

Introduire la féverole en association aux céréales pour produire des CIVE d'hiver



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

Article de Vulgarisation Scientifique

Promotion 2016

Alexis MOREAU

Elève-Ingénieur ESA

Date : 08/09/2021

Patron de mémoire : Nathalie CASSAGNE

Choix de la revue ciblée

La revue choisie pour l'article de vulgarisation scientifique est la revue « Perspectives Agricoles ». Ce choix a été fait pour deux principales raisons.

La première raison est que cet article vise à valoriser les connaissances et les références produites dans le cadre de la première année du projet PAMPA, dans lequel s'inscrit mon stage, en s'adressant principalement à des agriculteurs et des conseillers techniques du secteur des grandes cultures. Or, « Perspectives Agricoles » est une revue agricole spécialisée sur les grandes cultures dont les articles s'adressent aux agriculteurs, aux conseillers et aux ingénieurs des coopératives, négociés ou CETA, ce qui correspond donc au public visé. De plus, les articles publiés permettent souvent d'informer ce public sur les résultats d'études et de projets de recherche récents ainsi que de conseiller les agriculteurs sur les pratiques innovantes.

La seconde raison pour laquelle cette revue a été choisie est qu'elle possède une approche scientifique. En effet, des données scientifiques sont fréquemment présentées et permettent d'illustrer ou de chiffrer les informations que souhaite véhiculer l'article. Les articles de cette revue sont rédigés par des conseillers ou ingénieurs agricoles eux-mêmes et non pas par des journalistes, ce qui explique ce discours plutôt scientifique. De plus, l'utilisation de graphiques, de tableaux ou de photographies pour illustrer des résultats est courante et des termes techniques peuvent être employés puisque la revue s'adresse à un public agricole averti.

La revue « Perspectives Agricoles » se compose de plusieurs rubriques. Parmi celles-ci, la rubrique « Dossier » regroupe plusieurs articles consacrés à une même thématique. Cet article sur les Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) d'hiver pourrait donc s'intégrer au sein d'un « Dossier » portant sur les CIVE, avec un autre article sur les CIVE d'été par exemple. Cet article vise à décrire les différences entre les associations céréale/féverole et les céréales pures sur les éléments importants dans le cas des CIVE d'hiver (rendement en biomasse, taux de matière sèche, conduite technique, ...). Pour cela, il s'appuie sur les résultats issus de mon stage.

Introduire la féverole en association aux céréales pour produire des CIVE d'hiver



Les associations céréales/légumineuses sont identifiées comme un levier pour réduire les problèmes observés actuellement sur les CIVE d'hiver.

Avec le développement de la méthanisation, les CIVE d'hiver sont de plus en plus fréquentes au sein des rotations céréalier. Majoritairement produites avec des céréales pures, elles font face à certains problèmes que les associations céréales/légumineuses pourraient résoudre. Suite à la première année d'expérimentations du projet PAMPA, de grandes tendances encourageantes se dégagent et laissent entrevoir un intérêt des associations céréale/féverole.

Semées à l'automne et récoltées en début de printemps, les Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) d'hiver permettent de valoriser une interculture longue et sont de plus en plus mobilisées au sein de la filière méthanisation. Avec un fort potentiel de rendement, les céréales (seigle, orge, triticale, avoine) sont couramment utilisées mais elles font face à divers problèmes comme une sensibilité face aux bioagresseurs, une irrégularité de rendements face aux aléas climatiques ou encore une pénalisation de la culture suivante. Pour y répondre, les associations céréales/légumineuses sont identifiées comme une solution. En effet, grâce à la complémentarité des espèces, elles devraient être

moins sensibles aux bioagresseurs et aux aléas climatiques et moins exigeantes en fertilisation azotée.

Afin d'évaluer leurs intérêts, un réseau d'essais de CIVE d'hiver a été mis en place sur 20 parcelles des régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire dans le cadre du projet PAMPA⁽¹⁾. Sur ces essais, du seigle fourrager et du triticale ont été implantés seuls et associés à la féverole d'hiver. Malgré des rendements variables selon les essais et un développement de la féverole faible, les résultats de cette première année d'expérimentations mettent en évidence des grandes tendances encourageantes pour le développement des associations céréale/féverole en tant que CIVE d'hiver.

Des rendements au moins équivalents aux céréales pures

A l'échelle du réseau d'essais, les associations atteignent des rendements proches voire supérieurs aux céréales pures. Sans fertilisation azotée, les rendements en matière sèche des associations sont en moyenne supérieurs de 18 % à ceux des céréales pures (*figure 1*). Puis, avec l'augmentation de la fertilisation azotée, cet écart diminue jusqu'à atteindre 1 % avec des apports de 80 à 100 kg N/ha.

Néanmoins, ces résultats cachent des disparités entre les essais. Lorsque le développement de la féverole est faible (< 5 % du rendement), les associations ne produisent pas plus que les céréales pures sans fertilisation azotée. Toutefois, aucune situation dans laquelle les associations pénalisent fortement le rendement n'a été observée.

Les associations présentent donc des potentiels de rendements équivalents aux céréales pures et s'avèrent très intéressantes dans les situations où l'azote est limitant, comme en agriculture biologique.

Enfin, le triticale a des rendements supérieurs au seigle dans la majorité des essais. Cette différence peut s'expliquer par une précocité plus importante d'une dizaine de jours de la variété de triticale (Bikini) par rapport à la variété de seigle (Vitallo).



De légères modifications de l'itinéraire technique

Les résultats montrent que l'introduction de la féverole offre des possibilités de réduction des apports de fertilisation azotée. En effet, l'association seigle/féverole atteint un rendement moyen de 7,5 tMS/ha avec un apport de 60 kg N/ha, ce qui est équivalent au seigle pur avec 100 kg N/ha (*figure 2*). L'association triticale/féverole ne permet pas de produire autant que le triticale pur en réduisant la fertilisation azotée mais atteint tout de même un rendement moyen de 7 tMS/ha avec un apport de 60 kg N/ha.

De plus, la féverole est moins adaptée pour des niveaux de fertilisation azotée élevés. Plus la fertilisation est importante, plus sa part dans le rendement diminue au profit de la céréale.

RENDEMENT DES CIVE: de 4 à 8 tMS/ha en moyenne mais une forte hétérogénéité entre les essais

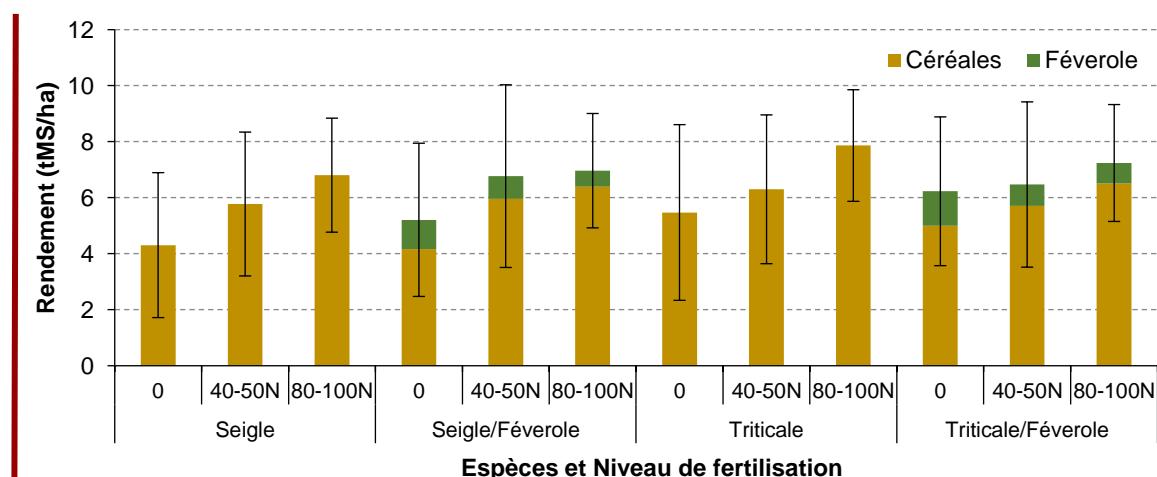


Figure 1: Rendement de CIVE d'hiver selon les espèces et le niveau de fertilisation azotée.
Réseau d'essais du projet PAMPA (20 essais), 2021. 40-50N : apport de 40 ou 50 kg N/ha, 80-100N : apport de 80 ou 100 kg N/ha.

FERTILISATION : un rendement équivalent avec 40 kg N/ha en moins

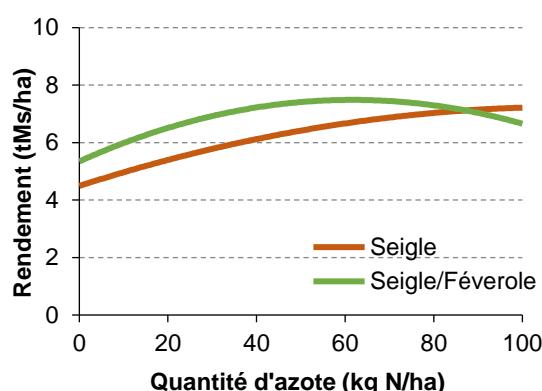


Figure 2 : Rendement de CIVE d'hiver selon la quantité d'azote apportée. Réseau d'essais du projet PAMPA (20 essais), 2021.

En céréales pures, le gain de rendement entre l'apport de 80 et 100 kg N/ha est faible et ne justifie pas toujours l'intérêt d'un apport de 100 kg N/ha.

La période de semis à privilégier pour les céréales associées à la féverole est similaire à celles des céréales pures. Il s'agit de la période fin septembre/mi-octobre. Les rendements moyens atteints sont compris entre 6 et 8,5 tMS/ha. Passé cette période, le potentiel de rendement diminue pour atteindre en moyenne 2 à 4 tMS/ha fin novembre.

Aucune intervention phytosanitaire n'a été réalisée sur ces CIVE.

TAUX DE MS : une réduction pas toujours significative

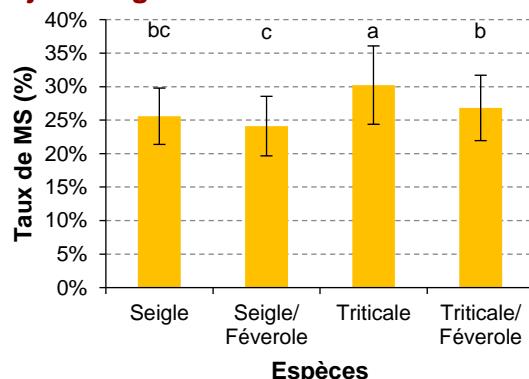


Figure 3 : Taux de MS de CIVE d'hiver selon les espèces. Réseau d'essais du projet PAMPA (20 essais), 2021. Analyse statistique par le test de Wilcoxon : les valeurs avec des lettres différentes sont significativement différentes les unes des autres; au contraire, elles sont équivalentes quand les lettres sont les mêmes.

Des rendements hétérogènes expliqués par la diversité des contextes d'essais

Les 20 essais du réseau PAMPA sont situés sur l'ensemble de la région Nouvelle-Aquitaine, des Pyrénées-Atlantiques aux Deux-Sèvres, et dans le département d'Indre-et-Loire. Cette répartition géographique offre des conditions pédoclimatiques très variées (type de sol, température, ...) qui conduisent à une forte hétérogénéité des rendements selon les essais.

Le type de sol est un facteur qui impacte le rendement des CIVE. Les rendements les plus élevés sont souvent obtenus sur les sols limoneux tandis que les sols argileux et sableux ont des rendements équivalents et moins élevés que les sols limoneux. En sols sableux, les différences entre espèces sont très faibles contrairement aux deux autres types de sol.

La date de semis, différente selon les essais (du 22/09/2020 au 30/11/2020), explique aussi la variabilité des rendements.

Un rendement faible de la féverole (< 1 tMS/ha) a été observé sur la majorité des essais. Cependant, aucun facteur n'a été identifié pour expliquer ces faibles rendements. L'effet année sera réduit grâce à une seconde année d'expérimentations.

Une faible réduction du taux de matière sèche

Les résultats mettent en évidence un taux de matière sèche (MS) inférieur pour les CIVE avec féverole par rapport aux céréales pures. Cette différence est due à l'humidité plus importante de la légumineuse et est plus ou moins marquée selon les associations (figure 3). L'association tritcale/féverole a un taux de MS en moyenne inférieur de 4 points à celui du tritcale alors que la différence entre le seigle et le mélange seigle/féverole n'est que de 1,5 points. Pour une même proportion de féverole dans l'association (ici 14 %), plus le différentiel de taux de MS entre les deux espèces du mélange est important, plus le taux de MS est donc réduit. De même, dans les cas où la

part de féverole dans le mélange est importante, la réduction du taux de MS est plus forte. Néanmoins, aucune relation entre la part de féverole et le taux de MS n'a été établie.

Les CIVE doivent être récoltées entre 28 et 35 % de MS pour assurer la conservation de l'ensilage tout en limitant les pertes de jus. Tout comme les céréales pures, les associations céréale/féverole permettent d'atteindre ce taux de MS sans difficultés particulières suite à un séchage au champ (préfanage). La durée de ce préfanage peut être variable (d'une demi-journée à deux jours) selon les conditions météorologiques et le taux de MS à la fauche. L'étude du séchage au champ montre que l'association seigle/féverole atteint le taux de MS optimal pour la récolte quelques heures après le seigle pur. Toutefois, ces résultats ont été obtenus avec un développement faible de la féverole et pourraient être différents si la légumineuse représentait une part plus importante du rendement.

Par ailleurs, l'association triticale/féverole présente l'intérêt de pouvoir être récoltée plus tardivement que le triticale pur qui, seul, atteint rapidement un taux de MS supérieur à l'optimum de récolte. Cette caractéristique peut être mobilisée pour étaler les récoltes des CIVE.



Un impact peu favorable sur l'état du sol à la récolte à confirmer

Dans la plupart des essais, les reliquats azotés ainsi que le taux d'humidité du sol à la récolte sont équivalents entre céréales pures et associées, voire légèrement inférieurs après associations. L'état du sol pour la culture suivante ne semble donc pas amélioré par l'association mais des études plus précises sont nécessaires pour confirmer cela. En effet, un essai montre une tendance inverse : avec un développement important de la féverole, les reliquats azotés après l'association seigle/féverole sont plus élevés que ceux observés après le seigle pur.

Un intérêt économique à approfondir

Il est nécessaire de viser un objectif de rendement supérieur à 6 tMS/ha afin d'assurer la rentabilité de la CIVE. D'après ces essais, cet objectif est atteint avec un coût de production⁽²⁾ équivalent entre céréales pures et associées, d'environ 80 €/tMS. Pour les rendements supérieurs à 6 tMS/ha, la marge semi-nette⁽²⁾ moyenne de l'association seigle/féverole (231 €/ha) est supérieure à celle du seigle pur (184 €/ha). Au contraire, celles du triticale et de l'association triticale/féverole sont équivalentes, et sont respectivement de 323 €/ha et 314 €/ha.

Les associations seigle/féverole et triticale/féverole sont adaptées pour produire des CIVE d'hiver dans le Centre-Ouest de la France. L'association qui présente le plus d'avantages par rapport à la céréale pure est le seigle/féverole (réduction de la fertilisation azotée, hausse de la marge semi-nette, ...). L'ensemble de ces résultats sera complété et approfondi avec une seconde année d'expérimentations. D'autres espèces de légumineuses comme la vesce velue pourraient également être étudiées.

⁽¹⁾Projet FranceAgriMer Expérimentation 2020 coordonné par la Chambre d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine avec de nombreux partenaires (12 Chambres d'Agriculture, ACE Méthanisation, Vienne Agri Métha, ...)

⁽²⁾Coûts de production et marges semi-nettes hors main d'œuvre de l'implantation au stockage de la CIVE.

Alexis Moreau

ANNEXES

ANNEXE 1. Sommaire du mémoire de fin d'études

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
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	

ANNEXE 2. Problématique du mémoire de fin d'études

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 diminuant leur sensibilité vis-à-vis des bioagresseurs, réduisant l'utilisation d'engrais azotés et de limitant 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 durant 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 engrais azotés par rapport aux céréales, les pratiques de fertilisation azotée des agriculteurs semblent 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. Cela ne semble donc pas être un frein pour le développement des CIVE d'hiver en associations. Cet impact n'a néanmoins jamais été quantifié.

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 ?**

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 précolement 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.

ANNEXE 3. Schéma de la méthodologie du mémoire de fin d'études

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 ?

Choix de 3 espèces étudiées : seigle fourrager, triticale et féverole d'hiver

Sous-questions & hypothèses	Comment l'association impacte le rendement ? - H1 : A fertilisation réduite, l'association présente des rendements similaires aux céréales pures fertilisées.	Quelle est l'efficacité de l'association vis-à-vis de la gestion des adventices ? - H3 : L'association permet de limiter la biomasse d'adventices à la récolte.	Quel est l'impact de l'association sur l'état du sol 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.	Comment l'association 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.	Comment l'association impacte le taux de MS et la dynamique de séchage à la récolte ? - H2 : La présence de féverole diminue le taux de MS et nécessite d'allonger la durée du préfanage.
Dispositif expérimental					
Réseau de 24 parcelles d'essais en Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire 12 modalités : 4 CIVE (seigle, seigle/féverole, triticale, triticale/féverole) et 3 niveaux de fertilisation + Essai en micro-parcelles avec 28 modalités : 7 CIVE et 4 niveaux de fertilisation (sans répétitions)					
Mesures & Analyse des résultats	Mesure des biomasses à la récolte sur toutes les modalités et tous les essais. <i>Comparaison des entre céréales et céréale/féverole selon le niveau de fertilisation (ANOVA).</i>	Mesure de la biomasse d'adventices à la récolte sur toutes les modalités et tous les essais. <i>Etude des différences de biomasses d'adventices à la récolte entre céréales et céréale/féverole si la présence d'adventices est significative.</i>	Mesure des reliquats azotés et de l'humidité du sol en céréale pure et associée sur 14 essais. <i>Etude des différences de reliquats azotés et d'humidité du sol entre céréales et céréale/féverole.</i>	Recueil des itinéraires techniques de chaque essai. <i>Calcul des coûts de production et des marges semi-nettes sur tous les essais et étude des différences entre céréales et céréale/féverole.</i>	Mesure du taux de MS à la récolte sur tous les essais <i>Comparaison des taux de MS entre céréales et céréale/féverole selon le niveau de fertilisation (ANOVA).</i> Mesure de la dynamique de séchage des andains sur l'essai en micro-parcelles. <i>Etude des différences de dynamique de séchage entre seigle et seigle/féverole.</i>

ANNEXE 4. Liste bibliographique du mémoire de fin d'études

- 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_MementoAgricole2019_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-nouvelleaquitaine.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-nouvelleaquitaine.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., Gauffreteau A., Goldringer I., Lata J-C., Le Roux X., Niboyet A., Porcher E., 2017. Designing mixtures of varieties for multifunctionnal 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., Bouthet 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_experimentations_2018_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_experimentations_2019_essais_couverts_vegetaux.pdf. Consulté le 16/03/2021.
- Chambre d'Agriculture du Gers, 2018. Les méteils fourragers – Conseils pour élaborer son mélange. Fiche technique, 6p.
- Chambre d'Agriculture du Gers, 2020. Foisns 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_Foisns_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., Uijtewaal A., 2018. Guide technique des mélanges fourrager 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-arvalis-infos.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., Hemptinne J-L., 2014. Is there an associational resistance of winter pea-durum wheat intercrops towards *Acyrtosiphon 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-en-quelques-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.