIVE. Celles-ci ont pour but d'expliquer le rendement en fonction de la quantité de fertilisation azotée apportée. Pour cela, seuls les rendements obtenus avec des quantités de fertilisation communes à plusieurs essais (0, 40, 50, 80 et 100 kg N/ha) ont été pris en compte. Les courbes de tendance ont été construites avec le logiciel Excel et sont de type polynomial de degré 2.

Enfin, pour expliquer la variabilité des rendements des CIVE selon les essais, les rendements ont été étudiés en fonction de différents facteurs comme le type de sol, la date de semis et le climat. Pour étudier l'impact du type de sol, les essais ont été classés selon trois types de sol : sableux, limoneux et argileux (tableau 3). Pour le climat, la somme de températures et la pluviométrie du semis au 21/04/2021 ont été utilisées. Elles ont été calculées à partir des relevés quotidiens de température, d'humidité et de précipitations de 119 stations météorologiques du 01/01/2020 au 21/04/2021 fournis par Météo-France². Les données météorologiques attribuées à chaque essai sont celles de la station du département de l'essai.

4.2. Etude du taux de MS à la récolte

Comme pour l'étude du rendement, l'étude du taux de MS a été réalisée à partir des mesures du réseau d'essais et de l'essai en micro-parcelles, soit 20 essais.

Pour cela, la variabilité du taux de MS à la récolte selon les CIVE a été étudiée avec un test de Kruskal-Wallis (ANOVA non-paramétrique). Il a été réalisé en prenant l'hypothèse nulle selon laquelle le taux de MS moyen de toutes les CIVE est similaire. Dans le cas où l'hypothèse nulle a été rejetée (p-value < 0,05), un test de comparaison de Wilcoxon a été utilisé pour identifier les différences significatives entre CIVE.

Par ailleurs, l'impact d'autres facteurs sur le taux de MS tels que la durée du cycle de la culture ou la part de légumineuses dans l'association ont été également étudiés.

¹ Les conditions nécessaires à sa réalisation (normalité et indépendance des résidus, homoscédasticité) ont été vérifiées (test de Shapiro, test de Bartlett).

² <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-quotidiennes-de-119-stations-en-france-metropolitaine-pour-les-etudes-de-liens-entre-meteorologie-et-covid-19-du-01-01-2020-au-21-04-2021/>

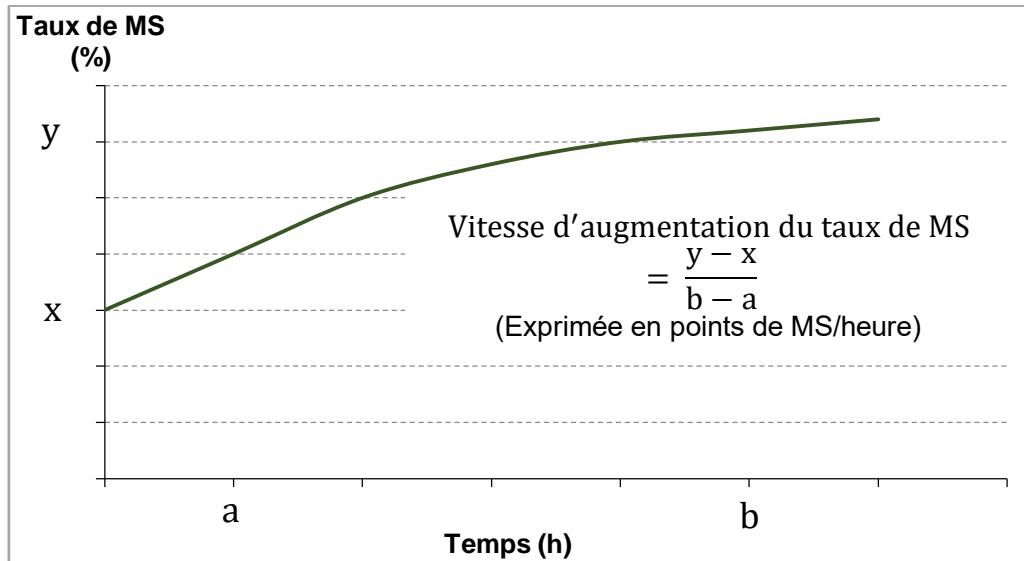


Figure 19 : Exemple de calcul de la vitesse d'augmentation du taux de MS en points de MS/heure en fonction du temps

$$\text{Coût de production (\text{€}/tMS)} = \frac{\text{Coût des intrants (\text{€}/ha)} + \text{Coût de mécanisation (\text{€}/ha)}}{\text{Rendement (tMS/ha)}}$$

$$\text{Marge semi-nette (\text{€}/ha)} = (\text{Prix de vente (\text{€}/tMS)} - \text{Coût de production (\text{€}/tMS)}) \times \text{Rendement (tMS/ha)}$$

Figure 20 : Equations de calcul du coût de production en €/tMS et de la marge semi-nette en €/ha

4.3. Etude de la dynamique de séchage

A partir des mesures de l'évolution du taux de MS des CIVE en andains, deux courbes de dynamique de séchage en fonction du temps ont été construites pour identifier les différences entre seigle pur et seigle/féverole. La détermination de la vitesse d'augmentation du taux de MS en fonction du temps a également permis de comparer le seigle pur et associé, elle est exprimée en points de MS/heure (figure 19).

Ensuite, la dynamique de séchage a été mise en relation avec des données météorologiques afin d'appréhender leur impact sur le séchage des andains. Les données météorologiques sont issues de la station INRAE de Lusignan située à 3 km de l'expérimentation. Les données utilisées sont la température, l'humidité relative de l'air, le vent et le rayonnement global à un pas de temps horaire.

4.4. Etude des adventices

L'impact de l'association céréale/féverole sur les adventices a été étudié de deux manières. D'une part, le taux de couverture du sol des différentes CIVE à l'automne et en sortie d'hiver sur l'essai en micro-parcelles de Lusignan a été étudié pour identifier les différences de couverture du sol entre les CIVE. Pour cela, une ANOVA à un facteur ainsi qu'un test de Newman-Keuls a été utilisé. Le seuil de significativité retenu est de 5 % (p-value=0,05). Cela permet d'évaluer la sensibilité au salissement des différentes CIVE. D'autre part, les différences de biomasses d'adventices à la récolte entre céréales pures et les associations céréale/féverole sur les différents essais ont été étudiées afin de déterminer l'impact des associations sur la biomasse d'adventices.

4.5. Etude de l'état du sol à la récolte

Pour étudier l'état du sol à la récolte, les différences de reliquats azotés et d'humidité du sol à la récolte entre les céréales pures et les associations céréale/féverole ont été observées et expliquées, à dire d'experts, selon les exportations en azote des plantes, la part de féverole présente ou les conditions pédoclimatiques des essais.

4.6. Etude de l'intérêt économique

A partir de l'itinéraire technique fourni par les conseillers, le coût de production (en €/tMS) et la marge semi-nette (MSN) (en €/ha) de chaque CIVE ont été calculés sur 16 essais. Les formules de calcul sont présentées en figure 20. Les coûts pris en compte sont les intrants (semences, fertilisation et produits phytosanitaires) et la mécanisation (du travail du sol pré-semis à la récolte de la CIVE), sans main d'œuvre. Un coût unique de récolte de 275 €/ha a été utilisé, il prend en compte la récolte au champ, le transport et la mise en silo de la CIVE. Pour calculer la MSN, deux prix de vente ont été utilisés. L'un, de 90 €/tMS, lorsque l'agriculteur bénéficie de digestat en retour et l'autre, de 110 €/tMS, en absence de retour de digestat. Sans retour de digestat, un coût de compensation des exportations P et K de 25 €/tMS a été appliqué. Le barème des tarifs utilisés et leur source sont disponibles en annexe 3.

Pour comparer céréales pures et associations céréale/féverole, la MSN a été étudiée en fonction du rendement afin de déterminer le rendement minimal qui permet d'assurer la rentabilité des CIVE. Puis, des tests de Kruskal-Wallis et de comparaison de rangs de Wilcoxon ont été utilisés pour comparer les coûts de production et les MSN entre céréales pures et associées pour les rendements permettant d'atteindre une MSN positive.

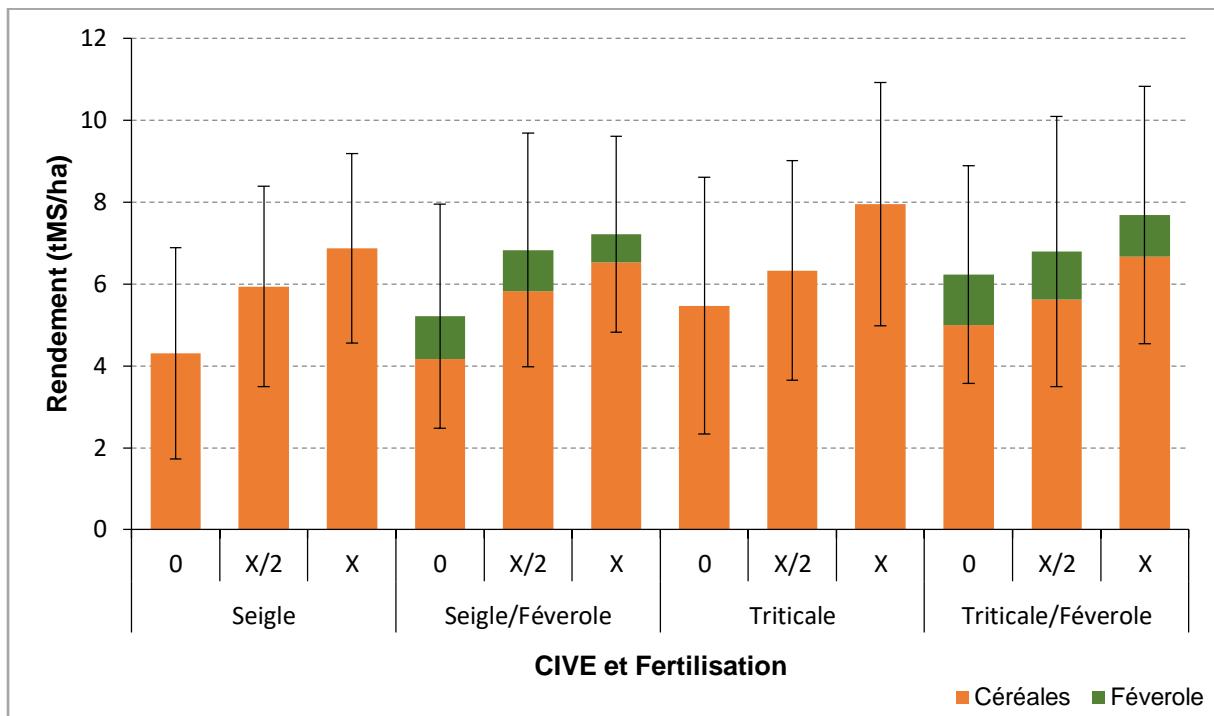


Figure 21 : Rendement en tMS/ha et écart-types des 12 modalités de CIVE testées sur tous les essais
(dose 0 et X : n=20 essais ; dose X/2 : n=17 essais)

Dose X/2 comprise entre 25 et 80 kg N/ha ; Dose X comprise entre 50 et 160 kg N/ha

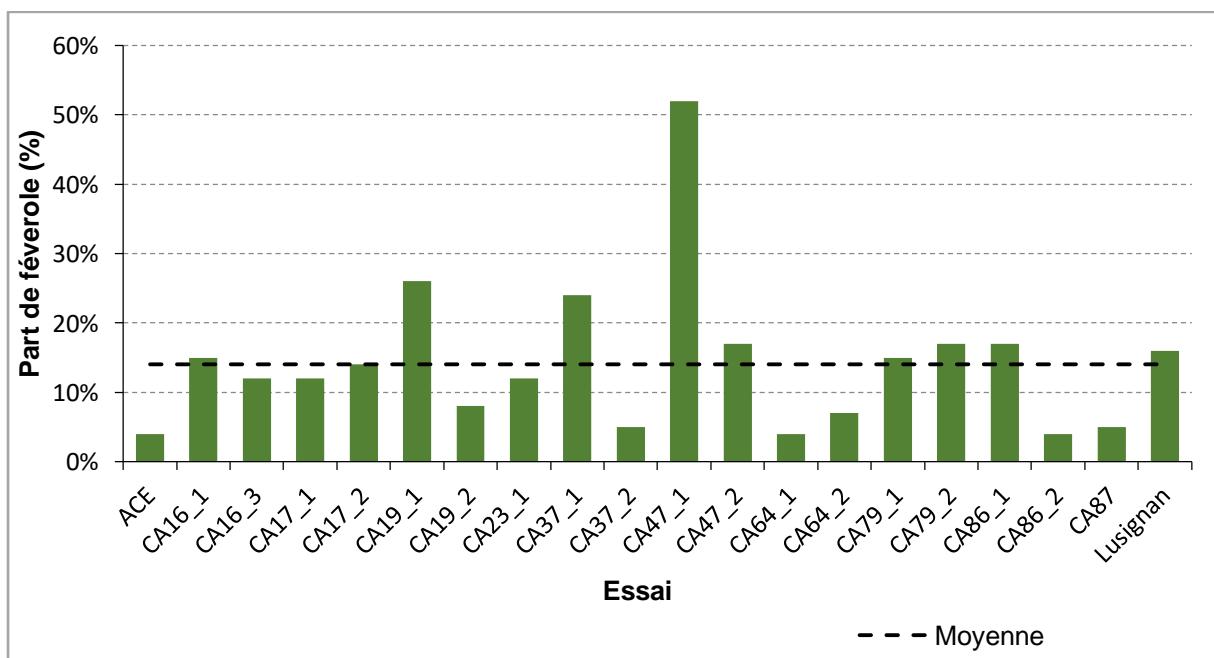


Figure 22 : Part moyenne de féverole dans les associations pour chaque essai en % de la biomasse sèche totale (n=20)

RESULTATS

1. Rendements hétérogènes influencés par de nombreux facteurs

1.1. Rendement des CIVE

Tout d'abord, les résultats montrent une augmentation du rendement de toutes les céréales pures ou associées selon le niveau de fertilisation (figure 21). Ainsi, le rendement du triticale pur passe de 5,5 tMS/ha sans fertilisation azotée à 7,9 tMS/ha pour la dose X, tandis que celui du triticale/féverole passe de 6,2 à 7,7 tMS/ha. L'ANOVA (annexe 4) confirme l'effet de la fertilisation azotée sur le rendement ($p\text{-value}=8,4 \cdot 10^{-6}$) et met en évidence que les rendements des doses X et X/2 sont significativement supérieurs au rendement de la dose 0. Cependant, aucune différence n'est mise en évidence entre les doses X/2 et X, ce qui peut être dû à l'hétérogénéité de ces doses entre les sites d'essais.

Ensuite, les associations présentent des rendements supérieurs aux céréales pures en absence de fertilisation azotée puisque le rendement des associations seigle/féverole et triticale/féverole sont respectivement supérieurs de 0,9 tMS/ha et 0,6 tMS/ha au rendement du seigle et du triticale purs (figure 21). Malgré ces observations, l'ANOVA (annexe 4) ne met pas en évidence de différences significatives de rendement entre les CIVE ($p\text{-value}=0,192$), et les écarts-types des rendements présentés sur la figure 21 soulignent la forte hétérogénéité de rendement entre les sites d'essais.

Puis, avec l'augmentation de la fertilisation azotée, l'écart observé sans fertilisation se réduit et devient nul pour la dose X, les rendements des associations et des céréales pures tendent à être équivalents. En moyenne, sans fertilisation, les associations ont un rendement supérieur de 18 % à celui des céréales pures ; pour la dose X/2, leur rendement est supérieur de 8 % ; tandis que pour la dose X, il est supérieur de 1 % uniquement.

De plus, l'association seigle/féverole semble permettre de produire une biomasse équivalente au seigle pur avec une quantité d'azote moins importante. En effet, le rendement du seigle/féverole avec la dose X/2 est de 6,8 tMS/ha alors que celui du seigle pur avec la dose X est de 6,9 tMS/ha en moyenne (figure 21).

Par ailleurs, le triticale présente des rendements supérieurs au seigle quel que soit le niveau de fertilisation considéré. Cette différence de rendement peut s'expliquer par la différence de précocité d'une dizaine de jours qui a été constatée entre ces deux espèces sur tous les essais, le triticale étant plus précoce que le seigle.

1.2. Hétérogénéité de présence de féverole selon les essais

Malgré une même densité de semis sur tous les essais, le rendement de la féverole est également hétérogène selon les essais et est globalement faible. En effet, le rendement moyen sur l'ensemble des essais est de 1 tMS/ha mais sur neuf essais celui-ci ne dépasse pas 0,5 tMS/ha tandis que sur un essai, il atteint plus de 6 tMS/ha. Aucun des facteurs étudiés ne semble avoir un impact significatif sur le rendement de la féverole.

La féverole représente en moyenne 14 % du rendement des associations. Sur trois essais (CA19_1, CA37_1 et CA47_1), elle représente plus de 20 % du rendement des associations tandis que sur cinq essais (ACE, CA37_2, CA64_1, CA86_2 et CA87), elle ne dépasse pas 5 % du rendement des associations (figure 22). L'étude des rendements dans ces deux situations révèle des disparités.

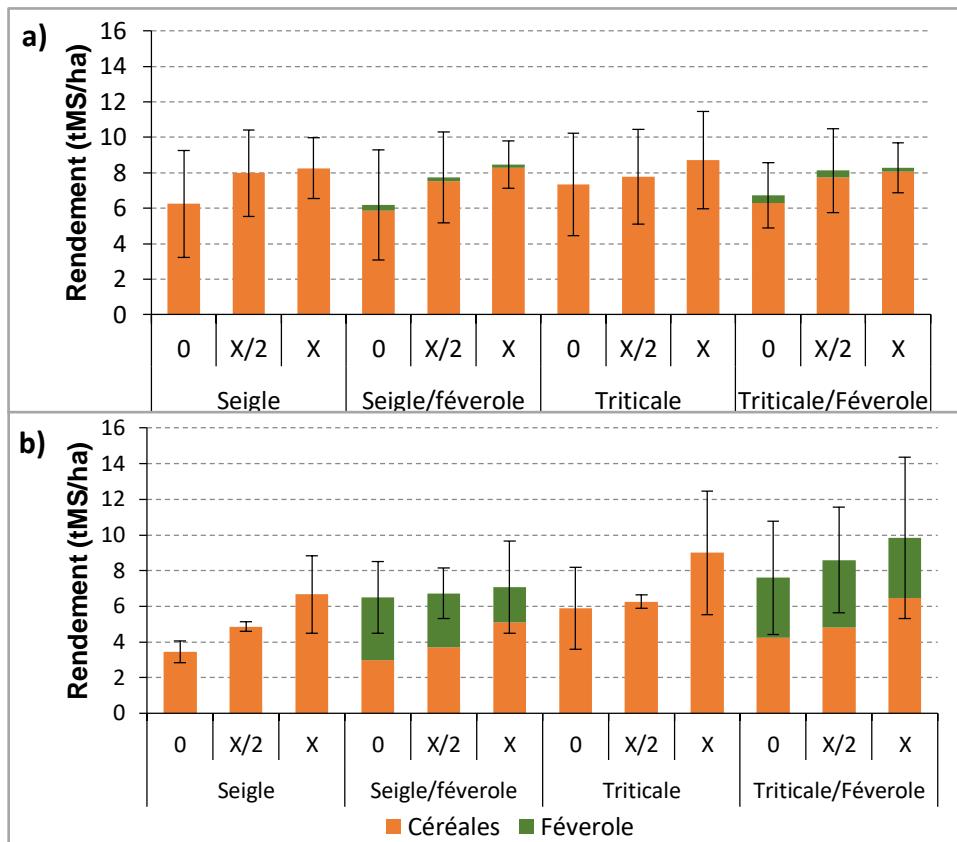


Figure 23 : Rendement en tMS/ha et écart-types des CIVE quand a) la part de féverole est inférieure ou égale à 5 % (n=5), et quand b) la part de féverole est supérieure à 20 % (n=3)

a) Dose X/2 comprise entre 35 et 80 kg N/ha ; Dose X comprise entre 70 et 160 kg N/ha

b) Dose X/2 comprise entre 30 et 50 kg N/ha ; Dose X comprise entre 60 et 100 kg N/ha

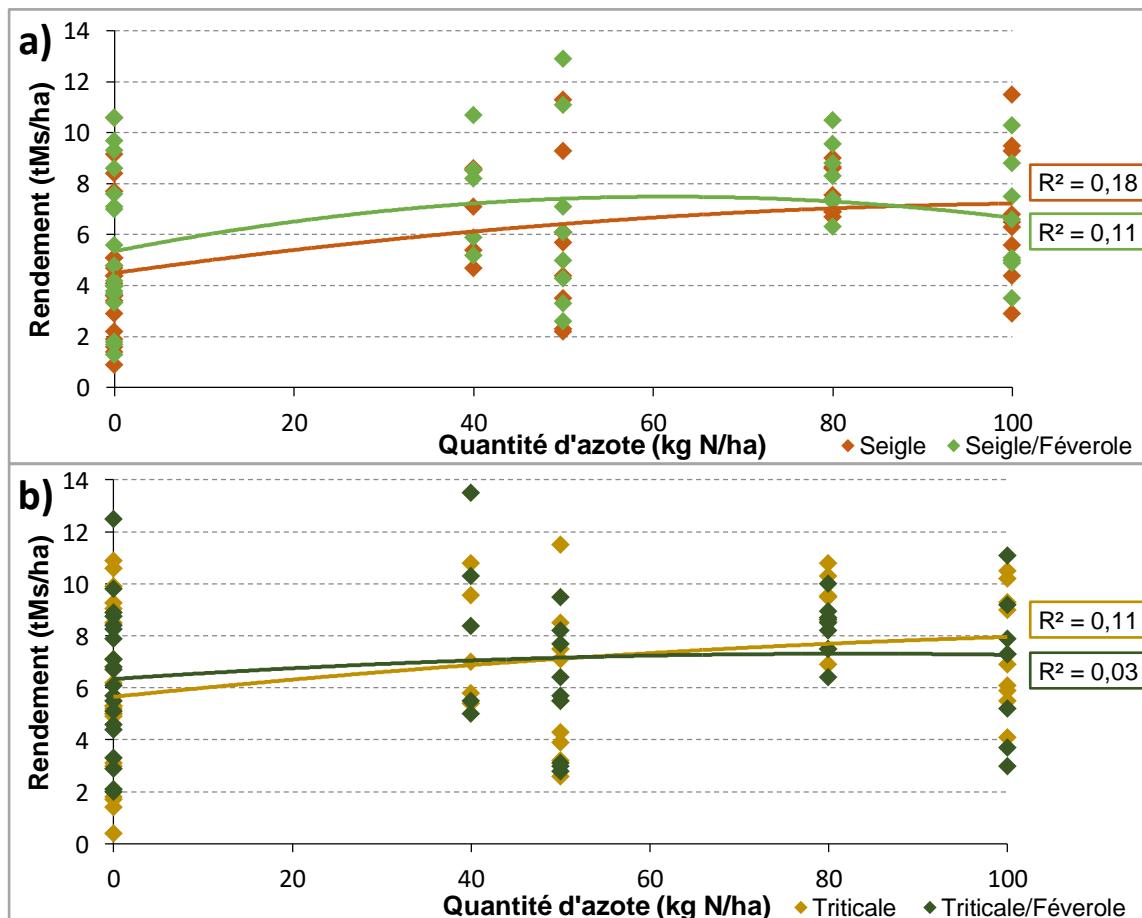


Figure 24 : Rendement en tMS/ha du a) seigle et seigle/féverole et du b) triticale et triticale/féverole selon la quantité d'azote apportée (n=20)

Sur les cinq essais avec une part de féverole inférieure ou égale à 5 %, le rendement tend à être équivalent entre les céréales pures et associées quel que soit le niveau de fertilisation azotée (figure 23). Même en absence de fertilisation azotée, les associations ne permettent pas de produire plus que les céréales pures, le rendement étant constitué presque exclusivement de céréales. De plus, ces essais ont des rendements plus élevés que la moyenne de l'ensemble des essais, et ce même sans fertilisation azotée, puisque les rendements sont compris entre 6 et 8,5 tMS/ha selon les modalités. Sur ces essais, l'intérêt des associations céréale/féverole est donc limité en termes de rendement mais elles peuvent potentiellement apporter d'autres intérêts écosystémiques.

Sur les trois essais avec une part de féverole dans les associations supérieure à 20 %, les associations atteignent des rendements supérieurs aux céréales pures en absence de fertilisation et pour la dose X/2 (figure 23). De plus, le rendement du seigle/féverole sans fertilisation azotée est équivalent à celui du seigle pur fertilisé tandis que le triticale/féverole fertilisé à la dose X/2 a un rendement équivalent à celui du triticale fertilisé avec la dose X. Une réduction de la fertilisation azotée semble donc possible. Néanmoins, ces résultats sont issus seulement de trois essais avec des parts de féverole assez différentes puisque pour deux essais (CA19_1 et CA37_1) elle est d'environ 25 % et pour un essai (CA47_1) elle est de plus de 50 % (figure 22).

1.3. Facteurs influençant le rendement

1.3.1. *Impact de la fertilisation*

L'étude du rendement des CIVE selon la dose d'azote apportée en kg N/ha met en évidence une forte hétérogénéité des rendements pour un même niveau de fertilisation (figure 24). Sans fertilisation azotée, les rendements les plus faibles sont d'environ 1 tMS/ha tandis que les plus élevés atteignent plus de 10 tMS/ha. De même, avec un apport de 50 kg N/ha, les rendements sont compris entre 2 et plus de 12 tMS/ha. Cette forte hétérogénéité peut être expliquée par l'effet « site d'essai » qui peut avoir diverses origines telles que la date de semis, le type de sol et le climat qui seront étudiés ensuite.

Malgré une représentativité limitée des courbes de tendances (faible R²) due à cette forte hétérogénéité entre sites d'essai, ces résultats permettent d'identifier des dynamiques de réponse à l'azote différentes selon les CIVE.

Ainsi, pour les céréales pures, plus la dose d'azote augmente plus le rendement de la CIVE tend à augmenter. Le seigle et le triticale présentent respectivement des rendements moyens de 4,5 et 5,5 tMS/ha sans fertilisation et atteignent 7 et 8 tMS/ha avec un apport de 100 kg N/ha.

Au contraire, le rendement des associations céréale/féverole n'augmente pas toujours avec l'augmentation de la dose d'azote. A partir d'une certaine dose d'azote apportée, le rendement plafonne puis décroît. Ainsi, le rendement du seigle/féverole passe de 5,5 tMS/ha sans fertilisation azotée à 7,5 tMS/ha avec 60 kg N/ha puis décroît pour atteindre 6,5 tMS/ha avec 100 kg N/ha. De même, le triticale/féverole atteint un rendement maximal d'environ 7 tMS/ha avec un apport de 60 kg N/ha puis stagne.

De plus, les résultats montrent que l'association seigle/féverole permet, avec 60 kg N/ha, d'atteindre un rendement équivalent au seigle pur fertilisé avec 100 kg N/ha, ce qui semble offrir une possibilité de réduction de la fertilisation azotée grâce à l'association seigle/féverole. Par contre, l'association triticale/féverole ne permet pas d'atteindre un rendement équivalent au triticale pur avec un apport d'azote réduit.

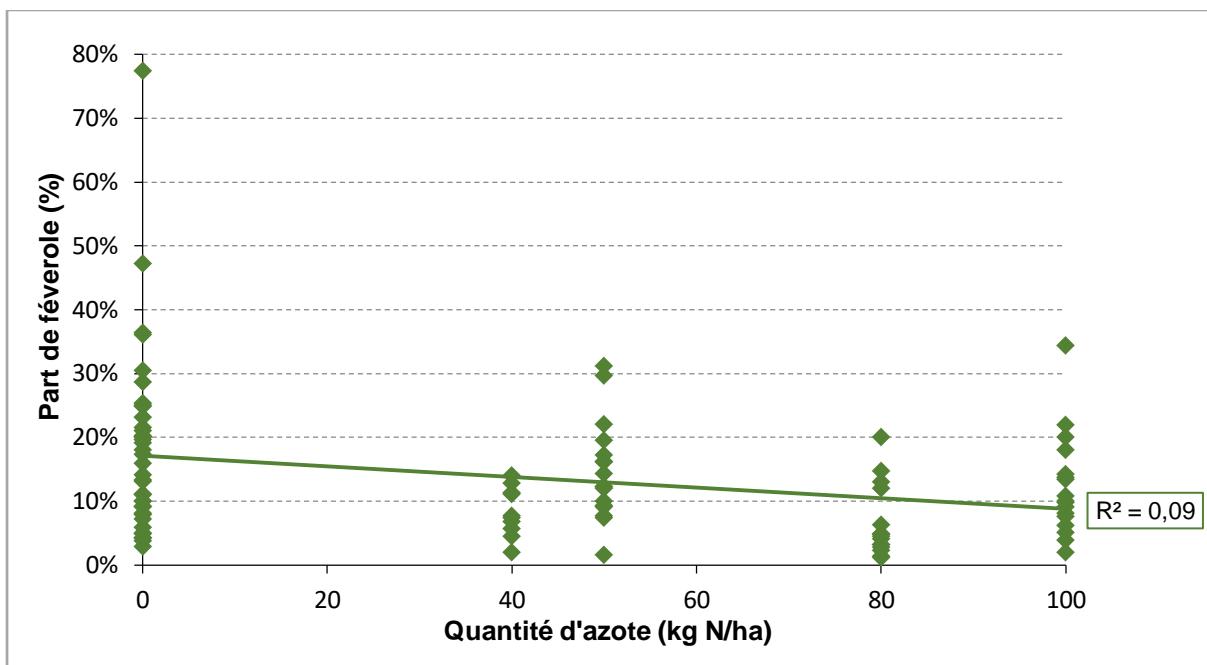


Figure 25 : Part de féverole dans les associations en % de la biomasse sèche en fonction de la quantité d'azote apportée (n=20)

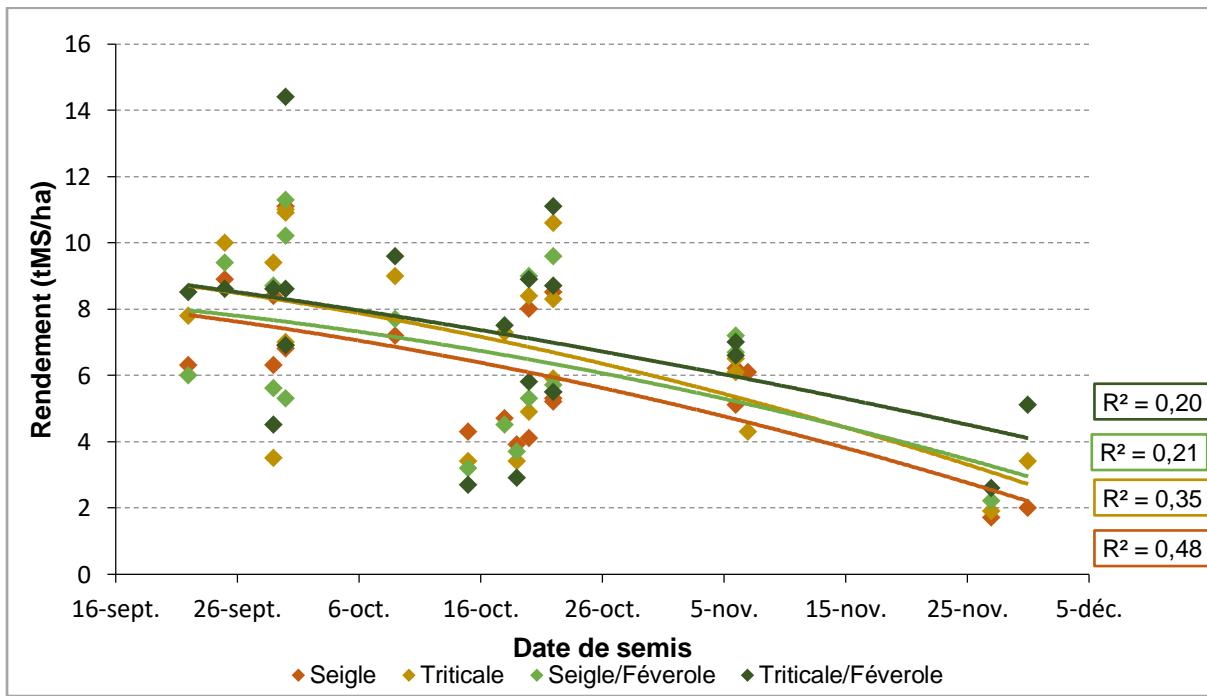


Figure 26 : Rendement en tMS/ha des CIVE selon la date de semis toutes doses d'azote confondues (n=20)

Enfin, les résultats montrent que le rendement de la féverole tend à être stable quelle que soit la dose d'azote apportée mais que la part de féverole dans les mélanges a tendance à diminuer avec l'augmentation de la dose d'azote. Celle-ci est en moyenne de 17 % sans fertilisation azotée et n'est que de 9 % avec un apport de 100 kg N/ha (figure 25). Bien que la représentativité de ces résultats soit tout de même plutôt faible puisque la part de féverole est faible sur la majorité des essais, l'augmentation du rendement des associations qui est observée lorsque la fertilisation azotée augmente est donc due à l'augmentation du rendement de la céréale et non de celui de la féverole.

1.3.2. Impact de la date de semis

Selon les essais, la date de semis des CIVE est différente et s'étale du 22/09/2020 au 30/11/2020. Cela permet d'identifier l'impact de la date de semis sur le rendement des quatre modalités de CIVE testées. Ces résultats montrent que, tous niveaux de fertilisation confondus, plus le semis est tardif plus le rendement des CIVE diminue quelle que soit l'espèce. Ainsi, mi-septembre, les rendements moyens sont compris entre 7 et 8,5 tMS/ha, mi-octobre, ils sont de l'ordre de 6 à 7,5 tMS/ha tandis que fin novembre, ils sont compris entre 2 et 4 tMS/ha (figure 26). De plus, en semis précoce (mi-septembre à mi-octobre), les associations céréale/féverole semblent présenter des rendements équivalents aux céréales pures tandis que pour les semis plus tardifs (novembre), les associations ont des rendements qui semblent supérieurs aux céréales pures. Toutefois, la significativité de ces résultats est limitée, étant donné l'hétérogénéité entre les essais, les coefficients de détermination (R^2) sont faibles.

Pour un même niveau de fertilisation azotée, cette diminution du rendement est également observée. Elle est moins importante avec fertilisation que sans, la fertilisation permettant probablement de réduire en partie la diminution du potentiel de rendement observée sur les semis plus tardifs.

Les espèces testées dans le cadre de ces essais semblent donc adaptées pour des semis entre la mi-septembre et la mi-octobre plutôt que pour les semis de novembre. La majorité des essais a d'ailleurs été semée entre la mi-septembre et la mi-octobre, puisque seulement quatre essais ont été semés au mois de novembre. Néanmoins, une hétérogénéité importante des rendements est observée pour ces semis de début d'automne, le rendement est donc influencé par d'autres facteurs.

Par ailleurs, aucun impact de la date de semis sur la présence de féverole dans les essais n'a été identifié à partir de ces résultats.

1.3.3. Impact de la date de récolte

De même, les dates de récolte sont différentes selon les essais. Elles vont du 14/04/2021 au 28/05/2021. Les résultats montrent que les récoltes les plus tardives ne présentent pas des rendements plus élevés que les récoltes précoces. En effet, cela s'explique par le fait que les récoltes les plus tardives ont lieu sur les essais qui ont été semés tardivement. Une récolte tardive ne permet pas de rattraper les pertes de rendements liées à un semis tardif.

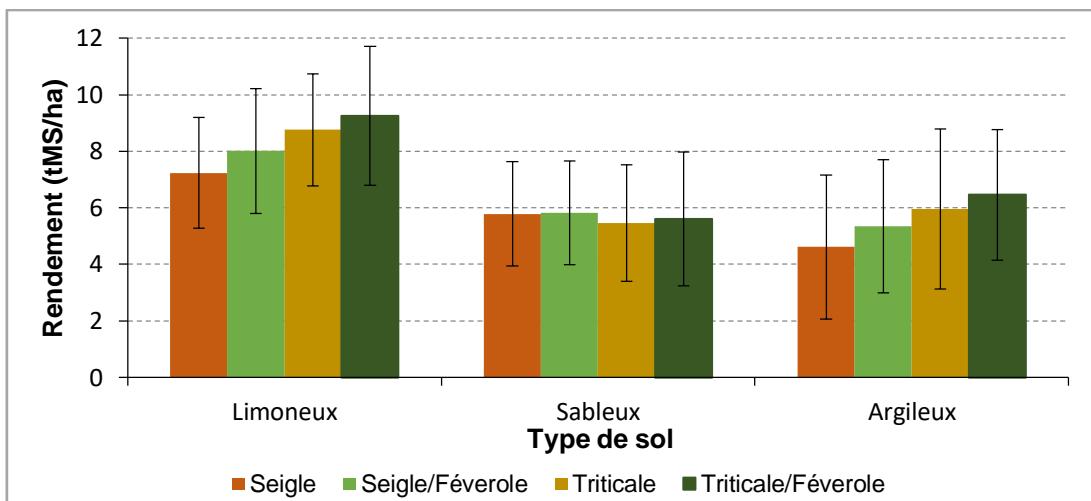


Figure 27 : Rendement moyen des CIVE en tMS/ha selon le type de sol, tous niveaux de fertilisation confondus (n=20)

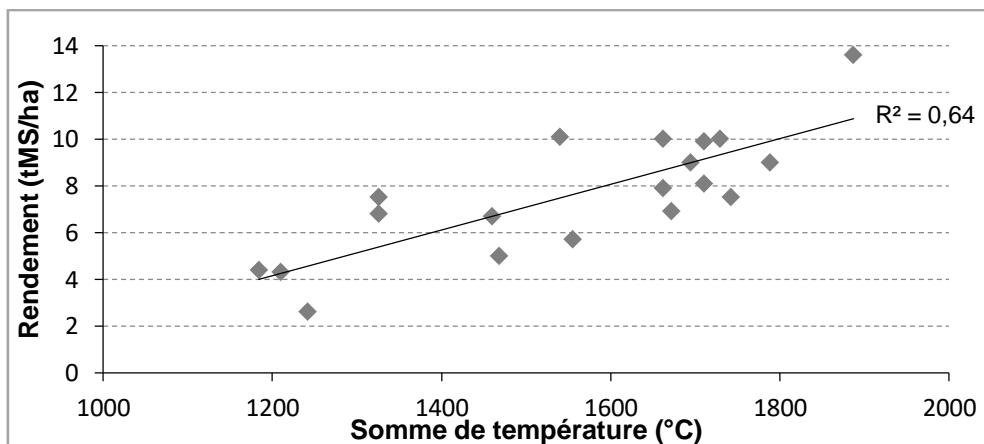


Figure 28 : Rendement moyen des CIVE en tMS/ha sur chaque essai pour la dose X de fertilisation azotée selon la somme de température accumulée entre le semis et le 21 avril 2021 (n=20)

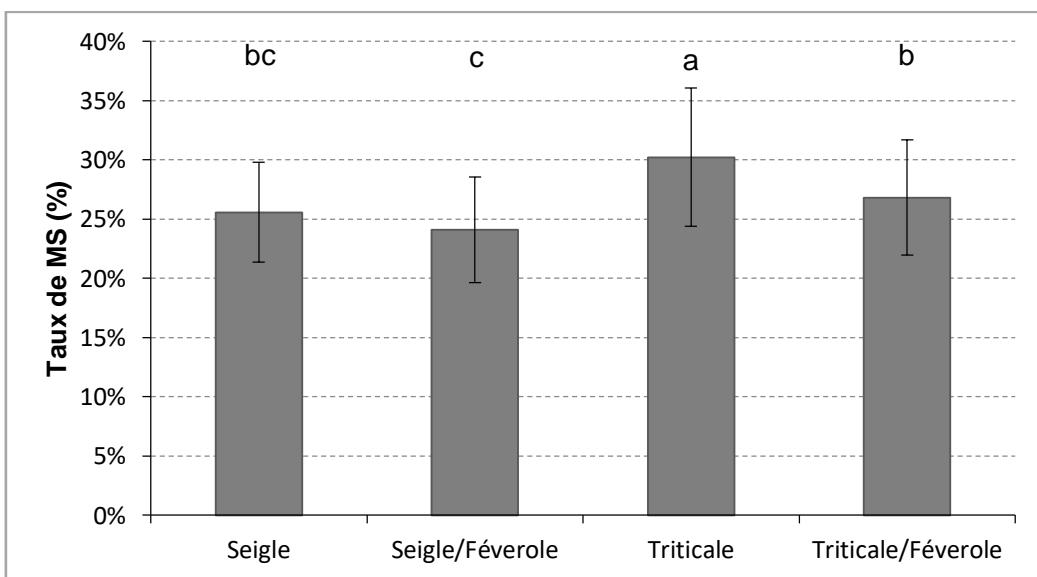


Figure 29 : Taux de MS moyen des CIVE observé sur l'ensemble des essais, tous niveaux de fertilisation azotée confondus (n=20)

Test statistique de Wilcoxon (comparaison de rangs). Les valeurs avec des lettres différentes sont significativement différentes ; au contraire quand les lettres sont similaires les valeurs sont équivalentes.

1.3.4. Impact du type de sol

Le type de sol impacte le rendement des CIVE et est un facteur en partie explicatif de l'hétérogénéité des rendements observée entre les essais. Ainsi, en moyenne, les rendements des CIVE tendent à être plus élevés sur les sols limoneux (7,2 à 9,3 tMS/ha) que sur les sols sableux (5,5 à 5,8 tMS/ha) et argileux (4,6 à 6,5 tMS/ha) (figure 27). De plus, en sols limoneux et argileux, le triticale semble être plus productif que le seigle et les associations céréale/féverole tendent à atteindre un rendement plus élevé que les céréales pures (figure 27). Au contraire, en sols sableux, les différences entre CIVE sont très faibles, toutes les CIVE ont un rendement équivalent.

Enfin, le type de sol ne permet pas d'expliquer la présence de féverole sur les différents essais. Aucun type de sol ne présente une part de féverole plus importante que les autres.

1.3.5. Impact du climat

L'étude des données météorologiques met en évidence un impact de la somme de température sur le rendement des CIVE. En effet, plus la somme de température accumulée par les CIVE du semis au 21/04/2021 augmente, plus le rendement des CIVE est élevé (figure 28). Cette observation est faite pour toutes les modalités de CIVE ou de fertilisation. Ces résultats sont cohérents avec les résultats observés pour la date de semis puisque les CIVE ayant accumulé les plus grandes sommes de température sont les CIVE qui ont été semées le plus précocement.

Aucun impact de la somme de température sur le rendement de la féverole n'est mis en évidence. De même, la pluviométrie du semis au 21/04/2021 ne permet pas d'expliquer les variations du rendement des CIVE entre les essais, ni de celui de la féverole.

2. Taux de MS et préfanage

2.1. Différences de taux de MS entre CIVE

Les résultats mettent en évidence des différences de taux de MS entre les CIVE grâce au test de Kruskal-Wallis ($p\text{-value}=1,6 \cdot 10^{-7}$) (annexe 5). D'une part, le taux de MS du triticale, en moyenne 30 %, est significativement supérieur à celui du seigle qui est de 26 % en moyenne (figure 29). Cela s'explique par la différence de stade observée entre les deux céréales, le triticale étant plus précoce que le seigle d'une dizaine de jours. D'autre part, les associations céréale/féverole ont des taux de MS inférieurs à ceux des céréales pures. Ainsi, le triticale/féverole a un taux de MS moyen de 27 % qui est significativement inférieur à celui du triticale pur tandis que le seigle/féverole possède un taux de MS de 24 % qui n'est pas significativement différent de celui du seigle pur (figure 29). Le taux de MS plus faible des associations s'explique par la présence de la féverole qui, prise seule, a un taux de MS moyen de 18 %. La féverole est présente en proportion similaire dans les deux associations, 14 % de la biomasse sèche en moyenne. Pour une même part de féverole, la réduction du taux de MS est donc d'autant plus marquée lorsque la différence de taux de MS entre la céréale et la féverole est importante comme c'est le cas entre le triticale et la féverole.

Aucun impact de la part de féverole dans les associations sur le taux de MS n'est mis en évidence étant donné la part de féverole majoritairement faible sur l'ensemble des essais. Néanmoins, sur les trois essais où la part de féverole est supérieure à 20 %, les différences de taux de MS sont plus importantes : le taux de MS moyen du seigle est de 30 % alors que celui de l'association seigle/féverole est de 24 %, et le taux de MS du triticale est de 35 % tandis que celui du triticale/féverole est de 26 %. Plus la part de féverole dans l'association est grande, plus le taux de MS de la CIVE semble donc diminuer.

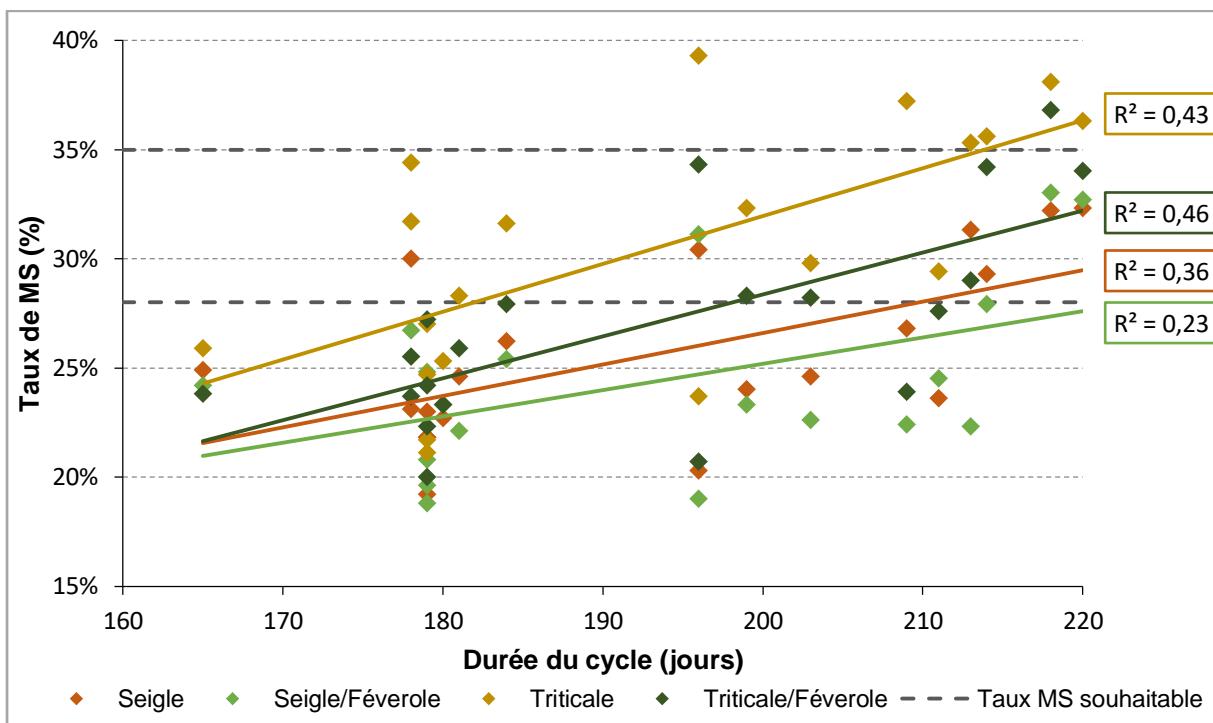


Figure 30 : Taux de MS des CIVE selon la durée du cycle de la CIVE (n=20)

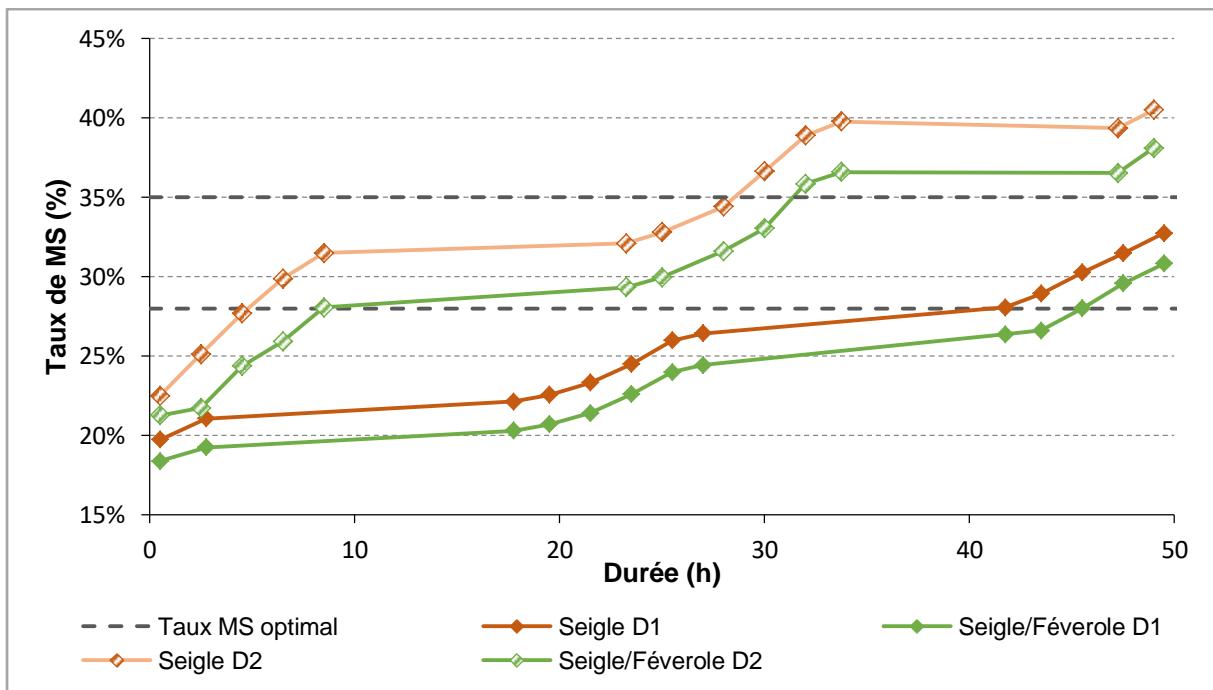


Figure 31 : Taux de MS du seigle et de l'association seigle/féverole en fonction de la durée de séchage à deux dates de fauche (D1 : 21 au 23/04/2021 et D2 : 27 au 29/04/2021)

Ensuite, comme attendu, le taux de MS est impacté par la durée du cycle de la culture. Plus la récolte intervient tardivement dans le cycle de la CIVE, plus le taux de MS a tendance à être important, que ce soit pour les céréales pures ou les associations (figure 30) (R^2 faibles). Par exemple, le taux de MS de l'association triticale/féverole passe d'en moyenne 25 % pour un cycle de 180 jours à 30 % au bout de 210 jours.

Pour atteindre un taux de MS de 28 à 35 %, souhaitable pour la récolte en ensilage, un préfanage peut être nécessaire notamment pour les récoltes précoces. En effet, pour les récoltes avant 180 jours de durée du cycle, le taux de MS se situe entre 20 et 27 % de MS pour toutes les CIVE hormis le triticale qui, dans certains cas, tend à avoir un taux de MS légèrement supérieur (figure 30). Le préfanage semble donc nécessaire aussi bien pour les céréales pures que pour les céréales associées à la féverole. Puis, entre 180 et 200 jours, le triticale atteint un taux de MS optimal pour la récolte et pourrait être récolté sans préfanage (figure 30). Les autres CIVE ont encore un taux de MS inférieur à l'optimum et devraient être récoltées avec préfanage. Enfin, au-delà de 200 jours, triticale/féverole et seigle semblent pouvoir être récoltés sans préfanage contrairement au seigle/féverole qui présente toujours un taux de MS plus faible. Quant au triticale, il atteint parfois un taux de MS supérieur au taux souhaitable.

2.2. Intérêt du préfanage

Les résultats montrent, tout d'abord, qu'au moment de la fauche, l'association seigle/féverole est plus humide que le seigle pur (figure 31). En effet, pour la première répétition (D1) ayant eu lieu du 21 au 23 avril, le taux de MS de l'association est de 18,4 % tandis que celui du seigle pur est de 19,7 %. Ce même écart est observé lors de la deuxième répétition (D2) effectuée du 27 au 29 avril. De plus, les taux de MS observés pour D2 sont supérieurs à ceux de D1 ce qui s'explique par l'avancée des stades des CIVE.

Ensuite, au cours de la phase de séchage, l'écart observé au moment de la fauche tend à se conserver. En effet, les courbes d'évolution du taux de MS au cours du temps pour une même date suivent la même dynamique (figure 31). Cela est confirmé par la vitesse d'augmentation du taux de MS : pour D1, elle est de 0,25 points/h pour le seigle pur et de 0,24 points/h pour l'association, et pour D2, elle est de 0,33 points/h. Pour une même date de fauche, la dynamique de séchage entre l'association seigle/féverole et le seigle pur est donc similaire. Néanmoins, des différences de séchage existent entre les dates de fauche. Lors de D1, le séchage est lent lors des premières heures de séchage tandis que pour D2, le séchage est très rapide dès la fauche de la CIVE. L'étude des données météorologiques (température, rayonnement global et vent) ne permet pas d'expliquer la différence de séchage des CIVE entre les deux dates. Celle-ci pourrait alors s'expliquer par le moment de fauche différent entre les deux dates. Pour rappel, lors de D1, les CIVE ont été fauchées à 15 h tandis que lors de D2, elles ont été fauchées à 10 h. La fauche qui a lieu plus tôt dans la journée a permis de sécher plus rapidement les CIVE.

Puisque l'association est plus humide lors de la fauche et que la dynamique de séchage est similaire à celle du seigle pur, l'association seigle/féverole atteint plus tardivement le taux de MS souhaitable pour la récolte (28 à 35 % de MS) (figure 31). Pour D1, ce taux est atteint au bout de 42 heures de séchage pour le seigle pur contre 46 heures pour l'association seigle/féverole. Pour D2, un écart de 3 heures est observé entre les deux modalités, le taux de MS est atteint en 5 heures pour le seigle pur contre 8 heures pour l'association. La présence de féverole nécessite donc d'allonger la durée du préfanage de quelques heures par rapport au seigle pur pour parvenir à un même taux de MS.

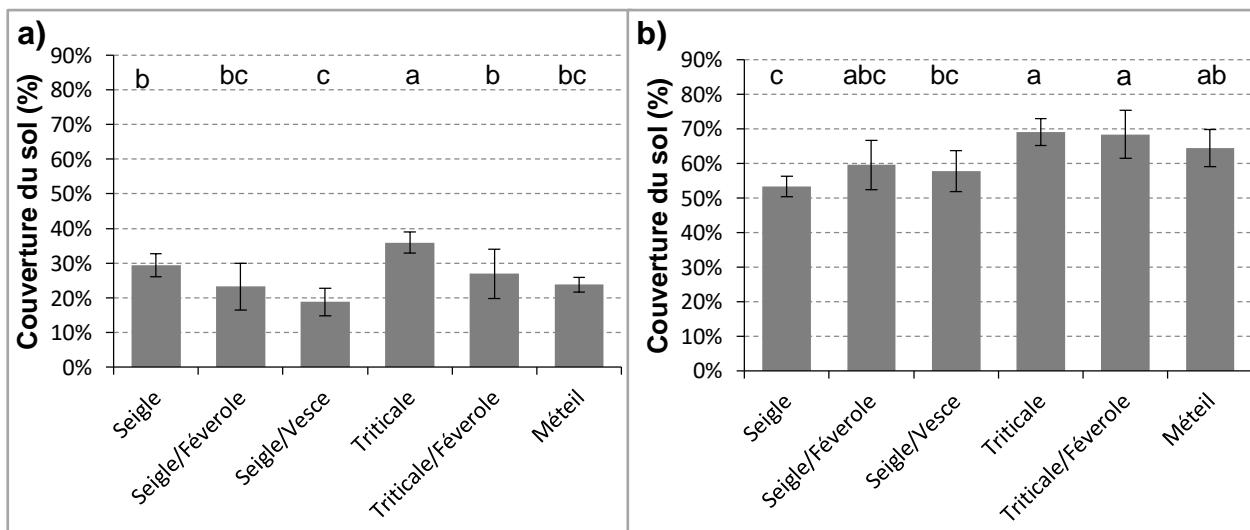


Figure 32 : Taux de couverture du sol par les CIVE sur l'essai en micro-parcelles de Lusignan a) le 20/11/2020 et le b) 16/02/2021

Test statistique de Newman-Keuls (comparaison de moyennes). Les valeurs avec des lettres différentes sont significativement différentes ; au contraire quand les lettres sont similaires les valeurs sont équivalentes.

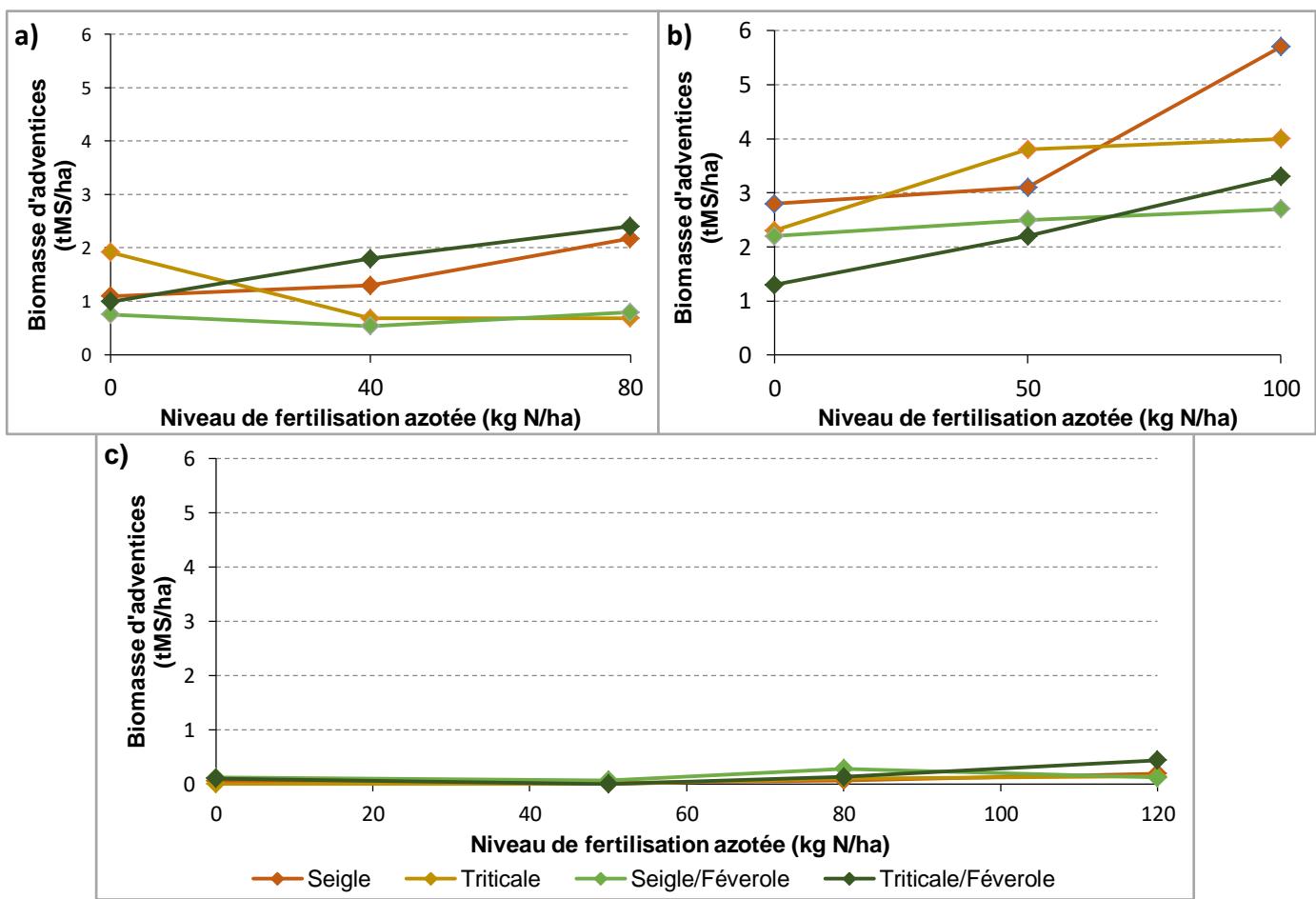


Figure 33 : Biomasse d'adventices en tMS/ha à la récolte des CIVE selon le niveau de fertilisation azotée sur les essais a) CA86_1, b) CA37_1 et c) Lusignan

3. Impact limité des associations sur les adventices

3.1. Couverture du sol au cours du cycle

Les résultats des mesures de la couverture du sol par les CIVE sur l'essai en micro-parcelles de Lusignan mettent en évidence des différences entre les CIVE au cours de leur cycle. Ainsi, le 20/11/2020, soit 41 jours après le semis, l'ANOVA (annexe 6) montre que la couverture du sol par les céréales pures tend à être meilleure que celle des céréales associées aux légumineuses (figure 32, a) ($p\text{-value}=9,3.10^{-5}$). Le triticale est l'espèce qui couvre le mieux le sol avec un taux de couverture du sol de 36 % alors que l'association triticale/féverole couvre 27 % du sol. Les différences entre seigle pur ou associé à la féverole sont moins importantes que pour le triticale.

Sur les deux autres essais où ces mesures ont été réalisées, aucune différence entre CIVE n'est observée.

En sortie d'hiver, le 16/02/2021, soit 127 jours après le semis, les résultats de l'ANOVA (annexe 6) montrent que la couverture du sol des associations est équivalente voire supérieure à celle des céréales pures (figure 32, b) ($p\text{-value}=3,9.10^{-4}$). Le retard de couverture du sol que les associations présentaient à l'automne n'est plus observé en sortie d'hiver. Triticale et triticale/féverole sont les CIVE qui couvrent le plus le sol avec respectivement 69 % et 68 % de couverture du sol tandis que le seigle est l'espèce qui présente la plus faible couverture du sol avec 53 %.

3.2. Biomasse d'adventices à la récolte

Sur la majorité des essais, la présence d'adventices était très faible et la biomasse d'adventices à la récolte n'a pas été mesurée. Aucune différence visuelle n'a été constatée entre les céréales pures et les associations céréale/féverole sur tous ces essais. Les associations ne permettent donc pas une meilleure régulation des adventices que les céréales pures.

Cependant, cette affirmation n'est pas toujours vérifiée sur les trois essais sur lesquels la biomasse d'adventices à la récolte a été mesurée. Les différences observées entre céréales pures et céréale/féverole varient : la biomasse d'adventices dans les associations peut être inférieure ou supérieure à celles des céréales pures.

Sur l'essai CA37_1, qui présentait une biomasse importante de vulpin, les associations ont des biomasses d'adventices plus faibles que les céréales pures quel que soit le niveau de fertilisation azotée (figure 33, b). Ainsi, tous niveaux d'azote confondus, l'association seigle/féverole a en moyenne permis de réduire de 1,5 tMS/ha la biomasse d'adventices par rapport au seigle pur. Cette réduction est de 1,1 tMS/ha pour le triticale/féverole par rapport au triticale pur.

Sur l'essai CA86_1, où le ray-grass était très présent, l'association seigle/féverole présente également une biomasse d'adventices inférieure au seigle pur, et ce d'autant plus que la fertilisation azotée augmente (figure 33, a). Au contraire, l'association triticale/féverole présente une biomasse d'adventices plus élevée que le triticale pur, et cela est amplifié en présence de fertilisation azotée.

Enfin, sur l'essai de Lusignan, les associations semblent avoir une biomasse d'adventices plus importante que les céréales pures quel que soit le niveau de fertilisation azotée (figure 33, c). Néanmoins, celle-ci reste très faible et les différences observées résultent principalement de la présence ponctuelle d'adventices (chardon, stellaire) liée à l'échantillonnage des prélèvements, les adventices n'étant pas réparties de façon homogène sur la parcelle.

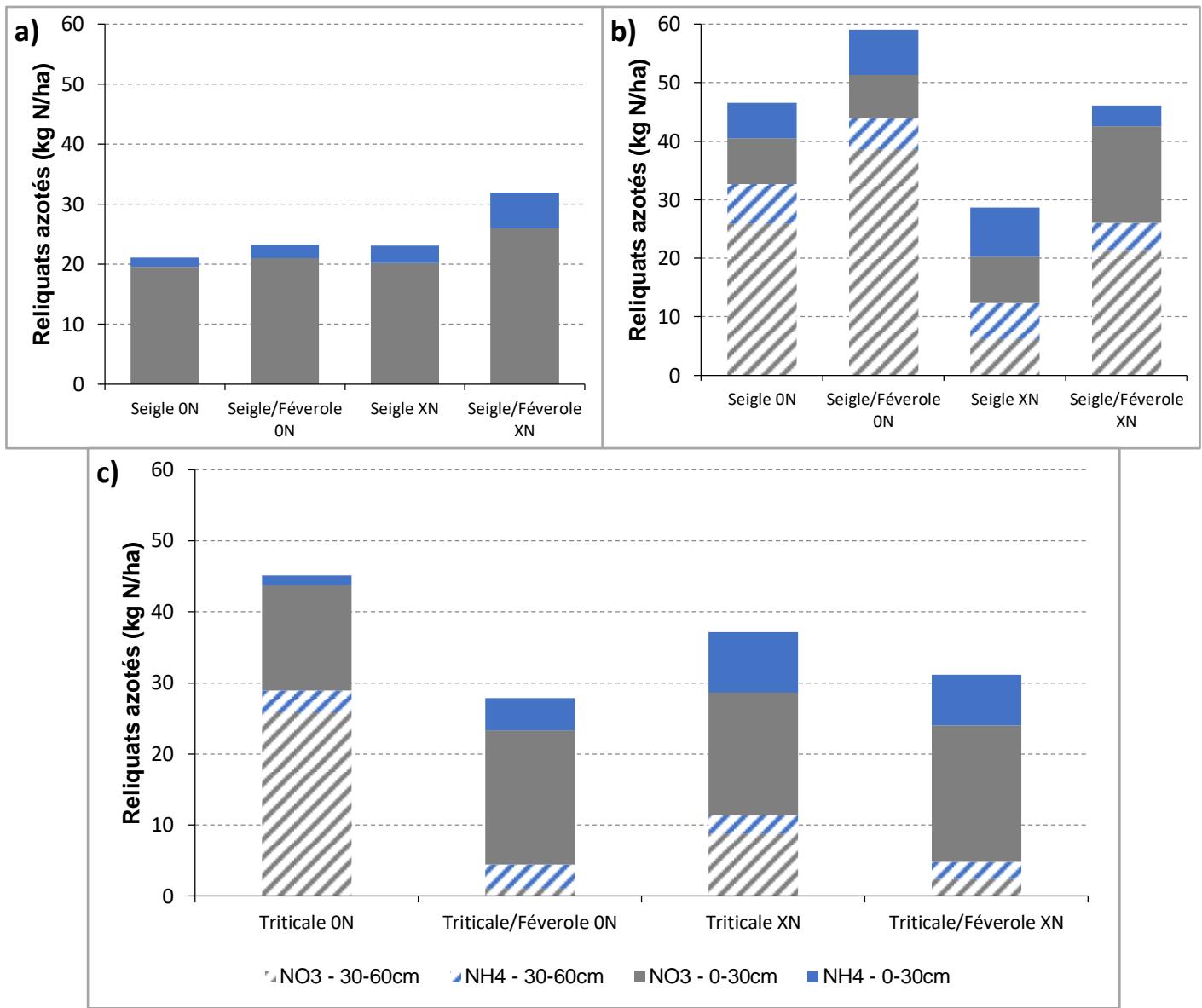


Figure 34 : Reliquats azotés en kg N/ha à la récolte des CIVE dans les horizons 0-30 cm et 30-60 cm du sol sur les essais a) CA86_2, b) CA47_1 et c) Lusignan
a) Dose X = 160 kg N/ha ; b) Dose X = 60 kg N/ha ; c) Dose X = 120 kg N/ha

Par ailleurs, sur ces trois essais, la fertilisation semble avoir un impact sur la biomasse d'adventices. En effet, la biomasse d'adventices augmente quand la fertilisation azotée augmente (figure 33). Cette observation est cohérente, l'apport de fertilisation azotée ne profite pas uniquement aux CIVE mais est également valorisé par les adventices.

4. Impact peu favorable des associations sur l'état du sol à la récolte

4.1. Impact sur les reliquats azotés

L'étude des reliquats azotés à la récolte des CIVE sur trois essais met en évidence des résultats variables selon les essais (figure 34).

Sur l'essai CA86_2, les reliquats azotés mesurés après l'association seigle/féverole sont équivalents aux reliquats azotés observés après le seigle pur, que ce soit avec la dose 0 ou la dose X de fertilisation azotée (figure 34, a). Cette absence de différence peut s'expliquer par la très faible présence de féverole. En effet, la féverole représente, en moyenne, seulement 4 % du rendement de l'association seigle/féverole ce qui ne permet pas de mettre en évidence son impact sur les reliquats azotés. Des résultats similaires sont visibles sur les essais ACE, CA86_1 et CA87 (non présentés ici). Par ailleurs, sur cet essai, bien que les doses de fertilisation soient très différentes (dose X = 160 kg N/ha), les reliquats azotés observés après celles-ci sont équivalents. L'apport de 160 kg N/ha d'azote semble donc avoir été totalement valorisé par le seigle, cela est confirmé par sa teneur en azote (partie aérienne) de 2,3 % qui est supérieure à celle du seigle sans fertilisation (1,2 %).

Ensuite, sur l'essai CA47_1, les reliquats azotés observés après l'association seigle/féverole sont supérieurs, de 12 à 18 kg N/ha, à ceux mesurés après le seigle pur (figure 34, b). Sur cet essai, la présence de féverole est bien plus importante que sur l'essai précédent puisqu'elle représente en moyenne 52 % du rendement des associations. En absence de fertilisation, la différence de reliquats azotés observée peut s'expliquer par le fait qu'au sein de l'association seigle/féverole, le rendement du seigle est inférieur à celui du seigle pur et qu'il a donc probablement prélevé moins d'azote du sol. En supposant que la féverole ait majoritairement mobilisé de l'azote issu de la fixation atmosphérique, il en résulte logiquement un stock d'azote dans le sol à la récolte supérieur pour l'association seigle/féverole. Cependant, pour la dose X de fertilisation, les exportations en azote du seigle pur et du seigle en association sont équivalentes ce qui ne permet pas d'expliquer la différence observée. La différence peut aussi être expliquée par des restitutions d'azote issues des racines et des feuilles sénescentes de la féverole, bien que cela semble peu probable pour une telle différence, d'autant plus qu'elle se fait majoritairement dans l'horizon 30-60 cm du sol. Toutefois, sur cet essai, bien que les explications nécessitent d'être affinées, la disponibilité du sol en azote pour la culture suivante semble être améliorée suite à l'association seigle/féverole.

Enfin, sur l'essai de Lusignan, avec une part de féverole représentant 16 % du rendement des associations, il serait cohérent de s'attendre à des résultats intermédiaires aux deux essais précédents. Cependant, les reliquats azotés à la récolte de l'association triticale/féverole sont inférieurs à équivalents à ceux du triticale pur (figure 34, c). En absence de fertilisation azotée, le reliquat azoté après le triticale pur est de 45 kg N/ha tandis que celui de l'association triticale/féverole est de 27 kg N/ha. Cette différence peut s'expliquer par les prélèvements d'azote plus importants pour le triticale associé. En effet, avec une teneur en azote de 0,73 % de la MS, le triticale pur a exporté 52 kg N/ha tandis que le triticale associé à la féverole, avec une teneur en azote de 0,91 %, a exporté 66 kg N/ha.

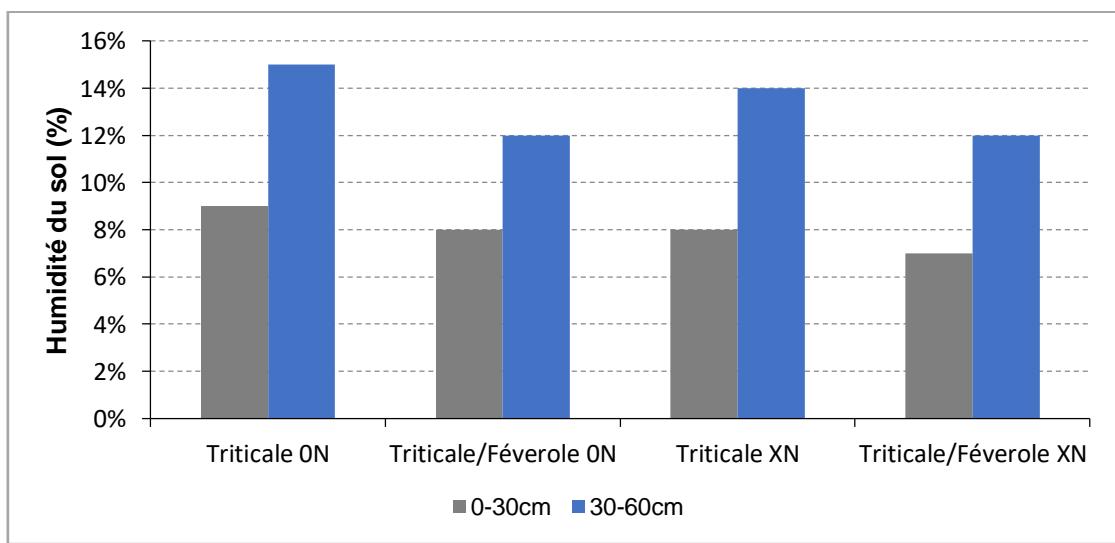


Figure 35 : Humidité du sol en % à la récolte des CIVE dans les horizons 0-30 cm et 30-60 cm sur l'essai de Lusignan
Dose X = 120 kg N/ha

L'exportation de 14 kg N/ha supplémentaires sur le triticale associé explique donc en grande partie la différence de reliquats azotés observée.

Avec un apport de fertilisation à hauteur de 120 kg N/ha, les reliquats azotés sont presque équivalents entre le triticale pur et l'association triticale/féverole puisque que l'écart est seulement de 6 kg N/ha.

4.2. Impact sur l'humidité du sol à la récolte

Sur la majorité des essais, il ne semble pas y avoir de différence d'humidité du sol à la récolte entre céréales pures et associées à la féverole. En effet, dans certains cas, le taux d'humidité du sol est égal entre céréales pures et associées tandis que dans d'autres cas, le taux d'humidité est différent d'un point, parfois au profit de la céréale pure et parfois au profit de la céréale associée.

L'essai de Lusignan est celui qui présente les différences les plus marquées entre céréale pure et associée, ici le triticale. Les résultats montrent que l'humidité du sol a tendance à être plus faible après l'association triticale/féverole qu'après le triticale pur. Ainsi, dans l'horizon de sol 0-30 cm et sans fertilisation, le taux d'humidité du sol après triticale pur est de 9 % et celui après triticale/féverole est de 8 % (figure 35). Une différence d'un point d'humidité est également observée avec une fertilisation azotée de 120 kg N/ha. Le taux d'humidité du sol dans l'horizon 30-60 cm du sol est supérieur à celui de l'horizon 0-30 cm et est compris entre 12 et 15 %. La différence entre triticale pur et triticale/féverole est plus importante dans cet horizon puisqu'il y a deux à trois points d'écart. Sur cet essai, la présence de féverole semble induire une utilisation plus importante de l'eau du sol qui conduit à une teneur en eau plus faible suite à la récolte de l'association triticale/féverole, notamment dans l'horizon 30-60 cm. Cela n'est pas vérifié sur les autres essais.

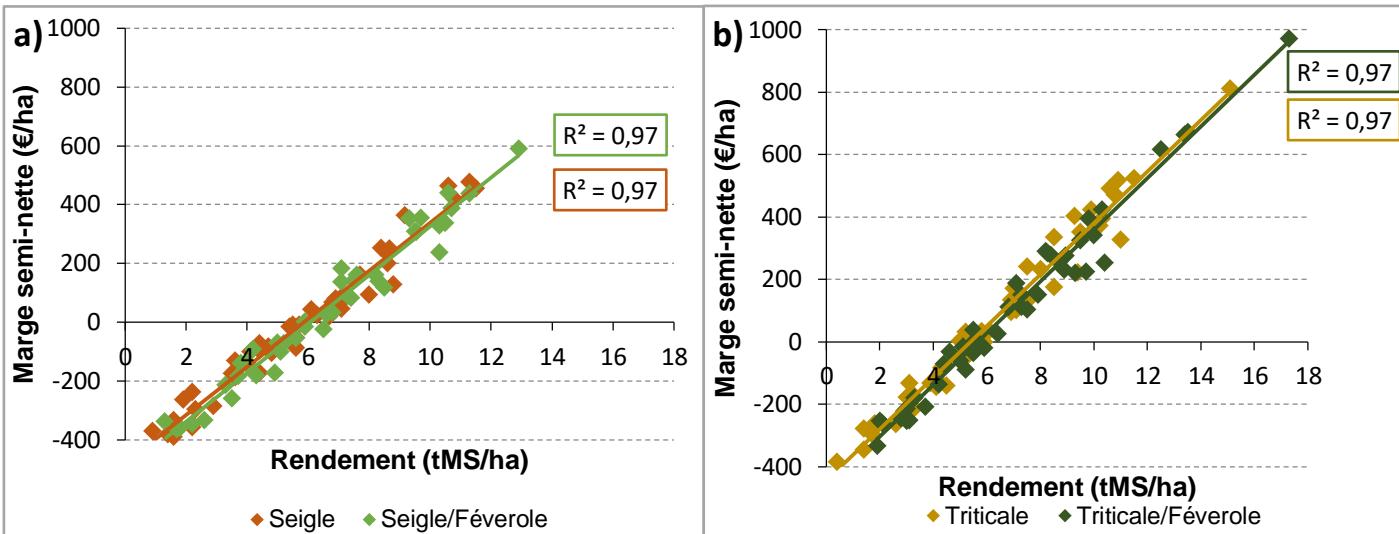
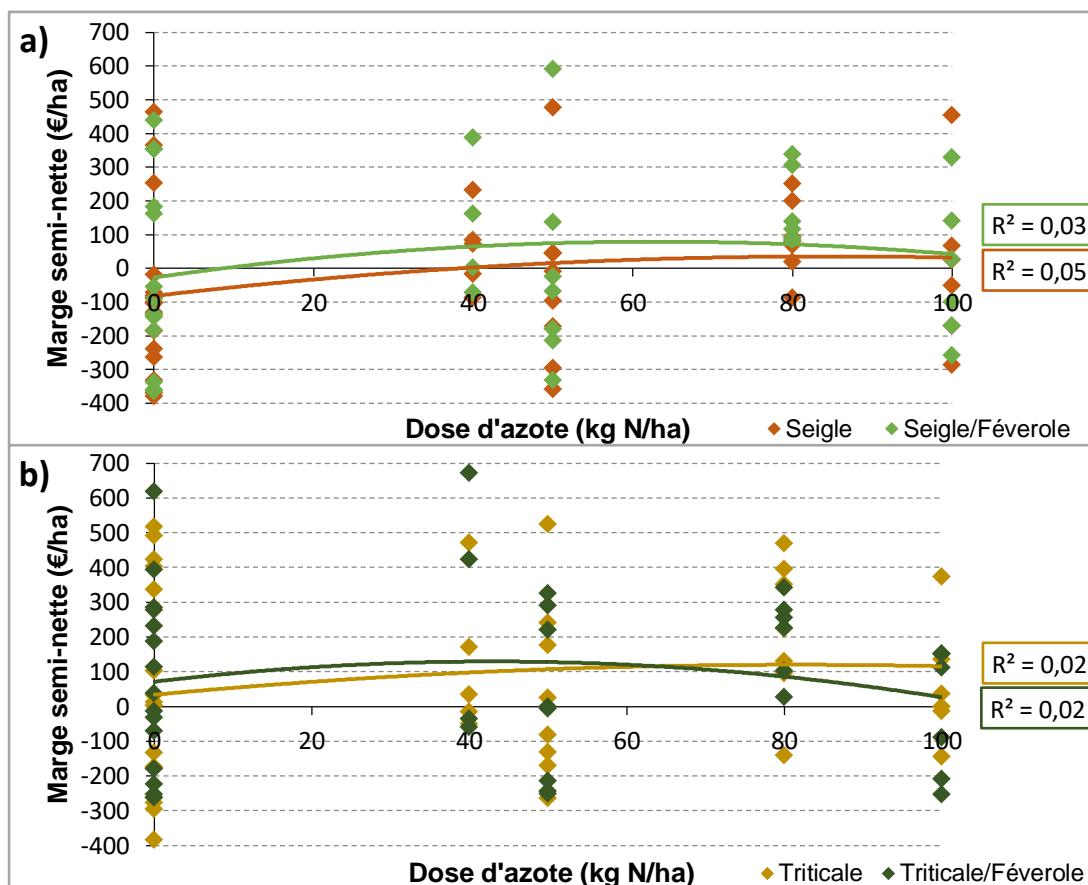


Tableau 5 : Coût de production en €/tMS, marge semi-nette en €/ha et rendement en tMS/ha moyens pour les CIVE avec un rendement supérieur ou égal à 6 tMS/ha (n=13)

CIVE	Coût de production moyen (€/tMS)	Marge semi-nette moyenne (€/ha)	Rendement moyen (tMS/ha)
Seigle	88 ^{b*}	184 ^{**}	8,2
Seigle/Féverole	84 ^{ab}	231 ^{ab}	8,9
Triticale	76 ^b	323 ^a	9,3
Triticale/Féverole	78 ^{ab}	314 ^{ab}	9,5

*Test statistique de Newman-Keuls. **Test statistique de Wilcoxon (comparaison de rangs). Les valeurs avec des lettres différentes sont significativement différentes ; au contraire quand les lettres sont similaires les valeurs sont équivalentes.



5. Des associations intéressantes économiquement

Les résultats des calculs de la MSN hors main d'œuvre sur 16 essais mettent tout d'abord en évidence une forte hétérogénéité des marges semi-nettes par hectare (figure 36) qui résulte de la forte hétérogénéité des rendements entre les essais.

Ensuite, les résultats montrent des rendements minimum à atteindre pour avoir une MSN positive légèrement différents selon les CIVE (figure 36). Ainsi, pour le triticale celui-ci est de 5,4 tMS/ha tandis que pour l'association triticale/féverole, il est de 5,7 tMS/ha. Dans les essais, ces rendements sont dépassés dans 58 % des cas. Avec le seigle, le rendement à atteindre est plus élevé puisque pour le seigle pur, il est de 5,9 tMS/ha et pour le seigle/féverole de 6,1 tMS/ha. Ces rendements sont respectivement dépassés dans 46 % et 53 % des cas. Avec les associations, un objectif de rendement supérieur à celui des céréales pures doit donc être atteint pour avoir une MSN positive. Cet objectif de rendement est autant, voire plus souvent, atteint par les associations que par les céréales pures.

En s'intéressant uniquement aux rendements supérieurs ou égaux à 6 tMS/ha, que nous pouvons définir comme l'objectif à atteindre d'après les précédents résultats, des différences de coûts de production et de marges semi-nettes entre CIVE sont observées (tableau 5). Le triticale possède le coût de production moyen le plus faible (76 €/tMS) et la MSN moyenne la plus élevée (323 €/ha). Malgré un rendement moyen plus élevé, l'association triticale/féverole présente une MSN légèrement plus faible que le triticale pur (314 €/ha), et un coût de production un peu plus élevé (78 €/tMS). Au contraire, l'association seigle/féverole présente des meilleurs résultats que le seigle pur. En effet, le seigle a le coût de production le plus élevé, 88 €/tMS, tandis que celui de l'association seigle/féverole est de 84 €/ha. Il en résulte une meilleure MSN du seigle/féverole (231 €/ha) que du seigle pur (184 €/ha). Cependant, seules les différences de MSN entre seigle et triticale sont statistiquement significatives (tableau 5 et annexe 7).

Tous rendements confondus, les associations présentent des coûts de production moins élevés que les céréales pures (121 €/tMS en moyenne contre 141 €/tMS) et des MSN plus grandes (72 €/ha contre 39 €/ha).

Enfin, l'étude de la MSN en fonction de la quantité d'azote apportée met en évidence quelques différences entre céréales pures et associées (figure 37). La significativité de ces résultats reste toutefois très faible (R^2 faibles) étant donné la forte hétérogénéité de MSN selon les essais.

L'association seigle/féverole permet d'atteindre une MSN supérieure au seigle pur quelle que soit la quantité de fertilisation azotée apportée. Néanmoins, un apport d'azote minimal est nécessaire car, sans fertilisation azotée, les MSN sont négatives pour les deux modalités. La MSN moyenne maximale atteinte par l'association seigle/féverole est d'environ 80 €/ha avec 60 kg N/ha tandis que celle du seigle pur est de 40 €/ha avec 80 kg N/ha. L'association seigle/féverole permet donc d'atteindre une MSN supérieure avec un apport d'azote moins élevé. De même, l'association triticale/féverole atteint une MSN supérieure au triticale pur avec une réduction de la fertilisation azotée. En effet, avec 45 kg N/ha, l'association a une MSN moyenne de 130 €/ha tandis que le triticale pur atteint au maximum une MSN de 120 €/ha avec 80 kg N/ha.

En céréales pures ou en association, la fertilisation n'est néanmoins pas obligatoirement un gage de rentabilité, car même à des niveaux de fertilisation élevés, certaines MSN restent très négatives à cause de rendements faibles.

DISCUSSION

1. Effet des associations sur le rendement

1.1. Des rendements équivalents entre céréales pures et associées

Pour un même niveau de fertilisation azotée, les associations céréale/féverole permettent d'atteindre un rendement au moins équivalent aux céréales pures, elles ne pénalisent donc pas le rendement des CIVE et permettent, autant que les céréales pures, d'atteindre le seuil de rendement de 4 à 5 tMS/ha nécessaire pour assurer la rentabilité de la CIVE (Chambre d'Agriculture des Landes, 2017 ; ADEME, 2019b). Ces résultats sont confirmés par l'enquête réalisée dans le cadre de ce mémoire : les agriculteurs enquêtés évoquent des rendements similaires entre céréales pures et associées à des légumineuses.

A l'échelle de l'ensemble des essais, l'association seigle/féverole permet de réduire la fertilisation azotée par rapport au seigle pur tandis que l'association triticale/féverole ne le permet que sur les essais avec un fort développement de la féverole. L'hypothèse selon laquelle les associations céréale/féverole permettent d'atteindre des rendements équivalents aux céréales pures avec une réduction de la fertilisation (H1) est donc en partie vérifiée mais reste à approfondir.

Par ailleurs, en agriculture biologique, les associations céréale/féverole sont une opportunité pour produire des CIVE d'hiver. En effet, sans fertilisation azotée, elles permettent d'atteindre des rendements supérieurs aux céréales pures. Cette caractéristique est commune à toutes les associations céréales/légumineuses, elles sont adaptées aux situations avec de bas niveaux d'intrants (Pelzer et al., 2012 ; Bedoussac et al., 2015).

Les résultats obtenus sont cohérents avec les conseils d'ARVALIS qui sont d'apporter 70 kg N/ha sur CIVE d'hiver quelles que soient les espèces (Marsac et al., 2020). Dans nos essais, cette dose permet de maximiser le rendement des associations céréale/féverole. Au contraire, le rendement des céréales n'est pas maximisé mais le faible gain de rendement entre l'apport de 70 et de 90 kg N/ha ne justifie pas l'apport de 90 kg N/ha.

Cependant, la préconisation d'une dose de fertilisation commune à toutes les CIVE d'hiver est discutable. En effet, nos résultats montrent que de très bons rendements sont atteints sans fertilisation tandis que de très mauvais sont obtenus avec un apport élevé. Ces observations soulignent donc l'intérêt de prendre en compte le contexte dans lequel sont implantées les CIVE d'hiver pour déterminer les apports de fertilisation azotée. A l'heure actuelle, les besoins azotés des CIVE sont peu connus. Par exemple, aucune référence n'est disponible pour les besoins azotés du seigle fourrager et du triticale cultivés en tant que fourrages (COMIFER, 2013). La réglementation commence à s'intéresser à cette question. Ainsi, en Centre-Val de Loire, les apports sur céréales pures sont calculés avec des besoins de 14 kg N/tMS visée et, sur les associations céréales/légumineuses, ils sont plafonnés à 80 kg N/ha¹. En Nouvelle-Aquitaine, pour les céréales pures ou associées, les apports sont calculés en considérant des besoins similaires aux prairies ensilées (25 kg N/ha).

Enfin, ces rendements ont été obtenus sans utilisation de produits phytosanitaires. Comme confirmé par les agriculteurs enquêtés, les CIVE sont des cultures avec des interventions phytosanitaires limitées pour maîtriser les coûts. L'utilisation de traitements se restreint souvent à un herbicide avant semis direct et à l'utilisation d'anti-limaces sur le seigle. Les CIVE sont donc économies en produits phytosanitaires mais restent tout de même des cultures intermédiaires exigeantes en intrants par rapport à d'autres (CIPAN).

¹ Préfecture de la région Centre-Val de Loire. ARRETE modifiant le référentiel régional de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Centre-Val de Loire, 11 février 2020.

Tableau 6 : Facteurs explicatifs des rendements faibles et élevés observés sur les essais et nombre d'essais concernés

Rendements faibles <i>(Rendement moyen tous niveaux d'azote confondus < 4tMS/ha)</i>		Rendements élevés <i>(Rendement moyen tous niveaux d'azote confondus > 8tMS/ha)</i>	
Facteurs explicatifs	Nombre d'essais concernés	Facteurs explicatifs	Nombre d'essais concernés
Faible somme de températures	3 essais CA16_1, CA23_1 et CA47_2	Sol limoneux	5 essais CA17_2, CA37_2, CA47_1, CA64_2 et Lusignan
Semis tardif	2 essais CA16_1 et CA47_2	Semis précoce	4 essais ACE, CA37_2, CA47_1 et CA86_1
Sol sableux	2 essais CA23_1 et CA79_1	Forte somme de températures	3 essais CA17_2, CA47_1 et CA64_2
Faible cumul de précipitations	1 essai CA47_2	Apport de MO au semis	2 essais ACE et CA86_1
Récolte précoce	1 essai CA79_1	Fort cumul de précipitations	1 essai CA64_2

Tableau 7 : Facteurs explicatifs des rendements faibles et élevés de féverole selon Terres Inovia (2018) et essais potentiellement concernés

Rendements faibles <i>(<5 % de féverole dans les associations)</i>		Rendements élevés <i>(>20 % de féverole dans les associations)</i>	
Facteurs explicatifs <i>(selon Terres Inovia (2018))</i>	Essais potentiellement concernés	Facteurs explicatifs <i>(selon Terres Inovia (2018))</i>	Essais potentiellement concernés
Gel et maladies aériennes sur semis précoces	4 essais ACE, CA37_2, CA86_2 et CA87	Semis précoce	2 essais CA37_1 et CA47_1
Sol hydromorphe	1 essai ACE	Sols limoneux ou argileux profonds	2 essais CA37_1 et CA47_1
Semis en conditions humides	0 essai	Apport régulier de MO	2 essais CA19_1 et CA47_1
Mauvaise structure du sol	Non étudié	Printemps pluvieux	0 essai

1.2. Mais une forte hétérogénéité de rendements et de féverole

1.2.1. Hétérogénéité de rendements

Ces résultats sont issus d'essais entre lesquels une forte hétérogénéité de rendements a été constatée. Elle s'explique par différents facteurs tels que la date de semis, le type de sol ou le climat. Certains semblent jouer un rôle plus important que d'autres et la combinaison de facteurs peut expliquer les rendements faibles ou élevés de certains essais (tableau 6). Le type de sol et le climat ne pouvant pas être modifiés par l'agriculteur, la date de semis est l'unique facteur sur lequel l'agriculteur peut jouer. La période de semis qui permet de maximiser le rendement des espèces étudiées est la fin septembre, mais elle peut s'étendre jusqu'à la mi-octobre. Ces résultats sont cohérents avec les préconisations d'ARVALIS qui sont de semer les CIVE d'hiver entre le 20/09 et le 10/10 dans le Sud-Ouest (ex-région Aquitaine) (Marsac et al., 2019). Ces préconisations semblent être également valables pour l'ensemble de la région Nouvelle-Aquitaine et une partie de la région Centre-Val de Loire. Toutefois, il est nécessaire de rester vigilant quant aux semis trop précoces, qui sont soumis à des risques plus importants de gel et d'infestations par des insectes (pucerons et cicadelles) transmetteurs de maladies des céréales.

Les différences de fertilisation azotée entre les essais sont susceptibles de renforcer cette hétérogénéité. Les doses de fertilisation azotée initialement prévues n'ont pas pu être respectées sur tous les essais car les conditions météorologiques n'ont parfois pas permis d'effectuer les apports dans de bonnes conditions. C'est pourquoi les doses X/2 et X se superposent (dose X/2 : de 25 à 80 kg N/ha, dose X : de 50 à 160 kg N/ha). Afin de limiter ce biais lors des prochaines expérimentations, il serait intéressant de conserver une seule gamme de fertilisation azotée (0, 40 et 80 kg N/ha par exemple).

Enfin, les mesures de biomasses et de taux de MS qui ont permis de calculer le rendement des CIVE ont été réalisées par des personnes différentes pour chaque essai. Bien que le protocole était commun à tous, il se peut que les mesures aient été réalisées de façons différentes selon les essais (erreur de suivi ou d'interprétation du protocole). Cet effet « expérimentateur » peut accentuer l'hétérogénéité des rendements.

De plus, l'absence de répétitions de mesure du taux de MS de chaque modalité limite la significativité de celui-ci. Il aurait été intéressant de mesurer le taux de MS pour chaque mesure de biomasse (soit trois répétitions par modalité) afin d'améliorer sa représentativité. Cependant, cela augmenterait le temps nécessaire pour la réalisation des mesures.

1.2.2. Hétérogénéité de féverole

La densité de semis de la féverole était similaire sur tous les essais (10 grains/m² soit 50 kg/ha) mais le développement de la féverole a été hétérogène et globalement faible. Celui-ci peut être influencé par différents facteurs selon Terres Inovia (tableau 7). Néanmoins, aucun de ces facteurs ne permet d'expliquer clairement l'hétérogénéité observée. En effet, pour des semis précoces, les rendements peuvent aussi bien être très élevés que très faibles. Sur les rendements faibles, la probabilité de gel est faible car la variété utilisée (Diva) est résistante à des températures allant jusqu'à -12 °C et peu de problèmes de maladies aériennes ont été reportés lors du suivi des essais. Il peut aussi y avoir un effet « année », car l'année n'a globalement pas été favorable à la réussite de la féverole bien qu'on ne sache pas forcément l'expliquer, d'où l'intérêt de reconduire ces expérimentations une deuxième année.

De plus, la densité de semis choisie dans ces essais n'est peut-être pas adaptée. D'une part, le potentiel de rendement en biomasse de la féverole semée à cette densité n'est pas connu. Il n'est peut-être pas possible d'atteindre des rendements supérieurs à ceux obtenus. Des essais menés par la CRA NA et ACE Méthanisation en 2020 ont mis en évidence des rendements de la féverole entre 1 et 2 tMS/ha pour une densité de semis de 80 kg/ha, ce qui semble être en cohérence avec nos résultats.

D'autre part, ARVALIS préconise un optimum de 20 à 40 % de légumineuses au semis de la CIVE (Marsac et al., 2019) alors que dans nos essais, la féverole représentait uniquement 5 %. Cependant, ces recommandations sont principalement issues de résultats obtenus avec de la vesce et ne semblent pas valables dans le cas de la féverole.

2. Effet des associations sur le taux de MS

2.1. Réduction du taux de MS pas toujours significative

L'hypothèse selon laquelle les associations céréale/féverole ont un taux de MS plus faible que les céréales pures (H2) est en partie vérifiée car la réduction du taux de MS des associations par rapport aux céréales pures n'est pas toujours significative. Pour une même proportion de féverole dans l'association, cette différence est d'autant plus importante que la différence de précocité entre les espèces est importante, comme c'est le cas entre le triticale et la féverole. Néanmoins, cela ne remet pas en cause la pertinence des associations à être utilisées en tant que CIVE. De nombreux agriculteurs enquêtés n'ont d'ailleurs pas évoqué le taux de MS comme problématique, ce qui semble aller dans le sens de ces résultats. Cependant, certains d'entre eux ont fait état de récoltes trop humides avec des légumineuses qui ont entraînées des pertes de jus à la conservation de l'ensilage. Il est donc possible qu'avec une plus grande part de légumineuses dans les associations, l'impact sur le taux de MS soit plus grand et rende plus difficile la récolte, ou la retarde davantage.

Ensuite, le recours au préfanage n'est pas systématiquement conditionné par la présence de féverole. Cette méthode possède un intérêt aussi bien pour la récolte des céréales pures que pour la récolte des associations en cas de récoltes précoces.

De plus, le triticale atteint rapidement un taux de MS supérieur à l'optimum de récolte. L'association triticale/féverole présente donc un intérêt puisqu'avec un taux de MS inférieur au triticale, elle peut être récoltée plus tardivement. Diversifier les CIVE peut donc permettre d'étaler les récoltes en ayant des CIVE à un stade optimal de récolte à différentes périodes.

2.2. Raisonnement du préfanage

L'hypothèse émise selon laquelle la présence de féverole nécessite d'allonger la durée du préfanage (H2) est vérifiée dans les conditions de cet essai. L'humidité plus importante de l'association seigle/féverole due à la présence de féverole nécessite, en effet, d'allonger la durée de séchage de quelques heures par rapport au seigle pur.

Le moment de la journée où est réalisée la fauche semble avoir un impact non négligeable sur la dynamique de séchage, une fauche dans la matinée serait à privilégier. Cela peut s'expliquer par une combinaison de facteurs météorologiques et internes à l'andain. En séchant, les plantes deviennent plus rigides ce qui maintient la structure des andains et assure une bonne circulation de l'air à l'intérieur pour maximiser le séchage (Munier et Morlon, 1987). Lors de la fauche réalisée à 15 h, les plantes ont probablement peu séché en raison d'un temps nuageux. Les andains se sont donc tassés ce qui a limité la circulation de l'air à l'intérieur et donc le séchage. Au contraire, les CIVE fauchées à 10 h ont pu profiter dès la fauche d'un ensoleillement et d'une chaleur plus importants, ce qui a permis d'augmenter plus rapidement la rigidité des plantes et ainsi de maximiser le séchage.

Enfin, ces mesures ont montré que le préfanage permet de gagner 0,3 points de MS/h en moyenne. Cependant, il est primordial de connaître le taux de MS de départ pour estimer la durée de séchage nécessaire pour atteindre un taux de MS donné. Une méthode de détermination rapide et simple de la teneur en MS à la fauche doit donc être développée pour permettre aux agriculteurs de choisir un temps de séchage approprié. Une méthode de mesure par séchage au four à micro-ondes existe (Chambre d'Agriculture du Gers, 2020) mais sa fiabilité est peu connue, et de nouveaux outils permettant de tester l'humidité des fourrages en andains se développent mais ont encore un coût élevé (Scohy, 2021).

3. Effet des associations sur les adventices

L'hypothèse selon laquelle la biomasse d'adventices à la récolte des associations céréale/féverole est inférieure à celle des céréales pures (H3) n'est pas vérifiée. Malgré un potentiel de couverture du sol moins important à l'automne pour les associations, aucune différence de biomasse d'adventices n'est observée à la récolte. Les associations ne permettent donc pas une meilleure régulation des adventices. Toutefois, les conditions sèches du printemps n'ont pas été favorables au développement des adventices et il est probable que, dans d'autres conditions météorologiques les résultats diffèrent. Ces résultats sont néanmoins cohérents avec ce qu'observent les agriculteurs enquêtés. Pour eux, grâce à une bonne couverture du sol à l'automne, les associations céréales/légumineuses permettent une bonne gestion des adventices qui autorise à se passer d'herbicides. De même, de nombreuses recherches ont mis en évidence un salissement équivalent entre céréales pures et associées à des légumineuses (Fontaine et al., 2013 ; Corre-Hellou et al., 2014 ; Bedoussac et al., 2015).

4. Effet des associations sur l'état du sol à la récolte

L'hypothèse de travail selon laquelle l'état du sol à la récolte est similaire après les associations céréale/féverole et après les céréales pures (H4) est encore à approfondir. En effet, les résultats sont variables selon les essais et ne permettent pas de conclure sur cette hypothèse. Ils mettent tout de même en évidence que les associations céréale/féverole laissent un état du sol similaire aux céréales pures et ne permettent pas d'améliorer les conditions de développement de la culture suivante, hormis lorsque la présence de féverole est supérieure à celle de la céréale. Ces résultats sont cohérents avec les résultats qu'ont pu mettre en évidence Marsac et al. (2019) qui avaient observé des reliquats azotés et une réserve en eau du sol équivalents entre l'association avoine/vesce et le triticale, l'orge et l'avoine purs. De même, l'enquête auprès des agriculteurs suggère la même tendance car les agriculteurs ne voient pas de différence de réussite de la culture suivante après les céréales pures ou après les associations céréales/légumineuses. Le rendement de la culture suivante peut être pénalisé dans les deux cas, mais il est compensé par le revenu complémentaire assuré par la CIVE.

Néanmoins, l'interprétation de ces résultats doit être faite avec vigilance car les différences de reliquats azotés peuvent également résulter d'une hétérogénéité intra-parcellaire. Ces résultats nécessitent donc d'être complétés par d'autres mesures lors d'une seconde année d'expérimentations. Ces mesures pourraient se concentrer sur un nombre limité d'essais sur lesquels de plus nombreux prélèvements seraient réalisés afin de limiter les biais liés à l'hétérogénéité intra-parcellaire et à l'échantillonnage. Cela permettrait également de comparer seigle et triticale.

Comment l'association céréales/légumineuses impacte les performances et la conduite technique des CIVE d'hiver par rapport à une céréale pure ?

Hypothèses	- H1 : A fertilisation réduite, l'association présente des rendements similaires aux céréales pures fertilisées.	- H2 : La présence de féverole diminue le taux de MS des associations et nécessite d'allonger la durée du préfanage.	- H3 : L'association permet de limiter la biomasse d'adventices à la récolte.	- H4 : L'humidité du sol et les reliquats azotés à la récolte sont similaires entre céréales pures et associées à la féverole.	- H5 : Les associations ont des coûts de production et des marges semi-nettes au moins équivalents aux céréales pures.
Résultats marquants	<ul style="list-style-type: none"> - Rendements équivalents entre associations et céréales pures. - Sans fertilisation azotée, rendements supérieurs aux céréales pures. - Réduction de 40 kg N/ha avec le seigle/féverole sans pertes de rendement par rapport au seigle. Pas possible avec le triticale/féverole. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baisse du taux de MS du triticale/féverole par rapport au triticale. - Baisse du taux de MS non significative pour le seigle/féverole. - Préfanage non conditionné par la présence de féverole. - Durée de préfanage plus longue de quelques heures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Biomasse d'adventices équivalente entre céréales pures et associations céréale/féverole. - Peu d'adventices sur la majorité des essais. - Réduction des adventices dans de rares cas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reliquats azotés et humidité du sol équivalents voire légèrement dégradés après les associations. - Amélioration après l'association sur un essai avec un développement important de la féverole. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement minimum de 6 tMS/ha à atteindre pour une marge semi-nette positive. - Coûts de production et marges semi-nettes au-delà de 6 tMS/ha : <ul style="list-style-type: none"> • équivalents entre triticale et triticale/féverole. • plus avantageux pour seigle/féverole que pour seigle.
Etat de l'hypothèse	Seigle/féverole : Validée Triticale/féverole : A approfondir	Validée	Non validée	A approfondir	Validée
Points de vigilance	<ul style="list-style-type: none"> - Faible part de féverole - Rendements très hétérogènes - Effet « année » 	- Faible part de féverole	- Météorologie peu favorable au développement d'adventices (printemps sec)	- Faible part de féverole - Différences potentielles entre seigle et triticale	- Rendement minimum à atteindre élevé (non atteint dans de nombreux cas)

Figure 38 : Schéma de synthèse des hypothèses et des résultats de l'étude

5. Intérêt économique

L'hypothèse H5 selon laquelle les associations ont des coûts de production et des MSN au moins équivalents aux céréales pures est vérifiée. En effet, tous rendements confondus, les associations présentent des coûts de production moins élevés que les céréales pures et des MSN plus grandes grâce à des rendements plus élevés.

Ensuite, les différences de coûts de production et de MSN observés entre céréales pures et associées pour les rendements supérieurs à 6 tMS/ha s'expliquent par le coût des semences. En effet, les semences de seigle sont plus coûteuses que les semences de féverole, elles-mêmes plus coûteuses que celles du triticale.

Les résultats ont montré qu'un rendement compris entre 5,4 et 6,1 tMS/ha selon les CIVE était nécessaire pour avoir une MSN positive. Ces rendements sont supérieurs à ceux évoqués par d'autres structures, plutôt de l'ordre de 4 à 5 tMS/ha (Chambre d'Agriculture des Landes, 2017 ; ADEME, 2019b) et ne sont pas atteints par de nombreux essais. Néanmoins, les coûts de production calculés ici ne semblent pas surestimés car ils sont du même ordre de grandeur que ceux mis en évidence par d'autres études. Au cours du projet Opticive, Marsac et al. (2019) ont mis en évidence un coût de production de 73 €/tMS pour l'avoine pure et de 67 €/tMS pour le mélange avoine/vesce pour obtenir des rendements supérieurs à 6 tMS/ha. De même, l'étude réalisée par Pislor (2016) fait ressortir un coût de production de 150 €/tMS, tous rendements confondus, pour l'association avoine/triticale/seigle/pois/vesce et en prenant en compte le coût de main d'œuvre.

La différence de rendement minimum peut s'expliquer par le prix de vente de la CIVE utilisé. Peu de références sur le prix de vente des CIVE sont communiquées. Nos résultats paraissent toutefois cohérents avec ceux de Marsac et al. (2019) qui estimaient un rendement seuil de 4 tMS/ha pour couvrir les charges de production de la CIVE (hors charges fixes) pour un prix d'achat de 125 €/tMS.

6. Bilan de l'impact des associations céréale/féverole

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont permis d'apporter des réponses et de vérifier ou non les hypothèses émises tandis que d'autres sont encore à approfondir (figure 38). Ainsi, ils confirment une réduction du taux de MS des associations céréales/féverole et un allongement de la durée du préfanage, étant donné l'humidité plus importante de la légumineuse. Cependant, la fertilisation azotée ne peut pas systématiquement être réduite sur les associations par rapport aux céréales pures et l'état du sol à la récolte n'est pas amélioré par la présence de la féverole. Ces hypothèses restent donc à approfondir. Ces observations sont néanmoins très liées à la présence de féverole dans les essais qui est assez faible. L'impact d'une part de féverole plus importante est l'une des questions soulevées à la suite de ce travail.

Comme attendu, les associations céréales/féverole présentent des résultats économiques au moins équivalents aux céréales pures. Seule l'hypothèse portant sur les adventices n'est pas validée, l'impact des associations sur ces dernières étant nul.

La forte hétérogénéité des rendements entre les essais limite la significativité des résultats qui devront être complétés.

PERSPECTIVES

1. Résultats à compléter par une seconde année d'expérimentations

Afin de compléter les résultats acquis lors de cette année 2020-2021 et d'améliorer leur fiabilité, une seconde année d'expérimentations avec ces mêmes essais est nécessaire. Elle permettra de réduire l'effet « année » mais également d'étudier des essais dans des situations similaires. En effet, les résultats de cette première année ont mis en évidence un impact important de la date de semis et du type de sol sur le rendement des CIVE. Il pourrait donc être intéressant d'étudier le rendement des CIVE selon des couples date de semis/type de sol. Cela n'a pas été possible cette année car le nombre d'essais par couple était faible et se limitait à un ou deux essais.

Limiter les différences de fertilisation azotée selon les essais permettrait également de réduire les biais et de faciliter l'analyse des résultats. Des modalités communes de fertilisation sur l'ensemble des essais pourraient être proposées. Néanmoins, cela est compliqué à mettre en place car elle est réalisée par les agriculteurs qui n'ont pas forcément les moyens pour faire des niveaux de fertilisation particuliers sur une surface limitée. De plus, une quantité fixe peut être problématique car, selon les conditions météorologiques, ces apports peuvent ne pas être pertinents (mauvaise valorisation, risque de pertes).

Ces expérimentations ont montré que le rendement de la féverole était assez faible dans la majorité des essais. Au-delà du potentiel effet « année », la densité de semis de la féverole (10 grains/m²) peut avoir un effet sur le rendement. Afin d'espérer une contribution au rendement plus importante de la féverole et de mieux quantifier ses impacts, celle-ci pourrait être augmentée. Peu de références pour produire des CIVE existent. Cependant, pour les récoltes en grain, la densité de semis recommandée pour la féverole associée au triticale oscille entre 15 et 25 grains/m² (Biarnès et al., 2011 ; Legendre et al., 2018). Elle pourrait donc être de 20 grains/m² lors de la deuxième année d'expérimentations.

Enfin, le potentiel méthanogène des associations céréale/féverole pourrait être mesuré. Bien que celui-ci semble peu variable entre les espèces (ARVALIS-Institut du Végétal, 2021), cela permettrait d'identifier le potentiel de production de biogaz par ces associations.

2. Autres variétés et espèces à étudier

Ces résultats ont été obtenus avec une variété par espèce. D'autres variétés avec des caractéristiques différentes (précocité, ...) pourraient donc présenter des résultats différents et seraient peut-être plus adaptées pour être associées. Néanmoins, tester différentes variétés demande un dispositif expérimental plus lourd. Le format du réseau d'essais ne conviendrait pas pour réaliser cela mais il faudrait plutôt un essai en micro-parcelles.

Par ailleurs, d'autres associations céréales/légumineuses pourraient également être utilisées en tant que CIVE d'hiver et faire l'objet d'expérimentations plus approfondies.

Sur l'essai en micro-parcelles, l'association seigle/vesce velue a permis d'atteindre des rendements équivalents au seigle pur avec un apport de fertilisation azotée moins élevé. La vesce velue a présenté une production de biomasse rapide et importante au printemps ce qui fait d'elle une espèce de légumineuse potentiellement intéressante.

De plus, les mélanges plurispecifiques (trois espèces et plus) sont couramment utilisés chez les agriculteurs enquêtés. Ils permettent de maximiser la réussite de la CIVE grâce à la complémentarité entre les espèces. Ce type d'associations paraît donc pertinent pour produire des CIVE mais des questions sur le choix des espèces à associer pour atteindre différents objectifs dans des contextes pédoclimatiques variés persistent.

CONCLUSION

Les CIVE d'hiver étant principalement produites avec des céréales pures mais faisant face à divers problèmes, les associations céréales/légumineuses sont identifiées comme un levier potentiel. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail était d'identifier les impacts des associations céréales/légumineuses sur les performances et la conduite technique des CIVE d'hiver par rapport aux céréales pures. Pour cela, il s'est concentré sur l'étude des associations seigle fourrager/féverole et triticale/féverole en comparaison au seigle fourrager et au triticale purs, en s'appuyant sur un réseau de 20 essais dans le Centre-Ouest de la France.

Malgré des rendements hétérogènes, ce travail a mis en évidence que ces associations céréale/féverole atteignent un rendement en biomasse équivalent aux céréales pures. Sans fertilisation azotée, elles permettent même d'atteindre un rendement supérieur aux céréales pures, confirmant l'intérêt des associations céréales/légumineuses dans les situations où l'azote est limitant. De plus, l'association seigle/féverole montre un rendement équivalent à celui du seigle pur avec une diminution de la fertilisation de 40 kg N/ha, ce qui la rend intéressante dans un contexte de réduction des apports d'engrais azotés.

Cependant, la présence de féverole dans l'association induit une réduction du taux de MS de la CIVE, notamment pour l'association triticale/féverole. Néanmoins, les méthodes de récolte sont faiblement impactées et les associations peuvent permettre aux agriculteurs d'étaler les récoltes des CIVE en arrivant au stade de récolte optimal à des périodes différentes.

De plus, les associations céréale/féverole ne sont pas plus sensibles au salissement que les céréales pures mais leur impact sur l'état du sol à la récolte, variable selon les essais, est encore à approfondir pour évaluer l'effet des associations sur la culture suivante.

D'un point de vue économique, un objectif de rendement minimum de 6 tMS/ha doit être visé. Il est atteint avec des coûts de production et des marges semi-nettes équivalents entre céréales pures et associées, voire plus intéressants dans le cas du seigle/féverole.

Les associations céréale/féverole étudiées dans le cadre de ce travail sont donc adaptées pour produire des CIVE d'hiver dans le Centre-Ouest de la France, sans modifications majeures de la conduite technique de ces cultures intermédiaires. L'association seigle/féverole semble toutefois présenter plus d'avantages par rapport au seigle pur que le triticale/féverole n'en possède par rapport au triticale pur. Néanmoins, ces résultats nécessitent donc d'être complétés par une seconde année d'expérimentations. Leur significativité reste limitée étant donné des rendements très hétérogènes, expliqués par les différents contextes pédoclimatiques des essais étudiés, et un développement faible de la féverole, qui a réduit l'impact potentiel de la légumineuse.

Par ailleurs, les associations céréales/légumineuses ne se limitent pas aux trois espèces étudiées dans ce mémoire. De nombreuses autres espèces et variétés pourraient avoir un intérêt dans divers contextes pédoclimatiques.

Bibliographie

- ADEME, 2019a. La méthanisation en 10 questions. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-methanisation-en-10-questions.pdf>. Consulté le 08/03/2021.
- ADEME, 2019b. Réaliser une unité de méthanisation à la ferme. [en ligne]. Disponible sur : <https://bretagne.ademe.fr/sites/default/files/realiser-unite-methanisation-ferme.pdf>. Consulté le 08/03/2021
- AGRESTE, 2019. Mémento de statistique agricole Nouvelle-Aquitaine. [en ligne] Disponible sur : https://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/AgresteNA_Memento_Agricole2019_Correctif_cle83697f.pdf. Consulté le 08/03/2021.
- AGRESTE Nouvelle-Aquitaine, 2019. Filières céréales oléoprotéagineux. [en ligne]. Disponible sur : https://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/filiere-COP-V8_cle86b78f.pdf . Consulté le 08/03/2021.
- AGRESTE, 2020a. Mémento 2020 Centre-Val de Loire. [en ligne]. Disponible sur : https://draaf.centre-val-de-loire.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/le_memento_2020_cle0821a5.pdf. Consulté le 08/03/2021.
- AGRESTE, 2020b. Les Dossiers Commission des comptes de l'agriculture de la Nation Session du 10 janvier 2020. [en ligne]. Disponible sur : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/DOS201_Dossier2020-1_CCAN_Janvier2020v3.pdf. Consulté le 08/03/2021.
- AGRESTE, 2021. Mémento 2020 France. [en ligne]. Disponible sur : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/MemSta2020/MementoFrance%202020_V3.pdf. Consulté le 09/03/2021.
- Agro-Transfert-RT, 2020. Produire de la biomasse en Hauts-de-France sans modification majeure de la rotation : les CIVE. Disponible sur : <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2020/10/FILABIOM-Fiches-CIVE.pdf>. Consulté le 16/03/2021.
- AREC, 2019. Estimation des ressources méthanisables en Nouvelle-Aquitaine à l'horizon 2030. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.arec-nouvelleauquitaine.com/documents/estimation-des-ressources-methanisables-en-nouvelle-aquitaine-a-lhorizon-2030-edition-2019/>. Consulté le 08/03/2021.
- AREC, 2020. Etat du développement de la méthanisation en Nouvelle-Aquitaine – Edition 2020 – Données 2018. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.arec-nouvelleauquitaine.com/documents/etat-du-developpement-de-la-methanisation-en-nouvelle-aquitaine-donnees-2018/>. Consulté le 09/03/2021.
- ARVALIS-Institut du végétal, 2021. Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique Tout ce que vous voulez savoir. Projet Recital. [en ligne]. Disponible sur : https://www.arvalis-infos.fr/file/galleryelement/pj/c2/0b/46/c8/plaquette_recitalweb6691942158883491221.pdf Consulté le 16/04/2021.
- Barot S., Allard V., Cantarel A., Enjalbert J., Gauffretea A., Goldringer I., Lata J-C., Le Roux X., Niboyet A., Porcher E., 2017. Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with help of ecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37:13
- Basosi R., Spinelli D., Fierro A., Jez S., 2014. Mineral nitrogen fertilizers: environmental impact of production and use. In : *Fertilizers: Components, Uses in Agriculture and Environmental Impacts*, Lopez-Valdez F., Luqueno F.F., Eds.; NOVA Science Publishers: New-York. 3–43.
- Bedoussac L., 2009. Analyse du fonctionnement des performances des associations blé dur-pois d'hiver et blé dur-féverole d'hiver pour la conception d'itinéraires techniques adaptés à différents objectifs de production en systèmes bas-intrants. Toulouse : Université, thèse de doctorat.
- Bedoussac L., Journet E-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E.S., Prieur L., Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 911–935.
- Berthe A., Fautras M., Grouiez P., Issehnane S., 2020. Les formes d'unités de méthanisation en France : typologies et scénarios d'avenir de la filière. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 10.

- Bes de Berc, L., 2020. Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique : la biomasse au service de l'Environnement et de l'Agriculture. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 10.
- Biarnès V., Gaillard B., Jeuffroy M-H., Guichard L., Corre-Hellou G., 2008. Céréales et légumineuses : une association pour produire du blé avec peu d'intrants ? *Perspectives agricoles*, 347, 52-55.
- Biarnès V., Carrouée B., Bouttet D., Chaillet I., Corre-Hellou G., Fontaine L., Leroyer J., Coutard J-P., Gaillard B., Lubac S., Métivier T., 2011. La culture des associations céréales/protéagineux en AB. *Fiche technique*, 8p.
- Chambre d'Agriculture des Landes, 2017. Essais couverts végétaux. In : Résultats des expérimentations Grandes cultures 2017. [en ligne]. Disponible sur : https://landes.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/101_Inst-Landes/Documents/techniques_et_innovations/PV/resultats_experimentations_2017/essais_couverts_vegetaux.pdf. Consulté le 10/03/2021.
- Chambre d'Agriculture des Landes, 2018. Essais couverts végétaux. In : Résultats des expérimentations Grandes cultures 2018. [en ligne]. Disponible sur : https://landes.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Nouvelle-Aquitaine/40_experimentations2018_essai_couverts_vegetaux.pdf. Consulté le 16/03/2021.
- Chambre d'Agriculture des Landes, 2019. Essais couverts végétaux. In : Résultats des expérimentations Grandes cultures 2019. [en ligne]. Disponible sur : https://landes.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Nouvelle-Aquitaine/40_experimentations2019_essais_couverts_vegetaux.pdf. Consulté le 16/03/2021.
- Chambre d'Agriculture du Gers, 2018. Les méteils fourrager – Conseils pour élaborer son mélange. *Fiche technique*, 6p.
- Chambre d'Agriculture du Gers, 2020. Foins récoltés en conditions difficiles : conséquences et prévention de l'échauffement. [en ligne]. Disponible sur : https://gers.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/067_Inst-Gers/documents/Elevage/fourrages/Note_Technique_Foins_recoltes_humides_precautions_juin2020.pdf. Consulté le 17/08/2021.
- Chambre d'Agriculture France. Nous connaître. [en ligne]. Disponible sur <https://chambres-agriculture.fr/chambres-dagriculture/nous-connaître/>. Consulté le 09/03/2021.
- COMIFER, 2013. Teneur en azote des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ, les principaux fourrages et la vigne. Tableau de référence 2013.
- Corre-Hellou G., Dibet A., Aveline A., Crozat Y., 2004. Le pois dans des systèmes à faibles intrants : culture pure ou associée ? *Perspectives Agricoles*, 306, 68-70.
- Corre-Hellou G., Fustec J., Crozat Y., 2006. Interspecific competition for soil N and its interaction with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, 282, 195-208.
- Corre-Hellou G., Bedoussac L., Bousseau D., Chaigne G., Chataigner C., 2013. Associations céréale-légumineuse multi-services. *Innovations Agronomiques*, 30, 41-57.
- Corre-Hellou G., Baranger A., Bedoussac L., Cassagne N., Cannavacciulo M., 2014. Interactions entre facteurs biotiques et fonctionnement des associations végétales. *Innovations Agronomiques*, 40, 25-42.
- Dayoub E., Naudin C., Piva G., Shirtliffe S.J., Fustec J., Corre-Hellou G., 2017. Traits affecting early season nitrogen uptake in nine legume species. *Helyon*, 3.
- Demarquilly C., 1973. Principes de base de l'ensilage. *Fourrages*, 56, 15-26.
- Den Hollander N.G., Bastiaans L., Kropff M.J., 2007. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design I. Characteristics of several clover species. *European Journal of Agronomy*, 26, 92-103.
- Fontaine L., Coulombel A., Belleil A., Corre-Hellou G., Bodeving M-N., Michaud Y., Amossé C., Celette F., Hinsinger P., Roinsard A., Bedoussac L., 2013. Associations céréales/légumineuses : des atouts agronomiques indéniables. *Alter Agri*, 119, 6-26.
- Gaba S., Lescourret F., Boudsocq S., Enjalbert J., Hinsinger P., Journet E-P., Navas M-L., Wery J., Louarn G., Malézieux E., Pelzer E., Prudent M., Ozier-Lafontaine H., 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services : from concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 607-623.

- Gaillard F., 1998. Suivi de la dessiccation. Présentation d'une méthode d'essai. Fourrages, 156, 487-490.
- Garnier E., Navas M-L., 2012. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. Agronomy for Sustainable Development, 32, 365-399.
- Guinet M., Nicolardot B., Durey V., Revellin C., Lombard F., Pimet E., Bizouard F., Voisin A-S., 2019. Fixation symbiotique de l'azote et effet précédent : toutes les légumineuses à graines se valent-elles ?. Innovations Agronomiques, 74, 55-68.
- Hinsinger P., Betencourt E., Bernard L., Brauman A., Plassard C., Shen J., Tang X., Zhang F., 2011. P for Two, Sharing a Scarce Resource: Soil Phosphorus Acquisition in the Rhizosphere of Intercropped Species. Plant Physiology, 156, 1078-1086.
- Justes E., Bedoussac L., Corre-Hellou G., Fustec J., Hinsinger P., 2014. Les processus de complémentarité de niche et de facilitation déterminent le fonctionnement des associations végétales et leur efficacité pour l'acquisition des ressources abiotiques. Innovations Agronomiques, 40, 1-24.
- Justes E., Richard G., 2017. Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services. Innovations Agronomiques, 62, 1-15.
- Laboubée C., Couturier C., Bonhomme S., Damiano A., Hruschka S., Tignon E., Paillard E., Lelievre P., Vrignaud G., Dumas Larfeil C., Durox C., 2020. Methalae : Comment la méthanisation peut être un levier pour l'agroécologie. Innovations Agronomiques, 79, 373-390.
- Lagrange H., Marsac S., Moureaux B., 2020. Les CIVE contribuent aux apports de matière organique. Perspectives Agricoles, 473, 51-54
- Lecuyer B., Chatellier V., Daniel K., 2013. Le marché des engrains, la volatilité des prix et la dépendance de l'agriculture européenne. INRA. Rapport. 47p.
- Legendre A., Bouffartigue J., Deleau D., Deraedt M., Desmoniere E., Emile J-C., Estrade O., Ferard A., Greffier J., Knoden D., Pierre P., Toussaint J., Uijttewaal A., 2018. Guide technique des mélanges fourragers à base de céréales à paille et de légumineuses. Fiche technique, 12p.
- Li L., Li S-M., Sun J-H., Zhou L-L., Bao X-G., Zhang H-G., Zhang F-S., 2007. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. Proceedings of the National Academy of Science, 104, 11192-11196.
- Lorin M., Butier A., Jeuffroy M-H., Valantin-Morison M., 2017. Choisir et gérer des légumineuses gélives associées au colza d'hiver pour le contrôle des adventices et la fourniture d'azote. Innovations agronomiques, 60, 77-89.
- Marsac S., Chavassieux D., Comment raisonner une culture intermédiaire pour la méthanisation. Colloque ADEME, Beaune, France, 9 avril 2019.
- Marsac S., Heredia M., Bazet M., Delaye N., Trochard R., Lagrange H., Quod C., Sanner E-A., 2019. Optimisation de la mobilisation de CIVE pour la méthanisation dans les systèmes d'exploitation. Rapport. 73p.
- Marsac S., Heredia M., 2020. Une interculture particulière pour produire de l'énergie. [en ligne]. Disponible sur <https://www.arvalis-infos.fr/une-interculture-particuliere-pour-produire-de-l-energie-@view-26937-arvarticle.html>. Consulté le 10/03/2021.
- Marsac S., Heredia M., Bazet M., Cabeza-Orcel P., 2020. Optimiser la biomasse des CIVE. Perspectives Agricoles, 473, 42-45.
- Munier E., Morlon P., 1987. Le séchage du foin au champ. I-Les facteurs physiques du séchage du foin (étude bibliographique). Fourrages, 109, 53-74.
- Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Crozat Y., Jeuffroy M.H., 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. Field Crops Research 119, 2-11.
- Ndzana R. A., Magro A., Bedoussac L., Justes E., Journet E-P., Hemptonne J-L., 2014. Is there an associational resistance of winter pea-durum wheat intercrops towards Acyrthosiphon pisum Harris ?. Journal Of Applied Ecology, 138, 577-585.

- Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifaï M., Baranger E., Bedoussac L., Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M-C., Omon B., Prieur L., Yvergniaux M., Justes E., Jeuffroy M-H., 2012. Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. European Journal of Agronomy, 40, 39-53.
- Pelzer E., Bedoussac L., Corre-Hellou G., Jeuffroy M-H., Métivier T., Naudin C., 2014a. Association de cultures annuelles combinant une légumineuse et une céréale : retours d'expériences d'agriculteurs et analyse. Innovations agronomiques, 40, 73-91.
- Pelzer E., Hombert N., Jeuffroy M-H., Makowski D., 2014b; Meta-analysis of the effect of nitrogen fertilization on annual cereal-legume intercrop production. Agronomy Journal, 106, 1775-1786.
- Pelzer E., Soulié M., Jeuffroy M.H., 2014c. Grass-legume intercrops to produce biomass for bioenergy. Proceeding of the congress of the American Society of Agronomy, Long Beach, 3-5 November 2014.
- Peyrelasse C., Lalanne M , Monlau F., 2017. SAM-Bonnes pratiques pour le stockage de matière avant méthanisation. ADEME. 56p.
- Pislor E., 2016. Étude au champ des potentiels agronomiques, méthanogènes et environnementaux de cultures intermédiaires. Rapport. 61p.
- Protin P-V., Corre-Hellou G., Naudin C., Trochard R., 2009. Impact des pratiques de fertilisation sur la productivité des prairies et mélanges céréales-protéagineux et la qualité du fourrage. Fourrages, 198, 115-130.
- Rodriguez C., Carlsson G., Englund J-E., Flöhr A., Pelzer E., Jeuffroy M-H., Makowski D., Jensen E-S., 2020. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. European Journal of Agronomy, 118.
- Schneider A., Flénet F., Dumans P., Bonnin E., De Chezelles E., Jeuffroy M-H., Hayer F., Nemecek T., Carrouée B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza – Données récentes d'expérimentations et d'études. Oléagineux, Corps gras, Lipides, 17, 301-311.
- Scohy D., 2021. Mesurer l'humidité du fourrage en quelques secondes avec le testeur Base. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.web-agri.fr/fenaison/article/179371/mesurer-l-humidite-du-fourrage-enquelques-secondes-avec-le-testeur-base>. Consulté le 17/08/2021.
- Terres Inovia, 2018. Guide de culture Féverole 2018. Note technique. 21p.
- Teixeira Franco R., 2017. Optimisation des pratiques de gestion des déchets agricoles en lien avec leur valorisation par méthanisation. Lyon : Université, thèse de doctorat.
- Tribouillois H., Fort F., Cruz P., Charles R., Flores O., Garnier E., Justes E., 2015. A Functional Characterisation of a Wide Range of Cover Crop Species : Growth and Nitrogen Acquisition Rates, Leaf Traits and Ecological Strategies. PLoS ONE, 10 : 3
- Tribouillois H., Bedoussac L., Couëdel A., Justes E., 2017. Acquisition des ressources et production de services écosystémiques par les mélanges bi-spécifiques de cultures intermédiaires. Innovations Agronomiques, 62, 1-16.
- Uijttewaal A., Joulié I., Delbecque D., Fesneau A., Fortino G., Jeulin T., Olivier F., 2018. Récolte précoce et conservation en ensilage des mélanges céréaliers riches en protéagineux. Fourrages, 234, 121-130.
- Uijttewaal A., 2020. Comprendre la cinétique de séchage du fourrage au champ. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.arvalis-infos.fr/comprendre-la-cinétique-de-sechage-du-fourrage-au-champ-@/view-13284-arvarticle.html>. Consulté le 23/03/2021.
- Violle C., Navas M-L., Vile D., Kazakou E., Fortunel C., Hummel I., Garnier E., 2007. Let the concept of trait be functional ! Oikos, 116, 882-892.
- Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J-F., Ferrer A., Peigné J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development, 34, 1-20.
- Willey R.W., 1979. Intercropping – Its importance and Research Needs: Part 1 Competition and Yield advantages. Field Crop Abstracts, 32, 1-10.

Annexes

Annexe 1. Guide d'enquête – Associations céréales/légumineuses en CIVE d'hiver	I
Annexe 2. Résultats de l'enquête – Associations céréales/légumineuses en CIVE d'hiver	III
Annexe 3. Barème des tarifs utilisés pour le calcul de la marge semi-nette des CIVE	IV
Annexe 4. Résultats de l'ANOVA à deux facteurs pour le rendement des CIVE selon les espèces implantées et la dose d'azote apportée	V
Annexe 5. Résultats du Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison du taux de MS des CIVE selon les espèces implantées	V
Annexe 6. Résultats des ANOVA à un facteur pour la comparaison des couvertures du sol selon les CIVE sur l'essai en micro-parcelles de Lusignan	VI
Annexe 7. Résultats de l'ANOVA pour la comparaison des coûts de production et du test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des marges semi-nettes selon les CIVE	VII

Annexe 1. Guide d'enquête – Associations céréales/légumineuses en CIVE d'hiver

Actuellement en stage à la Chambre Régionale d'Agriculture de Nouvelle-Aquitaine dans le cadre de ma formation d'ingénieur en agriculture, je réalise une enquête auprès d'une dizaine d'agriculteurs sur les associations céréales/légumineuses pour produire des CIVE d'hiver. Cette enquête s'inscrit dans le cadre du projet PAMPA qui vise à identifier les intérêts agronomiques, environnementaux et économiques des CIVE d'hiver en association. Plus précisément, l'objectif de cette enquête est de recueillir des informations sur : (i) les itinéraires techniques des CIVE d'hiver en association, (ii) les intérêts et inconvénients par rapport à des céréales pures, (iii) les difficultés rencontrées ou encore (iv) les freins à la mise en place d'associations. L'entretien durera au maximum 1h.

1. Présentation de l'exploitation					
Nom et coordonnées					
Activités	SAU : Cultures (assolement): Animaux :				
Mode de production	Conventionnel/ACS/AB				
Type de sol	RU : < 75 mm ; 75- 130 mm ; > 130 mm Texture de surface : limon / argile / sable % cailloux Hydromorphie : oui/non Battance : oui / non				
Méthaniseur	Date de mise en service : Type : Injection/cogénération Taille/kwatt : Intrants/% de CIVE : Surface ou quantité nécessaire en CIVE ? :				
2. Mise en place des CIVE					
Gestion des dérobées (intérêts, valorisation)					
CIVE hiver (espèces)	Précédent	Suivant	Depuis quand ?	Surface	
3. ITK CIVE d'hiver en association					
Culture précédente	Date de récolte : Gestion des résidus :				
Interculture	Travail du sol : Date de semis : Espèces : Fertilisation : Méthode de destruction/gestion des résidus : (grammage si glyphosate)				
	CIVE d'hiver				
	Semis	Date :	Pourquoi ? :		
		Espèces	Variétés	Densité (kg/ha)	Pourquoi ?
		Préparation du sol : Technique de semis : Conditions de réussite : (profondeur semis, pluie,...)			
Fertilisation et gestion des bioagresseurs (avant et pendant CIVE)		Produit/Quantité (valeurs fertilisantes)		Date	Objectif
Récolte	Période : (récolte étalée ?)	Pourquoi ? :			
	Stade de récolte (objectif, repères visuels ?) :				
	Rendement : (unité et %MS)				
	Méthode de récolte (préfanage, détermination durée séchage) :				
	Critère de qualité de la récolte (%MS, potentiel méthanogène, valeur fourragère...) :				

Culture suivante	Date de semis (objectif) :
	Technique de semis :
	Irrigation :

4. Intérêts/Inconvénients des associations par rapport aux cultures pures	
Quelles modifications de l'ITK par rapport à une culture pure ? (Fertilisation, dates de semis et récolte, méthode de récolte, rendement, coût)	Fertilisation : -/=+ Date de semis : +précoce/-/+tardive Date de récolte : +précoce/-/+tardive Méthode de récolte : similaire/différente Rendement : -/=+ %MS : -/=+ Coût : -/=+
Quelles difficultés techniques rencontrez-vous en mettant en place les associations ?	
Pourquoi mettre en place des associations ? Quels avantages ?	
Visez-vous un double débouché ?	
Quels impacts sur la gestion des bioagresseurs ? (adventices, maladies, ravageurs) Et à l'échelle du SdC ?	Adventices : -/=+ Maladies : -/=+ Ravageurs : -/=+
Quels impacts sur la culture suivante par rapport à une céréale pure ? (choix de la culture suivante, azote, eau)	
Quelles difficultés rencontrez-vous pour le stockage des CIVE en association ? (%MS, conservation, mise en tas, jus)	
La valorisation par la méthanisation est-elle similaire ? (potentiel méthanogène, réussite du processus de méthanisation, qualité du digestat)	
Quelles connaissances manquent pour mettre en place des CIVE en association ? Qu'aimeriez-vous savoir ?	
Des idées d'associations qu'il aimerait essayer à l'avenir ?	

Dans le cas où l'agriculteur ne met pas en place de CIVE en association

3bis. Freins à la mise en place de CIVE en association	
Avez-vous déjà mis en place des CIVE en association ?	
Si oui, pour quelles raisons ? Pourquoi avez-vous arrêté ?	
Si non, pourquoi ? Y-a-t-il des inconvénients selon vous (manque de connaissance, pas d'intérêt, coût, rendement non amélioré, %MS plus faible,...) ?	
De quoi auriez-vous besoin pour en implanter (de nouveau) ? (Plus de références, conseil technique,...)	

Annexe 2. Résultats de l'enquête – Associations céréales/légumineuses en CIVE d'hiver

Cette enquête a été réalisée par entretiens téléphoniques auprès de douze agriculteurs, majoritairement en polyculture-élevage, dont les contacts ont été fournis par des conseillers des Chambres d'Agriculture départementales des régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire. Parmi ces douze agriculteurs, neuf produisent des CIVE d'hiver en association céréales/légumineuses et trois agriculteurs les produisent en céréales pures. Cette proportion s'explique par le fait que l'enquête ait été principalement dirigée vers les agriculteurs produisant des CIVE en associations céréales/légumineuses.

Tout d'abord, en ce qui concerne l'itinéraire technique des CIVE, le triticale et le seigle fourrager sont les deux espèces de céréales qui sont le plus souvent utilisées, seules ou associées. Cela confirme le potentiel de ces deux espèces pour produire des CIVE. D'autres espèces comme l'orge ou l'avoine sont utilisées par les agriculteurs de façon plus minoritaire. Concernant les légumineuses, la vesce commune, la féverole et le pois fourrager sont fréquemment utilisés dans les associations céréales/légumineuses. Les associations avec plus de trois espèces sont les plus couramment retrouvées.

L'itinéraire technique est plutôt simple, tous les agriculteurs s'accordent sur le fait qu'il s'agisse d'une culture sur laquelle le nombre d'interventions doit être limité pour qu'elle ne soit pas trop coûteuse.

Le semis des CIVE est similaire à celui des céréales à paille et ne présente pas de difficultés particulières. Il est réalisé entre mi-septembre et mi-octobre pour assurer une couverture rapide du sol et concurrencer les adventices à l'automne, afin de ne pas utiliser d'herbicides.

Concernant la fertilisation azotée, cinq de neuf agriculteurs produisant des associations font des apports organiques à l'automne à hauteur de 80 kg N/ha en moyenne, sous forme de fumier ou de digestat. Au printemps, les agriculteurs enquêtés qui produisent des associations apportent en moyenne 80 kg N/ha tandis que ceux qui produisent des CIVE en céréales pures apportent 90 kg N/ha. Seulement quatre agriculteurs utilisent uniquement des engrains organiques pour fertiliser leurs CIVE, ils produisent des associations. La fertilisation semble donc légèrement plus faible sur les associations que sur les céréales pures et se fait plus souvent avec des apports de matière organique. Pour la récolte, le préfanage est pratiqué chez la majorité des agriculteurs, en association ou non. Sa durée est variable selon le stade de récolte : jusqu'à deux jours en cas de récolte précoce et seulement une demi-journée en cas de récolte tardive. Les rendements des associations pratiquées par les agriculteurs oscillent entre 6 et 11 tMS/ha, ceux des céréales pures se situent entre 8 et 10 tMS/ha. Le taux de MS de la récolte ne semble pas être problématique, la conservation est similaire entre céréales pures et associées.

Ensuite, les agriculteurs produisant des associations céréales/légumineuses mettent en évidence divers avantages tels que la complémentarité entre les espèces qui permet d'assurer un rendement convenable face aux événements climatiques parfois rencontrés ou la faible sensibilité vis-à-vis des adventices et des ravageurs. De plus, la présence de céréales permet d'améliorer la structure du sol grâce à un système racinaire dense tandis que les légumineuses permettent d'apporter de l'azote au sein du SdC. L'un des avantages est également que la qualité alimentaire des associations permet de les utiliser en tant que fourrages pour les ruminants, il s'agit d'une culture à double débouché.

Enfin, plusieurs freins aux associations céréales/légumineuses sont évoqués par les agriculteurs. Le principal frein évoqué par la plupart des agriculteurs, mettant en place des associations ou non, est le manque de connaissance et de références techniques sur les espèces à associer dans les différentes situations pédoclimatiques ou sur les itinéraires techniques les plus adaptés. De plus, le coût supérieur des semences de légumineuses est également un frein que certains agriculteurs ont levé en produisant eux-mêmes leurs semences. Pour les agriculteurs qui ne mettent pas en place d'associations, les freins cités sont les rendements inférieurs aux céréales pures notamment en cas de récolte précoce et la qualité fourragère peu satisfaisante malgré la présence de légumineuse

Annexe 3. Barème des tarifs utilisés pour le calcul de la marge semi-nette des CIVE

Tableau 1 : Tarifs des opérations culturales (hors main d'œuvre)
 (Source : APCA, 2020, *Coûts des opérations culturelles 2020 des matériels agricoles ; Enquête ACE Méthanisation, 2020*)

Matériel	Tarif hors main d'œuvre (€/ha)	Détail
Charrue portée 4-5 corps	53,8	Moyenne des charrues portées de 4 et 5 corps
Déchaumeur à dents	23,3	Moyenne des déchaumeurs à dents de 3 à 6m
Déchaumeur à disques	23,5	Moyenne des déchaumeurs à disques de 3 à 6m
Herse rotative	35,4	Moyenne des herses rotatives de 3,5 à 6m
Semoir TCS	31,4	Moyenne des semoirs à dents et à disques de 4 à 6m
Combiné de semis	45,9	Moyenne des combinés de semis de 3 à 6m intégré ou non
Semoir SD	33,4	Moyenne des semoirs pour SD et SDSCV de 3 à 6m
Pulvérisateurs	8	Moyenne des pulvérisateurs portés de 18 à 28m
Epandeur engrais	5,3	Moyenne des distributeurs d'engrais portés de 15 à 36m
Epandeur lisier	60,8	Moyenne des épandeurs à lisiers avec pendillars de 12 à 18m, à raison de 30m³/ha
Epandeur fumier	33,4	Moyenne des épandeurs à fumiers avec hérissons verticaux de 8 à 16t, à raison de 25t/ha
Récolte par préfanage (transport et mise en silo compris)	275	Résultats d'une enquête réalisée en 2020 auprès de 16 agriculteurs (ACE Méthanisation)

Tableau 2 : Tarifs des semences
 (Source : SYSTERRE®)

Espèces	Tarif (€/kg)
Seigle	1,2
Triticale	0,74
Féverole	0,9

Tableau 3 : Tarifs des engrains et produits phytosanitaires
 (Source : SYSTERRE®)

Produits	Tarif
Ammonitrat 33,5	0,8 €/uN
Anti-limaces	4 €/kg

Tableau 4 : Prix de vente des CIVE et coût de compensation des exportations P et K selon le mode de valorisation de la CIVE

(Source : COMIFER. 2009. Grille des exportations P et K des cultures : Enquête Ace Méthanisation. 2020)

Mode de valorisation	Prix de vente (€/tMS)	Coût de compensation des exportations (€/tMS)
Avec retour de digestat	90	0
Sans retour de digestat	110	25*

* Compensation des exportations de 6 kg/tMS en P et de 20 kg/tMS en K (valeur COMIFER pour des fourrages et données ACE Méthanisation), à raison de 0,75 €/kg de P et K soit 20 €/tMS de fertilisation P et K. Ajout de 5 € de coût d'épandage, soit un total de 25 €/tMS.

Annexe 4. Résultats de l'ANOVA à deux facteurs pour le rendement des CIVE selon les espèces implantées et la dose d'azote apportée

```
> modelrdt<-aov(Rendement~Especies+DoseN+Especies*DoseN)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Especies          3   38.5   12.84   1.593    0.192
DoseN             2  198.9   99.45  12.337 8.35e-06 ***
Especies:DoseN   6   12.7    2.12   0.264    0.953
Residuals        220 1773.4    8.06
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

- Test de Newman-Keuls pour la comparaison des rendements selon la dose d'azote apportée

> NKDoseN<-SNK.test(Rendement,DoseN,df.residual(modelrdt), deviance
(modelrdt)/df.residual(modelrdt))

$statistics
  MSerror   Df     Mean       CV
  8.060731 220 6.598677 43.02594

$parameters
  test name.t ntr alpha
  SNK   DoseN   3   0.05

$means
  Rendement      std   r Min  Max   Q25   Q50   Q75
0      5.451062 2.858365 81 0.4 12.5 3.347 5.02 7.713
0,5X  6.689899 2.842137 69 1.4 13.5 5.000 6.10 8.503
X     7.655537 2.770616 82 2.2 17.3 5.900 7.50 9.500

$groups
  Rendement groups
X      7.655537    a
0,5X  6.689899    b
0      5.451062    c
```

Annexe 5. Résultats du Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison du taux de MS des CIVE selon les espèces implantées

```
> kruskal.test(TauxMS~Especies)
  Kruskal-Wallis rank sum test
data: TauxMS by Especies
Kruskal-Wallis chi-squared = 34.407, df = 3, p-value = 1.625e-07

- Comparaison de rangs de Wilcoxon

> pairwise.wilcox.test(TauxMS,Especies,p.adjust.method = "holm")
  Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test
data: TauxMS and Especies
            Seigle  SeigleFeverole  Triticale
SeigleFeverole  0.184    -           -
Triticale      9.1e-05 1.0e-06    -
TriticaleFeverole 0.184   0.011      0.011

P value adjustment method: holm
```

Annexe 6. Résultats des ANOVA à un facteur pour la comparaison des couvertures du sol selon les CIVE sur l'essai en micro-parcelles de Lusignan

ANOVA Couverture du sol le 20/11/2020

```
> modelCouv<-aov(Couv~Especies)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Especies      5 1047.7 209.54   7.699 9.34e-05 ***
Residuals    30  816.5   27.22
---
Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

- Test de Newman-Keuls pour la comparaison des couvertures du sol selon les CIVE
>NKEspecies<-SNK.test(Couv,Especies,df.residual(modelCouv),deviance (modelCouv)/
df.residual(modelCouv))

$statistics                                $parameters
  MSerror Df      Mean      CV      test name.t ntr alpha
  36.98344 30 26.38333 23.05016      SNK Especies 6  0.05

$means          Couv      std r  Min  Max   Q25   Q50   Q75
Bikini        35.95000 3.281920 6 33.1 41.6 34.000 34.45 37.300
Bikini+Fev   27.01667 7.725391 6 17.8 35.5 20.700 27.30 33.600
Meteil         23.85000 2.405618 6 20.6 27.1 22.475 23.55 25.525
Vitallo       29.41667 3.593002 6 25.6 35.5 27.125 28.75 30.675
Vitallo+Fev  23.25000 7.436061 6 17.0 33.4 17.675 19.90 29.250
Vitallo+Vesce 18.81667 4.343002 6 15.3 26.9 15.925 17.45 19.650

$groups          Couv groups
Bikini        35.95000     a
Vitallo       29.41667    ab
Bikini+Fev   27.01667    bc
Meteil         23.85000    bc
Vitallo+Fev  23.25000    bc
Vitallo+Vesce 18.81667     c
```

ANOVA Couverture du sol le 16/02/2021

```
> modelCouv<-aov(Couv~Especies)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Especies      5   1177  235.33   6.363 0.000387 ***
Residuals    30   1110   36.98
---
Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

- Test de Newman-Keuls pour la comparaison des couvertures du sol selon les CIVE
>NKEspecies<-SNK.test(Couv,Especies,df.residual(modelCouv),deviance (modelCouv)/
df.residual(modelCouv))

$statistics                                $parameters
  MSerror Df      Mean      CV      test name.t ntr alpha
  36.98344 30 62.11111 9.791165      SNK Especies 6  0.05

$means          Couv      std r  Min  Max   Q25   Q50   Q75
Bikini        69.10000 4.222322 6 63.1 76.1 67.775 68.80 69.975
Bikini+Fev   68.36667 7.577511 6 59.2 79.3 62.475 69.60 71.700
Meteil         64.48333 5.877216 6 56.6 69.0 59.775 67.55 68.650
Vitallo       53.30000 3.298485 6 48.4 57.6 51.725 53.30 55.325
Vitallo+Fev  59.63333 7.741748 6 51.5 71.1 54.250 57.45 64.700
Vitallo+Vesce 57.78333 6.426326 6 50.6 65.6 53.725 55.60 63.550
```

```
$groups      Couv groups
Bikini      69.10000    a
Bikini+Fev  68.36667    a
Meteil       64.48333    ab
Vitallo+Fev 59.63333    abc
Vitallo+Vesce 57.78333    bc
Vitallo      53.30000    c
```

Annexe 7. Résultats de l'ANOVA pour la comparaison des coûts de production et du test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des marges semi-nettes selon les CIVE

Couts de production

```
> modelMS<-aov(CP~CIVE)
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
CIVE        3   2148   716.1   2.955  0.0368 *
Residuals  88  21327   242.3
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

- Comparaison de rangs de Newman-Keuls

> NKEspecies<-SNK.test(CP,CIVE,df.residual(modelMS),deviance(modelMS)/df.residual(m
odelMS),main="Test de Newman et Keuls")

$statistics
  MSerror Df      Mean      CV
  242.3467 88  81.46739 19.10886

$parameters
  test name.t ntr alpha
  SNK   CIVE   4  0.05

$means      CP      std  r Min Max   Q25   Q50   Q75
S/F        84.30435 15.72327 23  52 114 74.00 87.0  94.5
Seigle     88.09091 16.74716 22  50 107 73.25 96.5 100.0
T/F        78.00000 14.37691 24  54 106 67.00 79.0  87.5
Triticale 75.91304 15.43877 23  47 104 66.00 74.0  87.5

$groups      CP groups
Seigle     88.09091    a
S/F        84.30435    ab
T/F        78.00000    ab
Triticale 75.91304    b
```

Marges semi-nettes

```
> kruskal.test(tab$MSN~tab$CIVE)
  Kruskal-Wallis rank sum test
data: tab$MSN by tab$CIVE
Kruskal-Wallis chi-squared = 9.4594, df = 3, p-value = 0.02377

- Comparaison de rangs de Wilcoxon

> pairwise.wilcox.test(tab$MSN,tab$CIVE,p.adjust.method = "holm")
  Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test
data: tab$MSN and tab$CIVE
  S/F  Seigle T/F
Seigle 0.755 - -
T/F    0.755 0.078 -
Triticale 0.331 0.044 0.755

P value adjustment method: holm
```