

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers Site de Rennes

Année universitaire : 2022-2023 Spécialité : Master Biologie Agrosociétés, parcours améliorations production et valorisation du végétal Spécialisation (et option éventuelle) : Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes	Mémoire de fin d'études d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) X de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2) d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)
---	--

Intérêts d'associer de la féverole avec des céréales pour produire des CIVE d'hiver dans les régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire

Par : Jason LASSINCE



Soutenu à Rennes, le 23 juin 2023

Devant le jury composé de :

Président : Matthieu Carof

Autres membres du jury (Safya Menasseri, Rapporteur)

Maître de stage : Nicolas Ferrand

Enseignant référent : Christine Bissuel

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers et l'université de Rennes

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation « Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France » disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Nicolas Ferrand, mon maître de stage, pour son encadrement bienveillant tout au long de mon travail. Ses précieux conseils et son soutien constant ont été essentiels pour mener à bien ce mémoire.

Je souhaite aussi remercier Sébastien Minette pour nos échanges enrichissants. Ses idées et sa contribution ont grandement enrichi ma réflexion sur ce sujet.

Merci également à Nicolas Dagorn de l'institut technique ARVALIS, pour son appui technique, son accompagnement et sa réactivité tout au long du projet.

Un grand merci aux équipes de la CRANA, de l'IDELE, de l'INRAe et du GEVES pour leur accueil chaleureux et leur convivialité. L'ambiance était agréable, ce qui a contribué à créer un environnement propice au travail.

Je tiens à remercier mes collègues de bureau, Quentin, Killian, Mélisande et Louise, pour leur soutien constant et leur collaboration fructueuse. Leurs présences et leurs échanges ont été d'une grande valeur tout au long de ce projet.

Enfin, mes remerciements vont à tous les acteurs qui ont contribué à la mise en place et au suivi des essais. Leurs engagements et leurs expertises ont été indispensables pour collecter les données nécessaires à cette étude.

Je suis profondément reconnaissant envers toutes ces personnes qui ont joué un rôle important dans la réalisation de ce mémoire. Leurs contributions ont été inestimables et ont contribué à enrichir mes connaissances et mon expérience professionnelle.

Table des matières

Lexique	1
1. Introduction	1
1.1. Contexte de la méthanisation en France	1
1.2. Etat des connaissances sur les CIVE d'hiver	1
1.3. Intérêts des associations céréales-légumineuses pour les performances agronomiques des CIVE	2
1.3.1. Potentiel méthanogène	2
1.3.2. Rendement et fertilisation azotée	2
1.3.3. Taux de matière sèche	4
1.3.4. La compétition avec les adventices	4
1.4. Intérêts des CIVE en associations céréale-légumineuses pour les performances agro-environnementales	4
1.4.1. Reliquats azotés	5
1.4.2. Humidité du sol	5
1.4.3. Impacts des CIVE sur le rendement de la culture suivante	6
1.5. Contexte du stage et hypothèses de travail	6
2. Matériels et méthodes	8
2.1. Présentation des essais	8
2.1.1. Dispositif expérimentale	8
2.1.2. Choix des essais à étudier	8
2.2. Réalisation des mesures	9
2.2.1. Mesures des biomasses, du taux de MS et des proportions de légumineuses à la récolte	9
2.2.2. Mesures des reliquats azotés et humidité du sol	9
2.2.3. Mesure de la teneur en azote de la biomasse aérienne	10
2.3. Analyse des données	10
2.3.1. Rendement	10
2.3.2. Proportion de légumineuses à la récolte	11
2.3.3. Taux de MS à la récolte	11
2.3.4. Biomasse d'adventices	11
2.3.5. Dynamique de l'azote avec retour de digestat	12
2.3.6. Etat du sol à la récolte	12
2.3.7. Intérêt économique de la CIVE	13
3. Résultats	14
3.1. Rendement	14
3.1.1. Production de biomasse	14
3.1.2. Proportion de légumineuses à la récolte	14
3.2. Taux de matière sèche	15
3.3. Dynamique de l'azote avec retour de digestat	15
3.4. Biomasse d'adventices récoltée	16
3.5. Etat du sol à la récolte	16
3.5.1. Impacts sur les reliquats azotés	16
3.5.2. Impacts sur l'humidité du sol à la récolte	17
3.6. Intérêts des associations pour le bilan économique des CIVE	17
4. Discussion et perspectives	18
4.1. L'association et la fertilisation impactent le rendement	18
4.1.1. L'association et fertilisation impactent la production de biomasse	18
4.2.2. Variabilité de la proportion de légumineuses	19
4.3. L'association impacte négativement le taux de MS	19
4.4. Comparaison des dynamiques de l'azote avec retour de digestat en présence ou non de féverole	20
4.5. Impacts des associations et de la fertilisation sur les biomasses d'adventices récoltées	21
4.6. Impacts des associations et de la fertilisation sur l'état du sol à la récolte	21
4.6.1. Impacts sur les reliquats azotés	21
4.6.2. Impacts sur l'humidité du sol	22
4.7. L'association impacte négativement le bilan économique des CIVE	22
4.8. Bilans des hypothèses	23
5. Conclusion	24
Liste de références bibliographiques	25
Annexe 1 – Tableau récapitulatif des essais	
Annexe 2 – Analyses des variances	
Annexe 3 – Complément de graphique	
Annexe 4 – Schémas dynamique de l'azote avec retour de digestat en culture pure céréales	
Annexe 5 – Schémas dynamique de l'azote avec retour de digestat en culture associée	

Table des figures

Figure 1 : Comparaison des successions culturales avec CIPAN et CIVE d'hiver.....	2
Figure 2 : Localisation des sites d'expérimentation au champ et en petites bandes.....	8
Figure 3 : Plan d'expérimentation en grandes bandes, protocole du projet PAMPA.....	8
Figure 4 : Graphiques montrant la distribution de la variable à expliquer : rendement.....	10
Figure 5 : Rendements en fonction de la fertilisation, pour chaque composition et année (n = 347)...	14
Figure 6 : Rendement en fonction du nombre de degrés-jours (n = 347).....	14
Figure 7 : Proportion de légumineuse en fonction de la fertilisation, de l'année de culture et de l'association (n = 154).....	14
Figure 8 : Taux de MS en fonction de la fertilisation, de la composition du couvert et de l'année de culture (n = 347)	15
Figure 9 : Schéma de la dynamique de l'azote avec retour de digestat pour une CIVE en seigle pur (50UN).....	15
Figure 10 : Schéma de la dynamique de l'azote avec retour de digestat pour une CIVE en association seigle-féverole (50UN).....	16
Figure 11 : Quantité d'adventice à la récolte en fonction de la fertilisation et de la composition du couvert (n = 266).....	16
Figure 12 : Reliquats azotés pour chaque essai en fonction de la composition de la CIVE et de la fertilisation (n = 28).....	16
Figure 13 : Humidité du sol à la récolte pour chaque essai en fonction de la composition de la CIVE et de la fertilisation (n = 34).....	17
Figure 14 : Histogramme des marges semi-nettes avec retour de digestat.....	17

Table des tableaux

Tableau 1 : Densités de semis en fonction des périodes, préconisés par la CRANA pour des CIVE d'hiver.....	8
Tableau 2 : Prix des charges et prix de ventes utilisées pour calculer la rentabilité de la CIVE.....	13
Tableau 3 : Récapitulatif des hypothèses du mémoire.....	23

Liste des abréviations

- CIVE : Culture Intermédiaire à Vocation Energétique
- CIPAN : Culture Intermédiaire Piège A Nitrate
- CIMS : Culture Intermédiaire Multi-Services
- CRANA : Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine
- PPE : Programmations Pluriannuelles de l'Energie
- EMAA : plan Energie Méthanisation Autonomie Azote
- UN : Unité d'azote, correspond à : kg N/ha
- t : Tonne
- MS : Matière Sèche
- ha : Hectare
- N₂ : Diazote

1. Introduction

1.1. Contexte de la méthanisation en France

Dans le contexte actuel de changement climatique, l'agriculture et l'énergie représentent deux enjeux majeurs. La méthanisation apparaît comme un levier car elle permet une meilleure valorisation de l'azote organique, de limiter la dépendance à l'azote de minéral à travers la production d'un digestat riche en azote minéral. Mais également une autonomie énergétique et une amélioration du bilan de gaz à effet de serre (Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et de la Forêt, 2013). Ainsi, le ministère de la Transition écologique et Solidaire, à travers la Programmations Pluriannuelles de l'Énergie (PPE), a pour objectif une augmentation de la production de biogaz (4 à 6 fois supérieures en 2028, par rapport à 2017).

Pour atteindre ces objectifs, le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et le ministère de la Transition écologique et solidaire ont lancé en 2013 le plan énergie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA). Ce dernier vise à développer davantage d'énergies renouvelables ancrées dans le territoire, à travers des méthaniseurs agricoles collectifs. Ces installations permettraient un complément de revenus pour les exploitants agricoles, ainsi qu'une substitution de l'azote minéral par de l'azote organique provenant du digestat (Bareha, 2018).

La méthanisation consiste en la digestion anaérobie de la matière organique par des micro-organismes (Bareha, 2018). Elle produit du biogaz qui pourra être utilisé comme combustible, composé de 50 % à 70 % de méthane, 20 % à 50 % de gaz carbonique ainsi que quelques traces d'autres gaz : NH₃, N₂, H₂S (ADEME, 2022). La France est le premier producteur de biogaz en Europe et la méthanisation continue de se développer, avec en 2017, 600 unités de méthanisation, contre 1700 fin 2022 (majoritairement des unités de cogénération : 900) (ADEME & OBSERV'ER, 2020; MéthaFrance, 2023).

Afin de limiter la concurrence avec la production alimentaire, les méthaniseurs peuvent être alimentés par des cultures principales à hauteur maximale de 15 % du tonnage des intrants par an (Marx, 2020). Ainsi, des Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétiques (CIVE) sont implantées et récoltées entre deux cultures principales pour approvisionner en substrat les unités de méthanisation. Elles permettent de produire 3 cultures en 2 ans : deux cultures alimentaires en plus de la CIVE. Elles peuvent être implantées en hiver avec un cycle long ou en été avec un cycle court (Marsac & Dagorn, 2021). À l'échelle de la France, les CIVE représentent 13 % de la ration annuelle totale des méthaniseurs (Avelin, 2022). La ration est très hétérogène selon les méthaniseurs et ils sont rarement alimentés uniquement par des CIVE. Fumiers, lisiers, coproduits et autres viennent compléter la ration des méthaniseurs.

1.2. Etat des connaissances sur les CIVE d'hiver

Les CIVE fournissent de nombreux services écosystémiques mais elles se distinguent des Cultures Intermédiaires Piège A Nitrate (CIPAN) et Cultures Intermédiaires Multi-Services (CIMS) par une exportation de la biomasse produite. De plus, les CIVE d'hiver sont généralement fertilisées, ce qui pose des questions concernant l'intensité de certains services, comme par exemple, l'effet de piège à nitrate. Elles apportent également une quantité plus réduite de bénéfices liés à l'incorporation de la biomasse dans le sol et l'exportation des résidus de culture peut limiter l'immobilisation de l'azote (Launay et al., 2022). D'autres inconvénients peuvent également être remarqués, tels que la réduction de l'humidité du sol, réduction du rendement de la culture suivante ou encore la plus forte compaction du sol (Launay et al., 2022). Concernant le digestat, ce dernier permet un retour de la matière organique et de l'azote sur la parcelle, mais il est susceptible d'entraîner des pertes par la volatilisation d'une partie de l'azote au moment de l'épandage (de 30 à 40 % de perte d'azote lors de l'épandage sur un colza par exemple (Decoopman et al., 2017)).

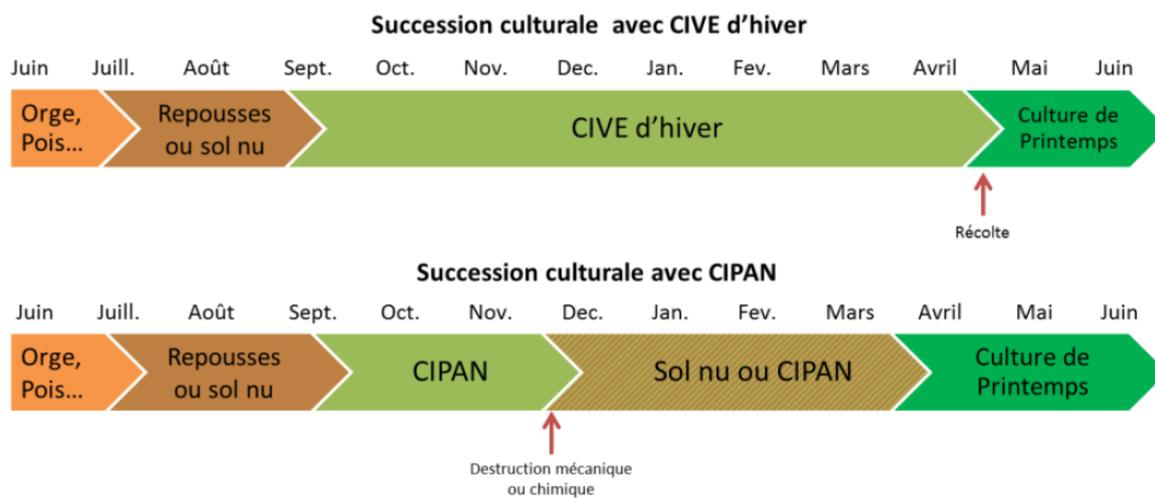


Figure 1 : Comparaison des successions culturales avec CIPAN et CIVE d'hiver

Les CIVE sont principalement constituées de céréales immatures (seigle, orge, avoine, triticales). Concernant le choix des espèces utilisées en CIVE d'hiver, les critères agronomiques sont les suivants : espèces non-gélives ; précocité ; forte production de biomasse ; sensibilité aux bioagresseurs ; sensibilité à la verse ; culture suivante (Lamerre, 2020). Pour cela, le seigle (*Secale cereale L.*) est l'espèce la plus utilisée et montre généralement les meilleurs rendements (Bes de Berc, 2020). En effet, ce dernier présente plusieurs avantages : c'est une céréale non-gélive, précoce, produisant beaucoup de biomasse et ayant un système racinaire structurant le sol. Cependant, le seigle est sensible à la verse (Vrignaud, 2019). Le triticales montre également des bons rendements, mais il est plus tardif (excepté certaines variétés).

Mais l'utilisation de cultures pures céréales pourrait, sur le long terme, causer divers problèmes : difficulté de gestions des bioagresseurs, sensibilité face aux aléas climatiques, pénaliser la culture suivante, etc... Ainsi, afin de limiter les inconvénients liés à la monoculture, il peut être intéressant de réaliser des mélanges de céréales avec différentes variétés de seigles, triticales ou avoines. Mais aussi de réaliser des associations avec des légumineuses (Pelzer et al., 2014; Ferrand & Vrignaud, 2020). Concernant les légumineuses, ce sont la féverole, la vesce et le pois qui sont les plus étudiés. Mais bien que leur utilisation permet bien souvent de réduire la fertilisation azotée, elles induisent parfois une perte de rendement (Marsac et al., 2019).

Le semis des CIVE d'hiver peut avoir lieu de début septembre jusqu'à début novembre, sachant que plus l'on sème tôt, plus le potentiel de rendement sera important. La récolte aura lieu vers le mois d'avril, aux stades épiaison ou début floraison, en fonction des dates de semis de la culture suivante, le mélange sera ensuite ensilé avant d'alimenter le méthaniseur (figure 1) (Ferrand & Vrignaud, 2020).

1.3. Intérêts des associations céréales-légumineuses pour les performances agronomiques des CIVE

1.3.1. Potentiel méthanogène

« Le potentiel méthanogène correspond à la quantité de méthane maximale produite par la biomasse lors de sa biodégradation en condition anaérobie durant le processus de méthanisation » (Lamerre, 2020).

Il a été mis en évidence que potentiel méthanogène décroît au cours de la période de croissance du couvert (Marsac et al., 2019) et qu'il n'existe pas de différences significatives entre les potentiels méthanogènes des différentes espèces utilisées en CIVE. Ainsi, le rendement et le taux de matière sèche seront les facteurs majoritaires influençant la rentabilité de la culture (ADEME, 2019; Marsac et al., 2019).

1.3.2. Rendement et fertilisation azotée

En Europe, la biomasse aérienne des cultures intermédiaire ne dépasse généralement pas 5 t MS/ha (ARVALIS - Institut du végétal et al., 2011; Justes et al., 2012; Hansen et al., 2021). Cependant, la production pour les CIVE d'hiver reste très variable (2-16 t MS/ha) et est dépendante des conditions pédoclimatiques. Les principaux leviers pour optimiser la production de biomasse sont : la place dans la rotation, les dates de semis et de récolte, le choix des espèces du mélange et la fertilisation (Szerencsits, 2014; Marsac, Heredia, et al., 2019; Marsac & Dagorn, 2021; Launay et al., 2022). Dans de bonnes conditions, on pourra récolter en moyenne 6 à 7 t MS/ha (ADEME, 2019) et jusqu'à 14 t MS/ha en fonction de la variété et de la date de récolte (Marsac & Dagorn, 2021). Sachant que pour rentabiliser la culture, il faudra récolter au minimum 4 à 6 t MS/ha et un taux de matière sèche minimum de 20 à 25 % pour produire suffisamment de biogaz (ADEME, 2019; Marsac et al., 2020).

Pour les CIVE d'hiver, la biomasse est récoltée à partir d'avril, lorsque le développement de la végétation est important. Il est donc intéressant de récolter aussi tard que possible afin d'augmenter le rendement (Szerencsits, 2014; Belleil et al., 2015; Legendre et al., 2018; Ratier, 2018; Marsac, Heredia, et al., 2019; Launay et al., 2022).

En effet, une récolte à partir du 5 mai permet des rendements de plus de 6 t MS/ha même sans fertilisation. Avant la mi-avril, les rendements restent généralement inférieurs à 3 t MS/ha. Mais il est possible d'augmenter ces rendements avec une fertilisation adaptée aux besoins (Szerencsits, 2014). Il faut cependant éviter de trop raccourcir la période de croissance de la culture suivante.

Ainsi, de nombreuses études s'attachent à voir l'effet de la fertilisation sur ces dernières et les possibilités d'inclure des légumineuses dans le mélange afin de limiter cette fertilisation (Cohan et al., 2014; Tosti et al., 2014; Legendre et al., 2018; Ferrand & Vrignaud, 2020; Launay et al., 2022; Gungaabayar et al., 2023).

Généralement, les apports azotés sont de l'ordre de 70 à 140 kg N/ha (UN) selon l'historique de fertilisation et la composition du mélange (Ferrand, 2019). Un premier apport de digestat liquide est réalisé au semis, puis un ou deux autres apports de digestat ou d'engrais minéral seront réalisés à partir du 10 février. Cela permet d'assurer un rendement correct (6 à 7 t MS/ha). En effet, dans le rapport réalisé par Marsac et al., en 2019, il a été montré qu'un apport de 80 UN induit systématiquement une production de biomasse supérieure de 2 à 4 t MS/ha, comparé à une situation sans fertilisation. En absence de fertilisation, intégrer une ou plusieurs légumineuses au mélange permet d'augmenter le rendement de 2 à 3 t MS/ha, ce qui permet une économie de 30 à 40 UN (Ferrand & Vrignaud, 2020; Vandewalle, 2018). En présence de légumineuses, un apport précoce (30-50 UN) en sortie d'hiver peut suffire afin d'obtenir un bon développement de la céréale. Cet apport pourra être effectué entre le stade épi 1 cm et le stade 2 nœuds de la céréale majoritaire, ce qui permettra d'augmenter le rendement du mélange jusqu'à 1 t MS/ha (Legendre et al., 2018).

Ainsi, les études s'accordent à dire que la fertilisation azotée doit être raisonnée en fonction de la part de légumineuses dans le mélange. Et qu'intégrer dans le mélange une proportion de légumineuses, de 20 à 40 % permet de limiter l'utilisation d'intrant azoté sans pénaliser le rendement (Chambre d'agriculture du Gers, 2015; Marsac et al., 2019; Marsac & Chavassieux, 2019; Ferrand & Vrignaud, 2020; Marsac & Dagorn, 2021).

Il a été montré que dans les couverts associant céréales et légumineuses, une complémentarité de niche se met en place pour l'azote. La céréale étant très fortement compétitive pour l'azote du sol, cette dernière force la légumineuse à utiliser principalement l'azote issu de la fixation symbiotique. Ainsi, chez la légumineuse en association, il est toujours observé une augmentation de la contribution de la fixation à l'accumulation de l'azote par rapport à une culture pure légumineuse. La quantité prélevée et exportée en association est ainsi supérieure à une culture pure céréale (Louarn, et al., 2010). Par exemple, pour une association céréale-pois, on observe une augmentation moyenne de l'accumulation d'azote de 30 % comparé à une culture pure céréale (Corre-Hellou et al., 2006).

En plus des effets de niche, des transferts d'azote de la légumineuse à la céréale peuvent compléter la nutrition azotée de la céréale et ainsi favoriser sa croissance. Il a été démontré que dans les couverts associant céréales-légumineuses, une quantité importante du N₂ fixé par les légumineuses est transférée aux céréales (Gungaabayar et al., 2023). Ces transferts proviennent principalement de la rhizodéposition. En effet, le contact direct avec les racines entraîne une rhizodéposition élevée de la légumineuse et ainsi, une grande quantité d'azote minéral est transférée à la céréale (Hupe et al., 2021). Ces rhizodépôts sont composés majoritairement d'exsudats de composés solubles et du recyclage des nodosités sénescents (Louarn, et al., 2010).

La fertilisation azotée influence la proportion de céréales et de légumineuses au sein des associations. En effet, une forte disponibilité en azote minéral aura tendance à favoriser le développement de la céréale au détriment de la légumineuse (Louarn, et al., 2010). De plus la fertilisation induit une diminution de la fixation de l'azote atmosphérique réalisée par la légumineuse (Schneider & Biarnès, 2021).

Pour finir, lorsque des légumineuses sont intégrées au mélange, un apport plus précoce que le stade épi 1 cm est déconseillé en raison des risques d'inhibition de la nodulation de la légumineuse et cela pourrait également engendrer une croissance trop forte de la céréale vis-à-vis de la légumineuse, ce qui déséquilibrerait les proportions du mélange (Peyrille et al., 2006; Cohan et al., 2014).

1.3.3. Taux de matière sèche

Concernant le taux de matière sèche à la récolte pour une valorisation en méthanisation, ce dernier est idéal à 30 %. En dessous de 25 % de matière sèche, il y a une production importante d'effluents d'ensilage qui, s'ils ne sont pas valorisés induisent une perte de potentiel méthanogène (Marsac et al., 2021; Launay et al., 2022). En effet, les CIVE sont en moyenne récoltées à 20 % de matière sèche, ce qui induit un écoulement d'effluents au stockage de l'ordre de 70 à 220 litres par tonne d'ensilage (Marsac et al., 2021). Il faut noter que le taux de matière sèche est plus faible lorsqu'une légumineuse est présente dans le mélange, celle-ci ayant un taux de MS de 15 à 17 %. La présence de légumineuse va alors indirectement réduire cette production de biogaz (Ferrand & Vrignaud, 2020).

Le potentiel méthanogène tend à diminuer avec le stade de développement de la plante. Cependant, lors d'une récolte tardive, la production de biogaz est tout de même augmentée grâce à une production de biomasse plus importante et un taux de MS plus élevé (Vrignaud, 2019; Marsac et al., 2021).

1.3.4. La compétition avec les adventices

De nombreuses études s'attachent à voir l'effet d'un couvert en association sur la diminution des adventices par rapport à une culture pure. Les études s'accordent à dire qu'un couvert avec une association d'espèces aura une performance équivalente ou moindre que la culture pure céréale pour concurrencer les adventices (Creamer et al., 1996; R. Smith et al., 2014; Baraibar et al., 2018; R. G. Smith et al., 2020; Villefourceix-Gimenez et al., 2022).

Concernant les légumineuses en culture pure, elles sont faiblement compétitives avec les adventices (Baraibar et al., 2018). Ainsi, il paraît intéressant de les associer avec des céréales (ayant une bonne compétitivité vis-à-vis des adventices) pour induire une compétition avec les adventices correcte et ainsi limiter le désherbage mécanique ou chimique (Cohan et al., 2014).

Une étude de Villefourceix-Gimenez, 2022 basée sur les résultats de 31 essais réalisés en France a montré que les 2 variables les plus importantes pour expliquer la biomasse d'adventices à la destruction du couvert sont : la biomasse du couvert semé et sa vitesse de croissance. Ainsi, la réduction de la biomasse d'adventices est positivement corrélée avec la vitesse de couverture du sol du couvert (Metais et al., 2019; Villefourceix-Gimenez et al., 2022).

Afin de favoriser la biomasse du couvert, il est nécessaire de soigner le semis. Il est également possible de réaliser un semis précoce, voir avant la récolte du précédent (sous conditions d'utiliser des espèces adaptées et d'avoir des conditions hydriques favorables) (Sturm et al., 2017). Un apport d'azote au semis peut également favoriser la biomasse du couvert sans pour autant avoir un effet significatif sur la biomasse d'adventices (Cordeau et al., 2019, 2022).

1.4. Intérêts des CIVE en associations céréales-légumineuses pour les performances agro-environnementales

Pour les légumineuses, les impacts principaux pouvant avoir un effet direct sur la culture suivante concerneront l'azote et l'humidité du sol. Cependant, l'introduction de ces dernières dans les couverts peut avoir différents impacts tels qu'une augmentation globale des émissions de protoxyde d'azote (Tribouillois et al., 2018; Abdalla et al., 2019) ou encore un effet délétère pour les champignons mycorrhiziens arbusculaires (Muhammad et al., 2021).

1.4.1. Reliquats azotés

Concernant l'azote du sol, il est important de trouver un équilibre entre les reliquats azotés disponibles pour la culture suivante et la lixiviation durant l'hiver, qui va polluer les eaux souterraines.

En effet, il a été montré qu'une culture pure céréale réduit la lixiviation, mais induit une faible quantité de reliquats azotés pour la culture suivante. Alors qu'une culture pure légumineuse ne réduira pas ou peu la lixiviation, mais laissera une forte quantité de reliquats azotés pour la culture suivante. Il paraît donc intéressant d'utiliser des associations céréales-légumineuses afin d'assurer une accumulation de l'azote stable dans le sol tout en réduisant la lixiviation (Tosti et al., 2014).

Dans l'étude de Lawson et al., en 2015, il a été montré que les reliquats azotés étaient plus importants après une culture associée vesce-seigle (à densité de semis égale, en kg/ha) qu'après une culture pure de seigle.

Cela est confirmé par Tonitto et al., en 2006 et Tribouillois et al., en 2016 qui montrent qu'un couvert composé de légumineuse réduirait la lixiviation de 40 % contre 70 % pour un couvert pur céréale. Cela peut être expliqué par le fait que les légumineuses fixent de l'azote atmosphérique ce qui réduit leur dépendance à l'azote présent dans le sol. De plus, les céréales étant plus compétitives que les légumineuses pour l'azote (Louarn, et al., 2010), ces dernières ont une plus grande capacité à absorber et à utiliser cet azote rapidement.

Concernant le risque de stress azoté pour la culture suivante, il est possible de trouver un équilibre entre réduction de la lixiviation et stress azoté pour la culture suivante. Des CIVE associant légumineuses et non légumineuses, détruites suffisamment tôt, pourraient réduire la lixiviation sans provoquer de stress azoté pour la culture suivante (Tribouillois et al., 2016; Hermet, 2021). Cela a également été montré dans la publication d'Abdalla et al., en 2019, qui a observé une augmentation de rendement pour la culture suivante d'environ 13 %, suite à l'intégration de légumineuses dans la culture intermédiaire (comparé une culture intermédiaire n'intégrant pas de légumineuse).

1.4.2. Humidité du sol

L'humidité du sol est un des facteurs principaux influençant la production de biomasse et une augmentation de la teneur en eau du sol est souvent corrélée avec un gain de rendement (Holman et al., 2018; Meyer et al., 2020).

Il a été montré que la plupart du temps, les cultures intermédiaires réduisent le drainage (Meyer et al., 2020), ce qui peut induire des problèmes de recharge en eau dans les sols, et particulièrement dans les régions au climat sec. De plus, la quantité de biomasse produite est le principal facteur influençant la réduction du drainage (Tribouillois et al., 2018). Ainsi, avec des CIVE produisant une quantité importante de biomasse, la réduction de la recharge en eau du sol peut avoir un impact sur la culture suivante.

Concernant les légumineuses, une étude a montré que comparé à une interculture de blé d'hiver semée en automne, une culture de luzerne montre une diminution de la teneur en eau du sol à la récolte d'environ 2 points (en % d'humidité du sol), mais qu'une culture de trèfle incarnat ne montre pas de différence significative (Blackshaw et al., 2010).

Une autre étude a montré qu'il n'y a pas de différence en humidité du sol (sur une profondeur 0 – 1,8 m) entre une culture associant vesce velue et triticale, comparée à une culture de blé d'hiver ou de triticale (Holman et al., 2018).

En résumé, les études montrent des effets contrastés sur l'humidité du sol après des couverts intégrant ou non des légumineuses.

1.4.3. Impacts des CIVE sur le rendement de la culture suivante

Bien que les CIVE peuvent réduire le rendement des cultures suivantes en raison de la concurrence pour l'eau, pour l'azote et en raison des risques accrus de compactage du sol, le plus grand effet délétère est associé au retard du semis et à l'utilisation de variétés précoces (Szerencsits, 2014; Marsac et al., 2019; Launay et al., 2022).

En effet, Marsac et al., (2019) ont observé après une CIVE, qu'un retard de semis de 10 à 15 jours entraînait une réduction de rendement de l'ordre de 7 % pour la culture suivante. Lorsqu'il est supérieur à un mois ou plus, la culture principale ne pourra pas atteindre la maturité de récolte. Acharya et al., en 2017 ont montré que les cultures intermédiaires peuvent également héberger des agents pathogènes ce qui peut impacter la culture suivante. En effet, ils ont montré que plus l'intervalle de temps entre la destruction du couvert et le semis de la culture suivante est court, plus la perte de rendement est importante (culture intermédiaire de seigle et culture suivante de maïs).

Concernant les légumineuses, Abdalla et al., en 2019 ont observé une augmentation de rendement pour la culture suivante d'environ 13 %, suite à l'intégration de légumineuses dans la culture intermédiaire (comparé une culture intermédiaire n'intégrant pas de légumineuses).

1.5. Contexte du stage et hypothèses de travail

Comme mentionné précédemment, la majorité des CIVE d'hiver sont cultivées en pure céréale (principalement du seigle) ce qui pourrait, sur le long terme causer divers problèmes.

Ainsi, les associations céréales-légumineuses semblent pouvoir répondre à certains de ces problèmes en réduisant l'utilisation d'engrais azotés, les impacts sur la culture suivante et augmenter la diversification des cultures. Ces couverts, ayant des compositions semblables à des méteils, pourraient également être utilisés en alimentation animale en cas de pénuries. Cependant, il manque des connaissances sur le sujet. Les associations céréales-légumineuses pour les cultures dérobées fourragères sont fortement étudiées, mais rares sont les références sur ces associations en CIVE.

Pour cela, le projet PAMPA (Promouvoir Agroécologie et Méthanisation Par les Associations culturales) s'intéresse à ces associations pour les CIVE d'hiver, car elles sont actuellement les plus cultivées et représentent le plus gros potentiel de production. L'objectif de ce projet est d'évaluer les impacts agronomiques, environnementaux et économiques des cultures intermédiaires associant céréales et légumineuses, valorisé en méthanisation.

Il est porté par la Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine (CRANA) et la région Centre-Val de Loire voulant développer la filière méthanisation a rejoint le projet (avec certaines chambres régionales d'agriculture).

Le stage réalisé ainsi que ce mémoire concerne l'analyse des données du projet PAMPA et plus spécifiquement, sur les associations avec la féverole d'hiver (*Vicia faba*).

La féverole est la légumineuse qui a été retenue dans ce projet car elle présente divers avantages : rôle de tuteur en association avec le seigle qui est sensible à la verse, racine pivot décompactant le sol et précocité.

Ainsi, le travail présenté dans ce mémoire aura pour objectif de répondre à la problématique suivante :

Comment la féverole, en association avec une céréale impacte les performances agronomiques, environnementales et économiques des CIVE d'hiver ?

Afin de répondre à cette question, une synthèse bibliographique a été réalisée et les résultats des expérimentations mises en place dans le cadre du projet PAMPA sont analysés. Ces expérimentations ont été menées dans des contextes pédoclimatiques différents, dans les régions Centre-Val de Loire et Nouvelle-Aquitaine.

Ainsi, au vu des objectifs cités précédemment, la problématique de travail peut être divisée en cinq questions, où pour chacune d'elles ont été associées une ou plusieurs hypothèses.

- Comment l'association impacte le rendement ?
 - H1.1 : Le rendement d'une culture associée avec une fertilisation réduite est similaire au rendement d'une culture en céréale pure fertilisée
 - H1.2 : Les espèces végétales utilisées ainsi que la fertilisation azotée impacte la part de légumineuse à la récolte
- Comment l'association impacte le taux de matière sèche ?
 - H2 : Le taux de matière sèche est diminué en culture associée avec des légumineuses
- Quelle est l'efficacité de l'association vis-à-vis de la gestion des adventices ?
 - H3 : La biomasse d'adventice est réduite en culture associée avec des légumineuses
- Quel est l'impact de l'association sur l'état du sol à la récolte ?
 - H4.1 : Les reliquats azotés sont équivalents entre une culture associée et une culture pure céréale
 - H4.2 : L'humidité du sol à la récolte est équivalente entre une culture associée et une culture pure céréale
- Comment les associations impactent les performances économiques des CIVE ?
 - H5 : Les marges semi-nettes sont équivalentes entre une culture associée et une culture pure céréale

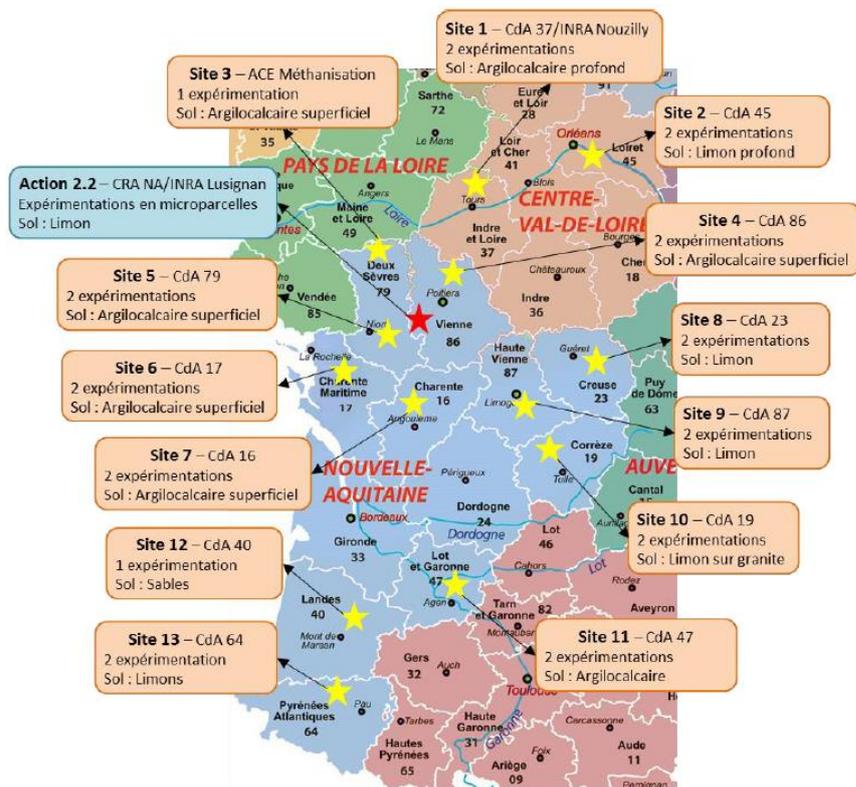


Figure 2 : Localisation des sites d'expérimentation au champ et en petites bandes

Tableau 1 : Densités de semis en fonction des périodes, préconisés par la CRANA pour des CIVE d'hiver

	Période de semis		
	25/08 au 15/09	15/09 au 15/10	15/10 au 15/11
Seigle Vitallo (PMG = 32)	250 grains/m ² 80 kg/ha	280 grains/m ² 90 kg/ha	300-350 grains/m ² 96 - 112 kg/ha
Seigle Vitallo + Féverole DIVA	200 + 20 grains /m ² 66 + 96 kg/ha	225 + 20 grains/m ² 72 + 96 kg/ha	240-280 + 20 grains/m ² 83 + 96 kg/ha
Triticale Bikini (PMG = 35)	280 grains/m ² 98 kg/ha	300 grains/m ² 105 kg/ha	320-350 grains/m ² 112-123 kg/ha
Triticale Bikini + Féverole DIVA (PMG = 480)	220 + 20 grains/m ² 77 + 96 kg/ha	240 + 20 grains/m ² 84 + 96 kg/ha	245-280 + 20 grains/m ² 86-98 + 96 kg/ha
Triticale Bikini + Vesce velue (PMG = 44)	220 + 30 grains/m ² 77 + 13 kg/ha	240 + 30 grains/m ² 84 + 13 kg/ha	245-280 + 30 grains/m ² 86-98 + 13 kg/ha

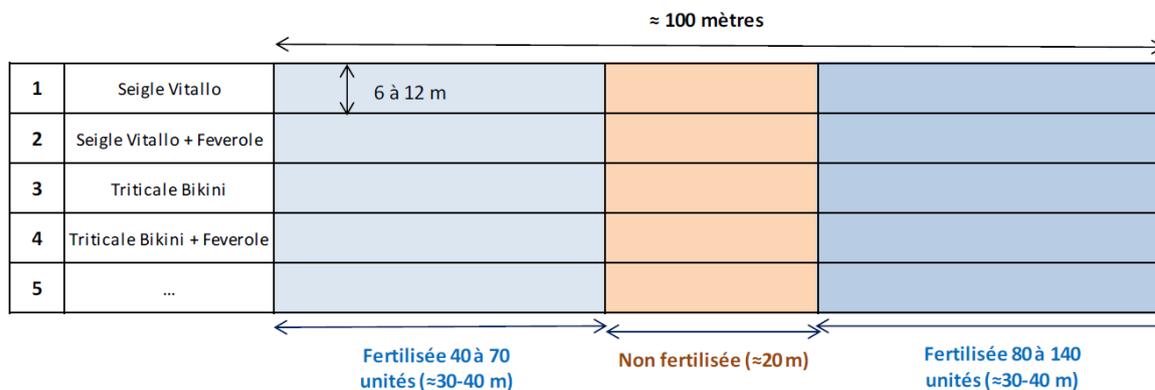


Figure 3 : Plan d'expérimentation en grandes bandes, protocole du projet PAMPA

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation des essais

Ce travail se base sur un réseau de parcelles. 47 essais ont été réalisés en deux ans dans des contextes pédoclimatiques différents (annexe 1), à travers les régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire (25 en 2021 et 22 en 2022). Au total, 42 essais ont été récoltés. 40 essais ont été réalisés sur des parcelles d'agriculteurs et 2 en petites bandes sur le site de l'INRAe de Lusignan. Les mesures ont été réalisées et suivies par les 12 Chambres départementales d'Agriculture et la société de conseil ACE Méthanisation qui sont les partenaires du projet PAMPA (figure 2).

2.1.1. Dispositif expérimentale

Concernant la composition des CIVE d'hiver, 4 couverts différents, communs à tous les essais ont été étudiés :

- Seigle (*Secale cereale L.*) variété VITALLO
- Seigle variété VITALLO / Féverole (*Vicia faba*) variété DIVA
- Triticale (*Triticum secale*) variété BIKINI
- Triticale variété BIKINI / Féverole variété DIVA.

En 2022, le couvert Triticale Bikini / Vesce velue (*Vicia villosa*) variété NICKEL a été ajouté mais il ne sera pas analysé dans le cadre de ce mémoire. De plus, la densité de semis pour la féverole a été doublée en 2022, afin d'obtenir une proportion plus significative à la récolte. Ces variétés de céréales ont été choisies pour leur précocité et leurs rendements et la variété de féverole choisie est une variété très répandue.

Les densités de semis sont détaillées dans le tableau 1. La densité augmentait avec le retard de la date de semis et les céréales en association étaient semées moins dense qu'en pur. Les semences sont certifiées et non traitées. Pour la fertilisation azotée, 3 traitements ont été étudiés :

- 0 unité d'azote (UN) = témoin
- Dose X :
 - Pour l'année 2021 : 80 à 140 UN, doses habituellement utilisées par les agriculteurs
 - Pour l'année 2022 : 100 UN, dose imposée pour tous les essais
- Dose X/2 : 40 à 70 UN en 2021 et 50 UN en 2022

Le type de fertilisation n'a pas été imposé (organique ou minéral) et a été apporté en une fois pour la dose X/2 et en un ou deux apports pour la dose X.

Les essais en parcelles ont été conduits en « grandes bandes ». En effet, chaque modalité était implantée sur une bande de 6 à 12 m de large sur environ 100 m de long et la fertilisation a été réalisée à la perpendiculaire du semis (figure 3). En cas, d'hétérogénéité de la parcelle, le gradient d'hétérogénéité était perpendiculaire au semis.

En petites bandes, les deux essais ont été réalisés sur des surfaces de 6x16 mètres. En 2021, quatre traitements de fertilisation azoté ont été étudiés (0, 50, 80 et 120 UN). En 2022, uniquement les trois traitements classiques (0, 50, 100 UN).

Les dates de semis et de récolte n'ont pas été imposées. Ces dernières sont renseignées pour chaque essai dans l'annexe 1.

2.1.2. Choix des essais à étudier

Dans le cadre de ce mémoire, pour l'analyse du rendement et du taux de MS, tous les essais n'ont pas été retenus, afin d'une uniformité dans les données à analyser. Pour qu'un essai soit inclus dans le jeu de donnée à analyser, les conditions étaient d'avoir toutes les modalités au sein de l'essai (4x3 = 12 modalités).

Ainsi, 27 essais ont été retenus et analysés. Les raisons expliquant pourquoi certains essais n'ont pas été retenus sont notées dans l'annexe 1.

La plupart des essais non retenus n'avaient pas réalisé de dose X/2 et/ou de dose témoin 0 UN. Deux essais n'ont pas été retenus car les doses X étaient trop importantes (204 et 160 UN). Deux essais n'avaient pas de donnée associée. Et un dernier essai a montré des rendements considérés comme aberrants, probablement dus à des estimations de rendements mal réalisées.

Trois essais ont été conservés alors qu'ils ne remplissaient pas toutes les conditions. ACE_2022 n'a étudié que le seigle et son association (6 modalités). CA37_1_2022 n'a pas étudié le triticale pur (9 modalités). CA87_1_2021 n'a étudié que la dose 0 et X/2 = 35 UN (8 modalités). Il a été choisi de les conserver afin de ne pas réduire davantage le jeu de données. De plus ces écarts aux conditions initiales ne perturberont pas l'analyse statistique. Ainsi, le jeu de données représente un total de 347 individus et entre 24 et 27 répétitions par modalité.

Concernant les reliquats azotés et l'humidité du sol, au vu du faible nombre de mesures, la seule condition était d'avoir en comparaison des modalités pures céréales et en association au sein de l'essai.

2.2. Réalisation des mesures

2.2.1. Mesures des biomasses, du taux de MS et des proportions de légumineuses à la récolte

Des mesures de biomasses ont été réalisées par espèces pour chacune des modalités, pour l'ensemble des essais. Pour ce faire, trois placettes de 1 m² ont été prélevées pour chaque modalité, et les plantes ont été coupées à une hauteur de 5 cm au-dessus du sol. Les biomasses fraîches de céréales, de légumineuses et d'adventices ont ensuite été pesées séparément. A partir des prélèvements effectués sur les trois placettes, trois sous-échantillons ont été réalisés, chacun représentant respectivement les céréales, les légumineuses et les adventices. Ces échantillons ont été pesés, puis séchés à l'étuve à 60°C pendant 72 h avant d'être pesés à nouveau, cela a permis de déterminer le taux de MS. Les biomasses sèches ont ainsi été calculées pour chacune des placettes selon la formule suivante : $Biomasse\ sèche\ (kg/m^2) = \sum Biomasse\ fraîche\ de\ chaque\ espèce\ (kg/m^2) \times Taux\ de\ MS\ de\ chaque\ espèce\ (\%)$

Le rendement de chacune des modalités a été calculé en faisant la moyenne des trois placettes et en convertissant en t MS/ha selon la formule suivante : $Rendement\ (t\ MS/ha) = Moyenne\ des\ biomasses\ sèches\ des\ 3\ placettes\ (kg/m^2) \times 10$

Les proportions de légumineuses ont également été calculées avec la formule suivante : $Proportion\ de\ légumineuses\ (\%) = \sum Biomasse\ sèche\ des\ légumineuses\ (kg/m^2) / \sum Biomasse\ sèche\ totale\ (kg/m^2) \times 100$

2.2.2. Mesures des reliquats azotés et humidité du sol

Des mesures d'humidité du sol et de reliquats azotés ont été réalisées sur 10 essais. Ces mesures ont été faites à la sortie de l'hiver et/ou à la récolte. Elles ont été réalisées sur quatre modalités, de façon à montrer les différences entre les cultures pures et associées, fertilisées ou non.

Pour chaque essai, les mesures ont été réalisées sur l'association montrant le plus de féverole, afin de mettre en évidence l'effet de la féverole sur les reliquats azotés et l'humidité du sol. Ainsi, certaines mesures ont été réalisées sur le seigle ou sur le triticale.

Pour avoir des échantillons représentatifs des parcelles et des différents horizons de sol, plusieurs carottages ont été réalisés dans les horizons 0-30 cm et 30-60 cm, dans les placettes utilisées pour les prélèvements de biomasse. Après avoir été conditionnés, ces échantillons ont été envoyés au laboratoire AUREA, qui a réalisé les analyses du taux d'humidité et/ou les teneurs ammoniacale (NH₄) et nitrique (NO₃).

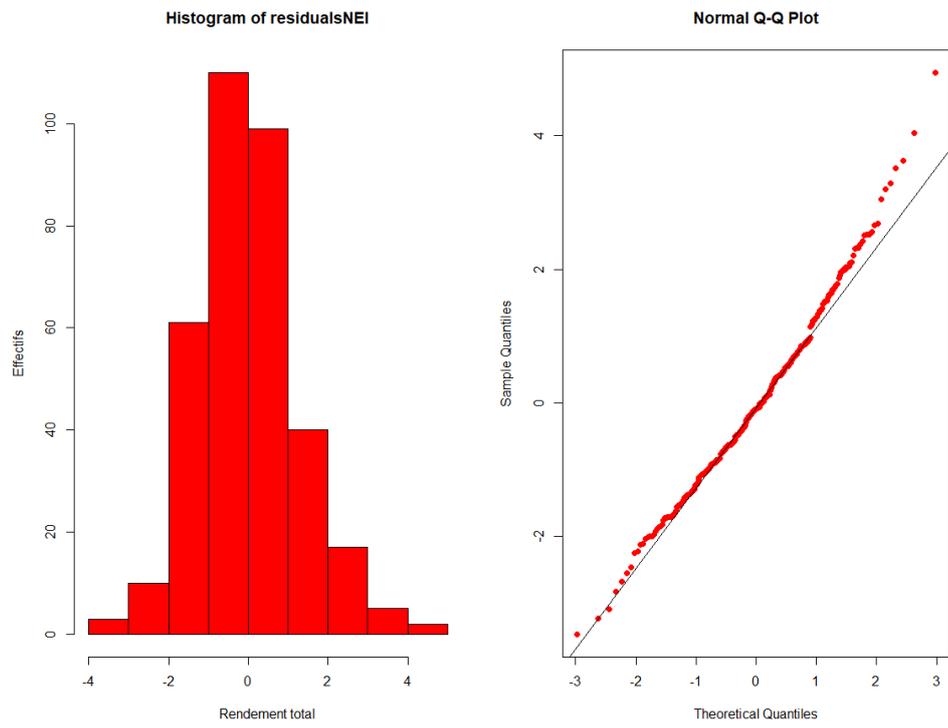


Figure 4 : Graphiques montrant la distribution de la variable à expliquer : rendement

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

Les mesures de la teneur en azote de la biomasse aérienne ont été réalisées sur quatre essais. Trois sur quatre sont des essais où les reliquats azotés à la récolte ont été mesurés. Des prélèvements d'environ 200 g de biomasse aérienne ont été prélevés sur les céréales et sur la féverole, puis séchés à l'étuve à 60°C pendant 72 h avant d'être envoyés au laboratoire AUREA pour analyser la teneur en azote.

Ces mesures ont permis d'estimer les exportations d'azote des CIVE pour une parcelle donnée grâce à la formule suivante : $Exportation\ d'azote\ (kg/ha) = (Rendement\ céréales\ (t\ MS/ha) \times Teneur\ en\ azote\ de\ la\ céréale\ (\%) + Rendement\ féverole\ (t\ MS/ha) \times Teneur\ en\ azote\ de\ la\ féverole\ (\%)) \times 1000$

L'exportation d'azote a par la suite permis d'estimer et de schématiser la dynamique de l'azote avec retour de digestat pour les différentes modalités de CIVE.

2.3. Analyse des données

2.3.1. Rendement

Dans cette étude du rendement, le jeu de données trié a été utilisé (347 individus et entre 24 et 27 répétitions par modalité).

Afin de valider ou non l'hypothèse H1, un modèle linéaire mixte générale (LMM) a été utilisé. Ce modèle a été nommé *modelNEI2*. L'intérêt de ce modèle statistique est qu'il peut être utilisé lorsque que les données ne sont pas indépendantes. En effet, dans le cas de cette expérimentation, les données sont dépendantes de l'année d'expérimentation (2021 ou 2022) ainsi que du contexte pédoclimatique de l'essai étudié. Ainsi, ce modèle inclut deux effets groupe, « essai » et « année de culture », afin de prendre en compte ces dépendances. Les effets des variables « classe azote » (correspondant aux dose 0 ; X/2 = 25-50 UN ; X = 80-100 UN), et « Pur_mélange » (correspondant aux conditions de cultures associées ou non) sur le rendement ont été analysés. Le modèle inclut également l'interaction entre ces deux variables explicatives. En langage R, le modèle s'écrit de la façon suivante :

```
modelNEI2 <- lmer(Rendement_total ~ Classe_azote_spé + Pur_melange + Classe_azote_spé:Pur_melange + (1|Année_de_culture) + (1|Essai) + (1|Essai:Année_de_culture), data = data).
```

Afin d'analyser ce modèle, il a été réalisé une ANOVA de type 3 avec un test de Fisher pour voir quelles variables montrent une influence significative sur le rendement. Des AIC (test Critère d'information d'Akaike) ont également été réalisés afin d'estimer l'ajustement du modèle (compromis entre complexité et qualité du modèle) et ainsi comparer différents modèles entre eux. Un second modèle a été réalisé afin d'intégrer la variable « proportion de légumineuses à la récolte (%) ». Après comparaison par l'AIC de ces deux modèles, le second montrait un AIC bien plus faible et donc un meilleur ajustement. Cependant, l'utilisation de ce modèle pourrait se faire uniquement à des fins de prédiction ou d'estimation de rendement. En effet, la proportion de légumineuse à la récolte n'est pas une variable que l'on peut influencer facilement à l'implantation du couvert. Ainsi, dans le contexte du projet PAMPA et afin de valider ou non l'hypothèse H1, uniquement le premier modèle sera utilisé.

Les hypothèses de normalité, stabilité des variances et d'indépendance ont par la suite été vérifiées. Pour la normalité, un test de Shapiro-Wilk a été réalisé, ce dernier n'a pas validé la normalité (p-value = 0,007). Cependant, les graphiques (normal Q-Q plot et histogramme des résidus) étaient proche d'une distribution normale (figure 4). Pour la suite de l'analyse, il a donc été choisi de faire preuve d'indulgence afin de valider l'hypothèse de normalité. Des tests de Barlett réalisés sur chacune des variables explicatives ont validé l'hypothèse d'égalité des variances. Et un test de « variance inflation factor » a validé l'indépendance des variables explicatives.

En plus de l'analyse statistique, des analyses graphiques ont été réalisées afin de visualiser l'effet des facteurs pédoclimatiques, ainsi que des variables considérées significatives par l'analyse statistique. L'ensemble de ces graphiques ne pourront être présentés dans ce mémoire.

Toutes les analyses graphiques et statistiques ont été réalisées avec le logiciel RStudio (version 2022.07.2+576).

2.3.2. Proportion de légumineuses à la récolte

Dans cette étude de la proportion de légumineuses à la récolte, un jeu de données intégrant uniquement les couverts associés a été utilisé (154 individus).

Ainsi, pour l'hypothèse H1.2, un modèle linéaire mixte générale a été utilisé, le modèle `modelleg2` (`modelleg2 <- lmer(ln_pourcentage_légumineuse ~ Pluviométrie + Classe_azote_spé + Espèces + (1|Année_de_culture) + (1|Essai) + (1|Essai:Année_de_culture), data = data)`). Pour ce modèle, des variables pédoclimatiques ont été analysées afin d'être intégrées au modèle. Ainsi, en plus des deux effets groupe comme pour l'étude du rendement, le modèle intègre les variables « pluviométrie », « classe azote » et « espèces » (triticale-féverole ou seigle-féverole). Après comparaison avec d'autres modèles, ce dernier montre l'AIC le plus faible et donc le meilleur ajustement, ainsi les interactions n'ont pas été incluent dans le modèle. Pour ce modèle une transformation logarithmique de la variable à expliquer a été réalisée afin que les données suivent une loi normale. Une ANOVA de type 3 avec un test de Fisher a également été réalisée afin d'analyser ce modèle. Les hypothèses de normalité, stabilité des variances et d'indépendance ont par la suite été vérifiées. Pour la normalité, un test de Shapiro-Wilk a été réalisé, ce dernier a validé la normalité (p-value = 0,07). Des tests de Barlett réalisés sur chacune des variables explicatives ont validé l'hypothèse d'égalité des variances. Et un test de « variance inflation factor » a validé l'indépendance des variables explicatives.

2.3.3. Taux de MS à la récolte

Dans cette étude du taux de MS, le même jeu de données que pour le rendement a été utilisé (347 individus et entre 24 et 27 répétitions par modalité).

Ainsi, pour l'hypothèse H2 comme pour l'hypothèse H1, un modèle linéaire mixte générale a été utilisé, nommé `modelclimato2bis` (`modelclimato2bis <- lmer(MS_total_prc ~ Degré_jour + Classe_azote_spé + Pur_melange + Classe_azote_spé:Pur_melange + (1|Année_de_culture) + (1|Essai) + (1|Essai:Année_de_culture), data = data)`). Comme pour l'analyse précédente, des variables pédoclimatiques ont été analysées afin d'être intégrées au modèle. Ainsi, en plus des deux effets groupe « essai » et « année de culture », ce dernier intègre la variable à expliquer « taux de MS » ainsi que trois variables explicatives : « degré-jour », « classe azote » et « Pur_mélange ». Après comparaison avec d'autres modèles, ce dernier a montré le meilleur ajustement. En effet, l'ajout des interactions entre les variables, ainsi que les variables « pluviométrie » et « classe de sol » ne faisaient que réduire l'ajustement du modèle. Une ANOVA de type 3 avec un test de Fisher a également été réalisée afin d'analyser ce modèle. Les hypothèses de normalité, stabilité des variances et d'indépendance ont par la suite été vérifiées. Pour la normalité, un test de Shapiro-Wilk a été réalisé, ce dernier a permis de validé la normalité (p-value = 0,1). Des tests de Barlett réalisés sur chacune des variables explicatives ont validé l'hypothèse d'égalité des variances. Et un test de « variance inflation factor » a validé l'indépendance des variables explicatives.

Comme pour le rendement, des analyses graphiques ont été réalisées afin de visualiser l'effet des facteurs pédoclimatiques ainsi que des variables considérées significatives par l'analyse statistique.

2.3.4. Biomasse d'adventices

La biomasse d'adventices a été relevée sur 21 essais (annexe 1) pour 266 individus. Au vu de la très forte hétérogénéité entre les essais, seule une analyse graphique a été réalisée.

Différents graphiques ont été réalisés sur ce jeu de données, ainsi que sur les 6 essais montrant les plus fortes biomasses d'adventices. Ainsi, différents graphiques ont été réalisés afin de visualiser l'impact des variables suivantes : essais, fertilisation azotée, composition du couvert.

2.3.5. Dynamique de l'azote avec retour de digestat

Les exportations d'azote (kg N/ha) ont été calculées à partir des teneurs en azote de la biomasse aérienne avec la formule citée précédemment. Ces valeurs d'exportation d'azote ont ainsi été comparées entre les différentes modalités. De plus, afin d'estimer une dynamique de l'azote avec retour de digestat, une simulation schématique a été réalisée. Ainsi, la biodigestion de la biomasse exportée par un méthaniseur, puis un retour de l'azote à la parcelle sous forme de digestat a été estimée et schématisée afin de montrer l'enrichissement ou non du digestat en azote en présence de légumineuses.

Les teneurs en azotes moyennes des différentes espèces ont été calculées à partir des résultats des essais PAMPA. Cependant, ces moyennes ont été calculées pour les céréales aux différentes fertilisations, mais sans différencier seigle, triticale et associées ou non.

De plus, différentes hypothèses ont été posées afin de simplifier la schématisation et prendre un cas-type moyen :

1. Rendements et teneurs en azotes moyenne observés dans les essais PAMPA.
2. Simplification : 100 % de l'azote exporté par les légumineuses est issu de la fixation (90 % des besoins en azote de la légumineuse issus de la fixation de l'azote atmosphérique (Schneider & Biarnès, 2021) + 10 % de l'azote de la céréale provient de transferts directs de la légumineuse à la céréale (Louarn, et al., 2010) ; ces valeurs n'évoluent pas avec la quantité d'azote disponible dans le sol).
3. Après exportation, 10 % de pertes liées au stockage puis 35 % de pertes liées à l'épandage (COMIFER, (Decoopman et al., 2017)).
4. Sur une parcelle donnée, l'azote utilisé par la CIVE provient du digestat produit à partir de la CIVE précédente.
5. Pour la féverole, la biomasse racinaire est égale à 20 % de la biomasse aérienne et cette biomasse racinaire à une teneur en azote de 2 % (formalisme de calcul de la méthode (*Méthode d'Estimation des Restitutions par les Culture Intermédiaire - MERCI*, 2023))
6. Les schémas ne prennent pas en compte les pertes liées à la lixiviation hivernale de l'azote.
7. Pas de différence de potentiel méthanogène entre la féverole et le seigle.

2.3.6. Etat du sol à la récolte

2.3.6.1. Reliquats azotés

Pour les reliquats azotés à la récolte, seule une analyse graphique a été réalisée sur l'horizon 0-30 cm. A partir des données de 7 essais, ce qui représente un total de 28 individus. Tous les essais ont montré des modalités en pures céréale ou en association.

Les variables étudiées graphiquement afin de visualiser leurs impacts sur les reliquats azotés à la récolte sont les suivantes : essais, fertilisation azotée, composition du couvert. Concernant la fertilisation, quatre classes ont été créées (0 UN ; 60-90 UN ; 100-130 UN ; 140-200 UN).

2.3.6.2. Humidité du sol

Pour l'humidité du sol à la récolte, seule une analyse graphique a été réalisée. En effet, 7 essais ont réalisé des relevés d'humidité du sol à la récolte, ce qui représente 34 individus.

Ainsi, comme pour l'étude des reliquats azotés, les variables étudiées graphiquement afin de visualiser leurs impacts sur l'humidité du sol à la récolte sont les suivantes : essais, fertilisation azotée, composition du couvert.

Tableau 2 : Prix des charges et prix de ventes utilisées pour calculer la rentabilité de la CIVE

Prix de vente		110 €/t Ms
Prix de l'UN		1,05 €/UN
Charges semences fermières	Seigle	42 €/ha
	Triticale	30 €/ha
	Féverole	33 €/ha
Charges de mécanisation	Récolte et transport	300 €/ha
	Déchaumage (ETA)	25 €/ha
	Semis (ETA)	45 €/ha
	Fertilisation (ETA)	6,5 €/ha
Charges diverses		117,33 €/ha
Sources : Tarif MAT 2022 / Coûts des opérations culturales 2022 – Chambre d'Agriculture France – SYSTERRE® (Prix semences)		

2.3.7. Intérêt économique de la CIVE

L'intérêt économique des différentes modalités a été évalué sur le logiciel SYSTERRE® développé par ARVALIS. Pour cela, les caractéristiques d'une parcelle sont indiquées avec les cultures réalisées sur cette dernière. Concernant les cultures, 12 cas-types correspondant aux 12 modalités (4 compositions de couvert et 3 fertilisations) ont été renseignés dans le logiciel. De plus, il a été renseigné les différentes interventions réalisées lors de la conduite de la culture : déchaumage, semis, fertilisation, récolte. Chaque intervention est associée à un matériel auquel est associé un prix moyen d'entreprise de travaux agricoles pour les coûts de fonctionnement. Les charges diverses concernent le fermage et les différentes assurances présentes sur l'exploitation. Bien que la CIVE n'est pas considérée comme une culture de rente, il a été choisi de compter ces charges dans la rentabilité de la CIVE. Concernant la récolte et le transport, un prix moyen de 300 € a été renseigné. Cette valeur moyenne provient d'une étude réalisée par l'entreprise ACE méthanisation, sur 16 chantiers de récolte sur les 6 départements suivant : 86, 79, 17, 37, 36, 87 (ACE méthanisation, 2020). Par la suite, les rendements moyens observés dans le cadre du projet PAMPA ont été renseignés pour chaque cas-type. Les semences et le type de fertilisation azotée ont également été renseignés et un prix moyen provenant de SYSTERRE® leur a été attribué. Pour finir, un prix de vente de la CIVE avec ou sans retour de digestat a également été indiqué ce qui a permis de calculer la marge semi-nette pour chacun des cas-types (tableau 2). Ainsi, la marge semi-nette est calculée en soustrayant les charges totales au produit brut et peut donc être calculé avec la formule suivante :

Marge semi-nette calculée (€/ha) = Rendement (t MS/ha) x Prix de vente (€/t MS) – (Charges de mécanisation + Charges d'intrants + Charges diverses (€/ha))

Il a été choisi d'appeler cela une marge semi-nette, bien qu'en plus des coûts directs, les charges diverses sont également pris en compte dans le calcul de cette marge.

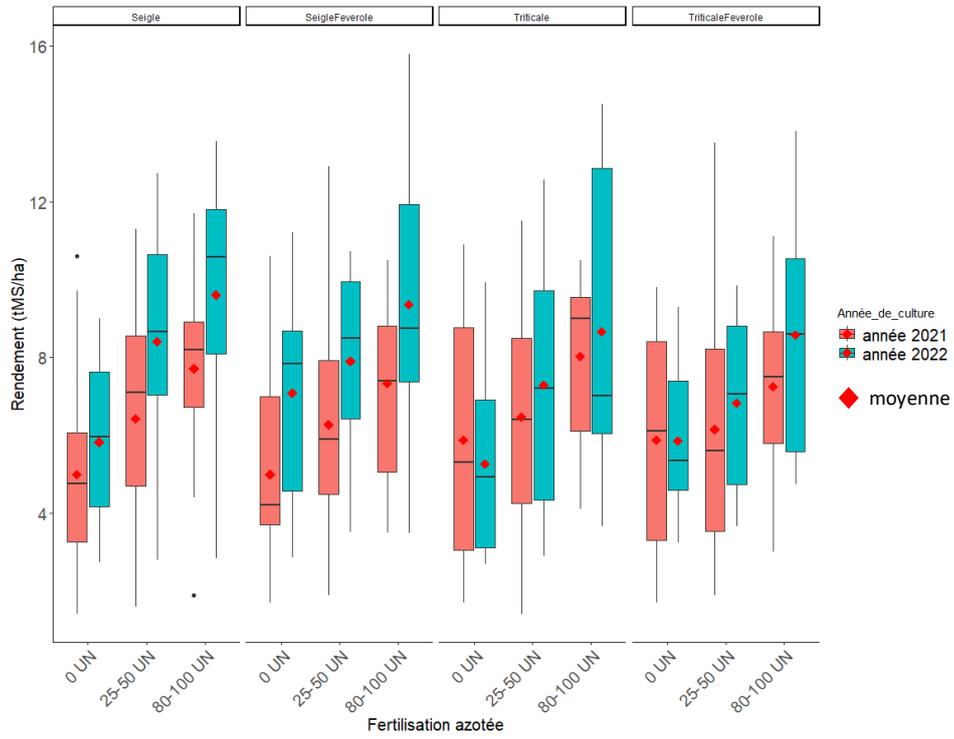


Figure 5 : Rendements en fonction de la fertilisation, pour chaque composition et année (n = 347)

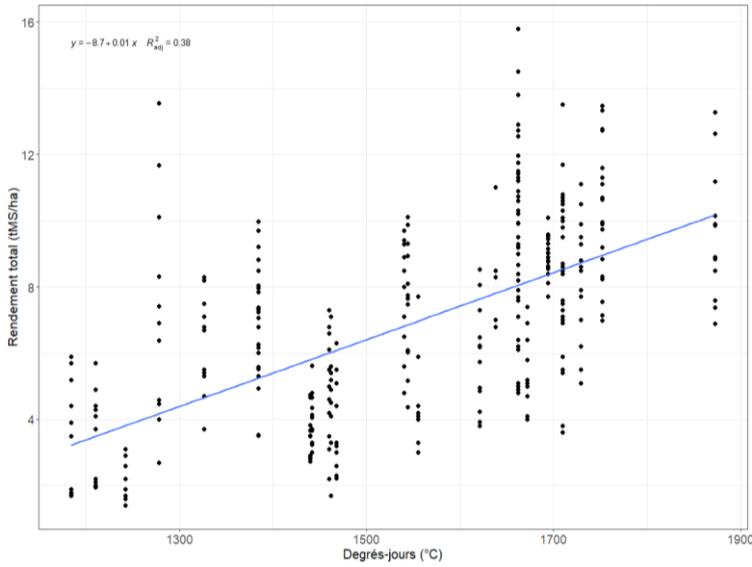


Figure 6 : Rendement en fonction du nombre de degrés-jours (n = 347)

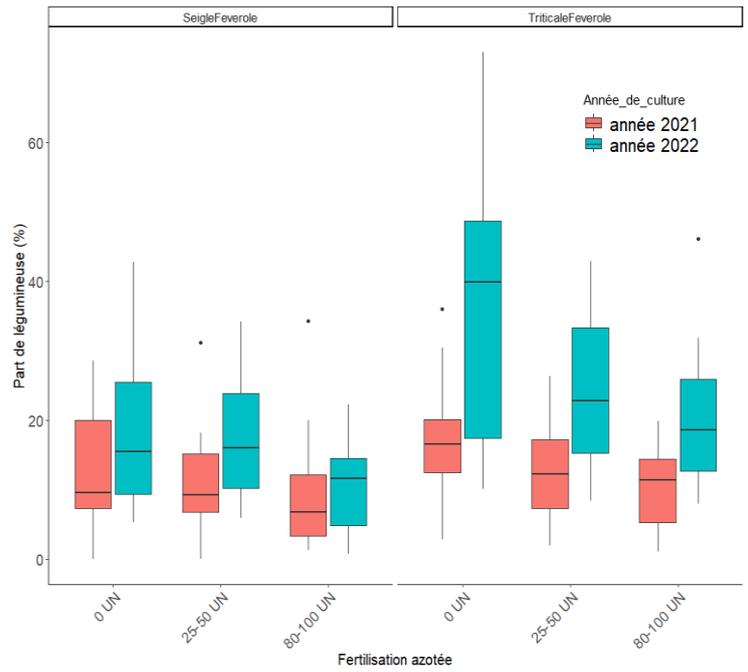


Figure 7 : Proportion de légumineuse en fonction de la fertilisation, de l'année de culture et de l'association (n = 154)

3. Résultats

3.1. Rendement

3.1.1. Production de biomasse

Sur les 27 essais étudiés, une forte hétérogénéité du rendement est observée (de 1,4 à 15,8 t MS/ha). La moyenne des rendements, toutes modalités confondues est de 6,9 t MS/ha. Des écart-types importants pour les rendements au sein de chaque essai sont également observés. Les rendements moyens sont supérieurs en 2022 (10 essais avec une moyenne de 7,6 t MS/ha) comparé à 2021 (17 essais avec une moyenne de 6,4 t MS/ha).

Il est observé une augmentation du rendement avec la fertilisation. Les rendements moyens sans fertilisation (5,7 t MS/ha) sont inférieurs aux rendements moyens avec une fertilisation totale de 25 à 50 UN (6,8 t MS/ha), qui sont eux même inférieurs aux rendements moyens avec une fertilisation totale de 80 à 100 UN (8,2 t MS/ha). Cela est confirmé par une analyse de la variance, la fertilisation a bien une influence significative sur le rendement ($p\text{-value} = 1,049 \times 10^{-11}$, annexe 2, figure A).

Concernant la composition du couvert, des différences de rendement sont également observées. Les CIVE en culture pure céréale ont tendance à produire des rendements inférieurs aux cultures associées en absence de fertilisation et des rendements supérieurs en présence de fertilisation (figure 5). Cela est vérifié pour les deux classes de fertilisation. Concernant les cultures pures céréales, en absence de fertilisation, le triticale pur montre des rendements moyens supérieurs au seigle pur. Alors qu'en présence de fertilisation, c'est le seigle pur qui a les rendements moyens les plus élevés. En culture associée, pour une même dose de fertilisation, l'association seigle-féverole a des rendements moyens supérieurs au triticale-féverole en condition de fertilisation. Des différences de rendements entre les deux années d'expérimentation sont également observées. En effet, comme il a été dit précédemment, l'année 2022 montre des rendements moyens supérieurs à l'année 2021. Cependant, cette augmentation de rendement est inférieure pour le triticale (associé ou non) par rapport au seigle. De plus, en 2022, les rendements en triticale-féverole sont supérieurs à équivalents au triticale pur quelle que soit la fertilisation.

Une analyse de la variance montre que la composition de la CIVE (culture associée ou culture pure céréale) a bien un impact considéré comme significatif sur le rendement ($p\text{-value} = 0,032$). Cependant, l'interaction entre les variables « fertilisation » et « composition de la CIVE » n'est pas considérée comme significative, mais la $p\text{-value}$ (0,067) est proche du seuil alpha de 5 % (annexe 2, figure A).

La durée du cycle de culture et plus précisément le nombre de degrés-jours a également été analysé graphiquement. Ce dernier montre une relation positive avec le rendement (figure 6). Le R^2 ajusté (0,38) reste assez faible, mais ici toutes les modalités ont été prises en compte.

3.1.2. Proportion de légumineuse à la récolte

Concernant la proportion de légumineuses à la récolte, une grande hétérogénéité entre et au sein des différents essais (de 0 à 73 % de légumineuses à la récolte pour une moyenne de 15,8 %) est observée. De plus, la part de légumineuses à la récolte a augmentée sur l'année 2022 (figure 7).

L'analyse de la variance montre que les différentes modalités (fertilisation et composition du couvert) ont une influence significative sur cette variable ($p\text{-value} = 3,186 \times 10^{-7}$ pour la fertilisation ; $p\text{-value} = 0,0002$ pour la composition du couvert, annexe 2, figure B). En effet, il y a une relation négative entre la fertilisation azotée et la proportion de légumineuses. La moyenne des essais sans fertilisation est de 19,7 %, pour les essais fertilisés de 25 à 50 UN de 15,2 % et 12,4 % pour une fertilisation de 80 à 100 UN.

Concernant la composition du couvert, la proportion moyenne de féverole est de 13,1 % en seigle-féverole et de 18,7 % en triticale-féverole. Ainsi, c'est en présence de triticale que la féverole se développe le mieux, quelle que soit la fertilisation et l'année considérée.

Pour finir, la variable pluviométrie est conservée dans le modèle, car selon l'AIC, elle permet un meilleur ajustement du modèle. Graphiquement, une relation négative entre la pluviométrie et la proportion de légumineuse est observée pour l'année 2022 (annexe 3, figure A). Mais d'après l'analyse de la variance, cette variable n'est pas considérée comme significative au seuil $\alpha = 5\%$ et les R^2 ajustés sont faible.

3.2. Taux de matière sèche

Une forte hétérogénéité des taux de MS entre et au sein des différents essais est observée (de 14,5 à 42,8 % de MS).

La composition de la CIVE a un impact significatif sur le taux de MS (p -value = $9,561 \times 10^{-9}$, annexe 2, figure C). En effet, le taux de MS moyen pour les cultures pures céréales est de 26,6 % contre 24,1 % pour les cultures associées. Concernant l'effet de la fertilisation, il n'est pas considéré comme significatif au seuil $\alpha = 5\%$, (p -value = 0,07). Le triticale montre un taux de MS supérieur au seigle d'en moyenne 3,3 points en culture pure et 1,7 point en culture associée (figure 8). Les associations ont toujours un taux de MS plus faible que la culture pure pour une céréale donnée. De plus, l'effet composition du couvert est le même quelle que soit la fertilisation (p -value = 0,14). Donc l'interaction entre les variables espèces et fertilisation n'est pas significative. En 2021, l'association triticale-féverole a un taux de MS équivalent ou légèrement supérieur au seigle pur. Cependant en 2022, le triticale associé montre des taux de MS beaucoup plus faibles et ce, surtout en absence de fertilisation. Ainsi, une deuxième analyse de la variance a été réalisée sur un jeu de données comprenant uniquement le seigle associé ou non ($n = 181$) et les résultats sont similaires à la première analyse (le nombre de degrés-jours ainsi que la composition du couvert ont des impacts significatifs sur le taux de MS) (annexe 2, figure D).

Cela a également été réalisé sur un jeu de données incluant uniquement le triticale associé ou non ($n = 166$). Les résultats de l'analyse de la variance sont également similaires (annexe 2, figure E). La fertilisation ainsi que son interaction avec la composition de la CIVE n'ont donc pas d'impacts sur le taux de MS.

Les degrés-jours cumulés ont aussi un impact significatif sur le taux de MS (p -value = 0,0001). Une relation linéaire positive entre ces deux variables est observée, quelle que soit la composition de la CIVE. Cependant les R^2 ajustés sont faibles ce qui peut être expliqué par le fait que la relation linéaire ne prend pas en compte l'effet groupe lié aux hétérogénéités entre les parcelles.

3.3. Dynamique de l'azote avec retour de digestat

Comparaison des cas-types seigle 50 UN et seigle-féverole 50 UN.

Seigle pur 50 UN (figure 9) :

Dans les expérimentations PAMPA, le rendement moyen du seigle pur fertilisé avec 50 UN est de 7,1 t MS/ha, avec une teneur en azote moyenne de 1,49 %. Cela permet de calculer les exportations d'azote contenu dans la biomasse aérienne du seigle : 105 UN. Après passage dans le méthaniseur, et donc en retirant les pertes liées au stockage et à l'épandage, 62 UN reviennent sur la parcelle.

Il a été dit plus tôt que pour produire ces 7,1 t MS/ha, une fertilisation de seulement 50 UN est nécessaire, ainsi les 12 UN de surplus vont enrichir le stock d'azote du sol.

Cependant, si l'on a exporté 105 UN en fertilisant seulement 50 UN, cela signifie que le seigle a puisé 55 UN dans le stock d'azote du sol alimenté par la minéralisation. Ainsi, cela aboutit à une diminution du stock d'azote du sol de 43 UN à chaque cycle ($-55 + 12 = -43$ UN).

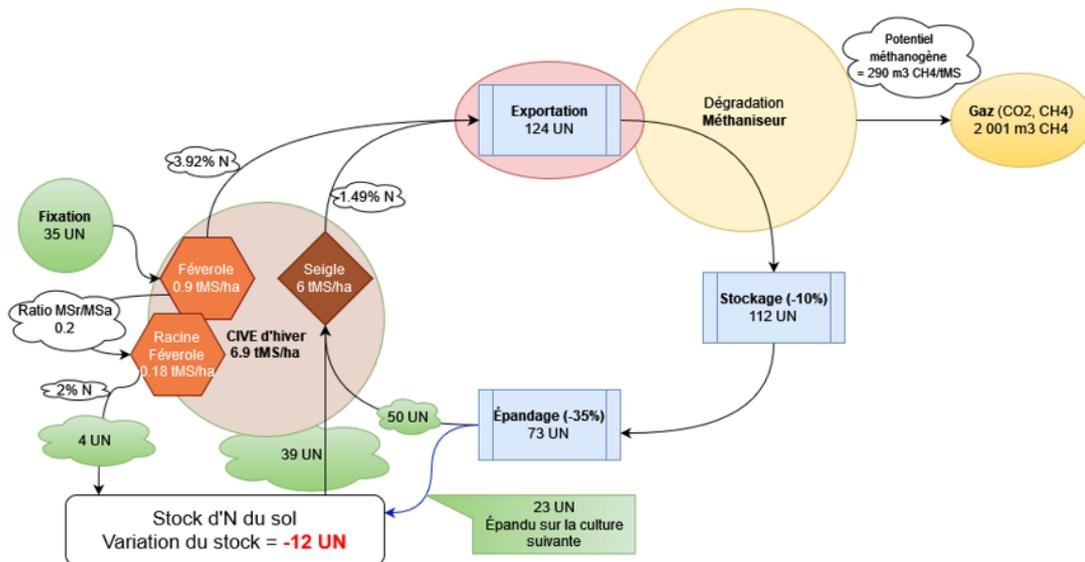


Figure 10 : Schéma de la dynamique de l'azote avec retour de digestat pour une CIVE en association seigle-féverole (50UN)

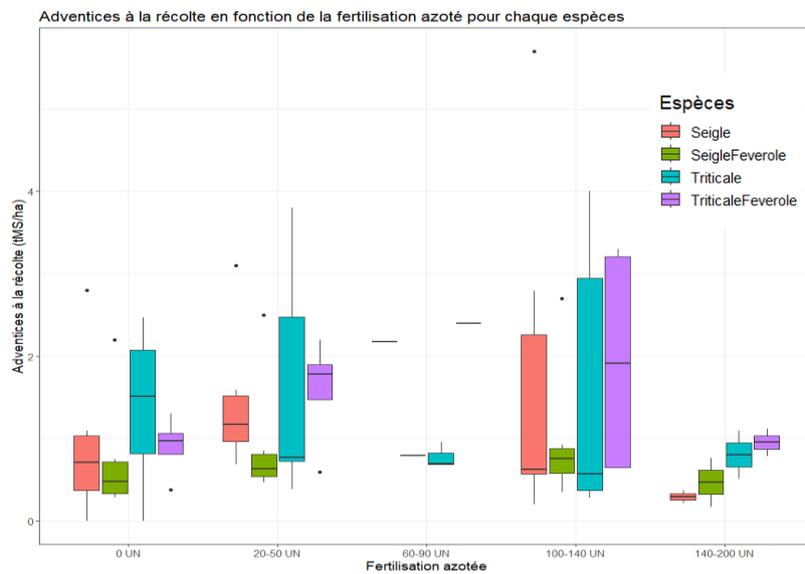


Figure 11 : Quantité d'adventice à la récolte en fonction de la fertilisation et de la composition du couvert (n = 266)

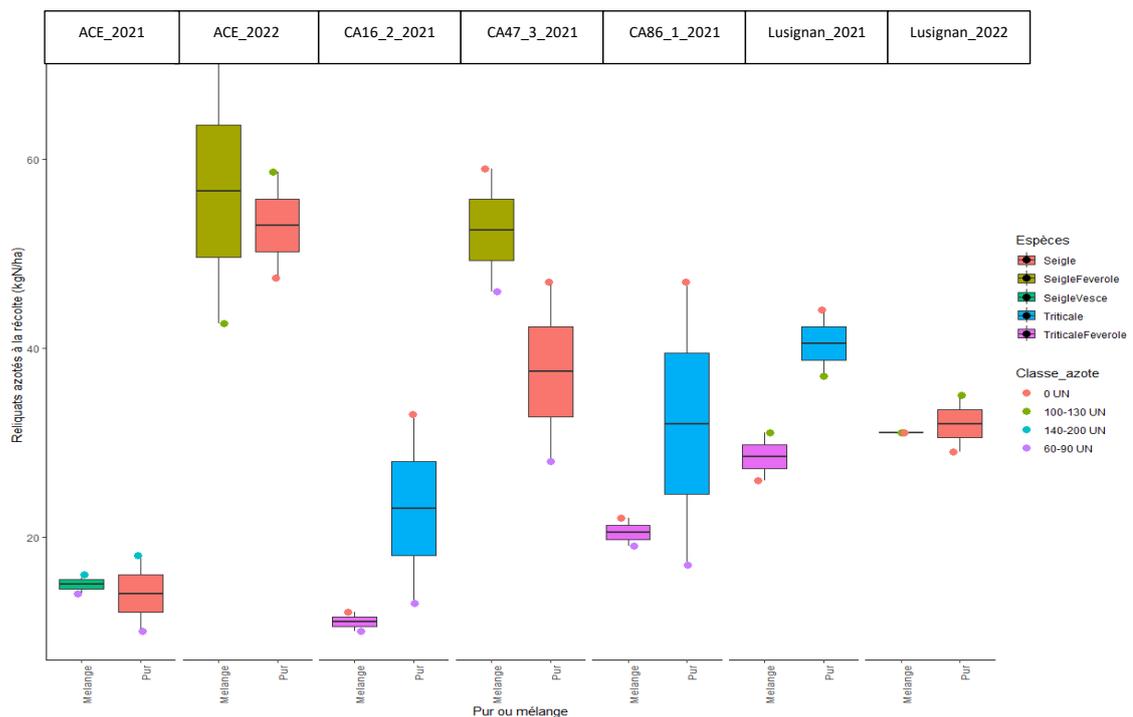


Figure 12 : Reliquats azotés pour chaque essai en fonction de la composition de la CIVE et de la fertilisation (n = 28)

Cette même dynamique a été observée avec le cas-type seigle-féverole 50 UN (figure 10) :

Le rendement moyen du seigle-féverole, fertilisé avec 50 UN est de 6 t MS/ha de seigle et 0,9 t MS/ha de féverole. Ainsi, comme il a été précisé dans les hypothèses, on considère que la féverole n'utilise que l'azote atmosphérique fixé. De plus, la féverole a une biomasse aérienne riche en azote : 3,9 % d'azote. Cela permet de calculer la quantité d'azote contenue dans la biomasse aérienne exportée : 124 UN. Après passage dans le méthaniseur la quantité d'azote épandue est de 73 UN.

Cela signifie que 50 UN sont utilisés pour la croissance du seigle et les 23 UN restant vont alimenter le stock d'azote du sol. Sachant que pour combler les 50 UN de fertilisation, le seigle a puisé 39 UN dans le sol afin d'expliquer la quantité d'azote exportée.

Il est également observé que la biomasse racinaire de la féverole contribue à alimenter le stock d'azote du sol (+4 UN), puisque l'azote de sa biomasse est issu de la fixation symbiotique est que cette biomasse est estimée à 20 % de la biomasse aérienne à une teneur de 2 % d'azote.

Ainsi, le bilan des entrées et des sorties de ce stock d'azote du sol abouti à une variation de -12 UN à chaque cycle.

Pour une fertilisation et un rendement donné, les exportations d'azote sont par conséquent toujours supérieures en présence de légumineuses. Cela induit qu'après les pertes liées au stockage et à l'épandage, le retour de digestat est plus riche en azote qu'en condition pure céréale.

On observe également que dans le cas sans fertilisation au départ, avec un rendement de 5,9 t MS/ha, l'azote présent dans le retour de digestat suffit à compenser l'azote exporté (annexe 5).

3.4. Biomasse d'adventices récoltée

Il est observé une très forte hétérogénéité de la biomasse d'adventices entre et au sein des différents essais (de 0 à 5,7 t MS/ha). Six essais se démarquent avec des biomasses d'adventices moyennes de minimum 0,5 t MS/ha, ACE_2022, CA23_2_2022, CA37_1_2021, CA40_1_2022, CA86_1_2021, Lusignan_2022. En analysant ces six essais, une tendance à l'augmentation de la quantité d'adventices en fonction de la fertilisation azotée est observée (figure 11).

Cependant, excepté pour l'essai CA37_1_2021 ($R^2_{adj} = 0,39$) les R^2 ajustés associés aux différents essais sont très faibles.

La figure 11, avec les six essais ayant les biomasses d'adventices les plus élevées, montrent qu'en absence de fertilisation ou à dose 20-50 UN, moins d'adventices sont récoltées en culture associée qu'en culture pure céréale. En condition de fertilisation supérieure à 60 UN, les adventices sont davantage présentes en culture associée qu'en culture pure céréale.

Il est également observé que le triticale a une hétérogénéité d'adventices plus élevée au sein de ces six essais. De plus, dans trois classes de fertilisation sur cinq, le triticale associé ou non montre des moyennes d'adventices plus importantes que le seigle.

3.5. Etat du sol à la récolte

3.5.1. Impacts sur les reliquats azotés

Une forte variabilité de reliquats azotés à la récolte entre les essais est observée (figure 12).

La figure 12 montre que 5 essais sur 7 ont des reliquats azotés plus faibles à la récolte en condition de fertilisation comparée à la condition sans fertilisation. De plus, il est observé que les cultures associées avec du seigle montrent plus de reliquats azotés que le seigle pur. Cependant, c'est le contraire qui est observé avec le triticale. Le triticale associé à la féverole montre toujours moins de reliquats que le triticale pur.

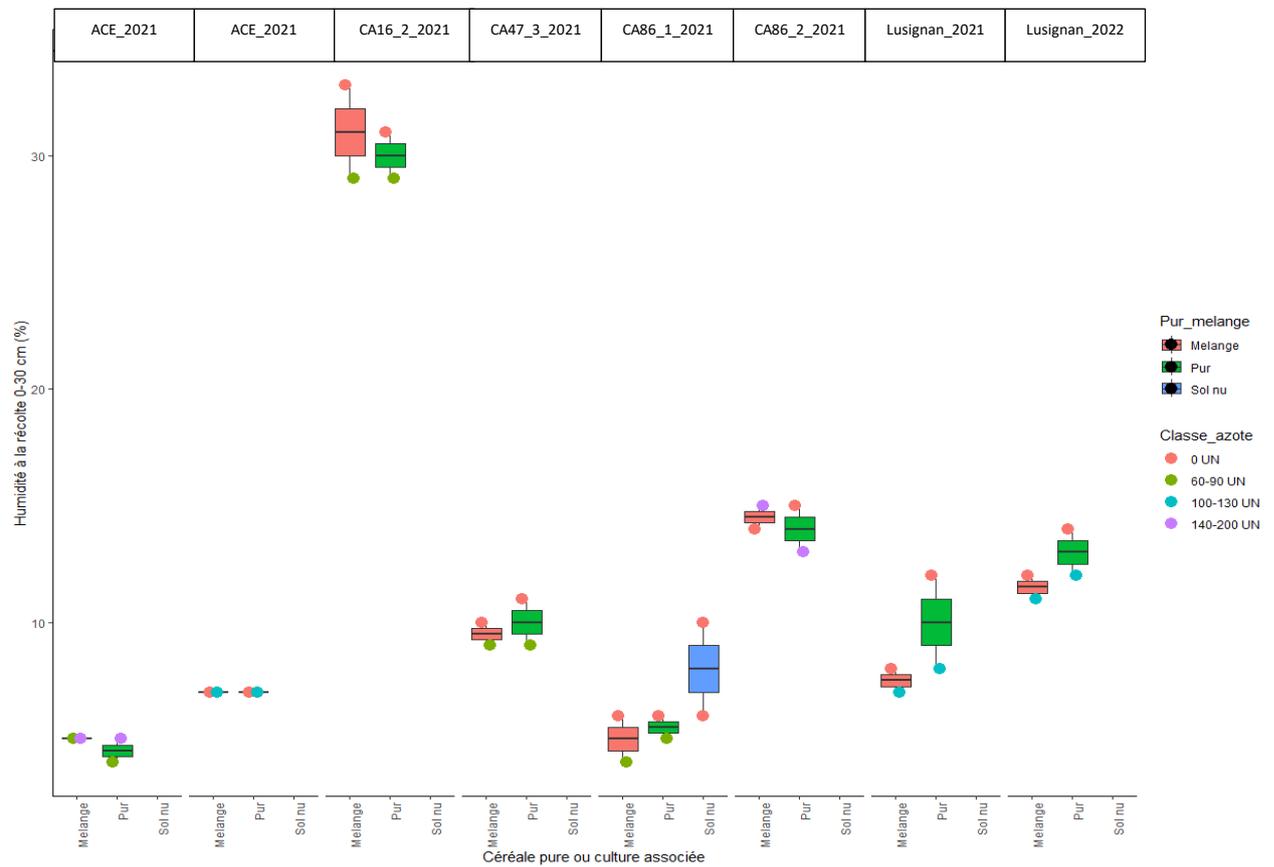


Figure 13 : Humidité du sol à la récolte pour chaque essai en fonction de la composition de la CIVE et de la fertilisation (n = 34)

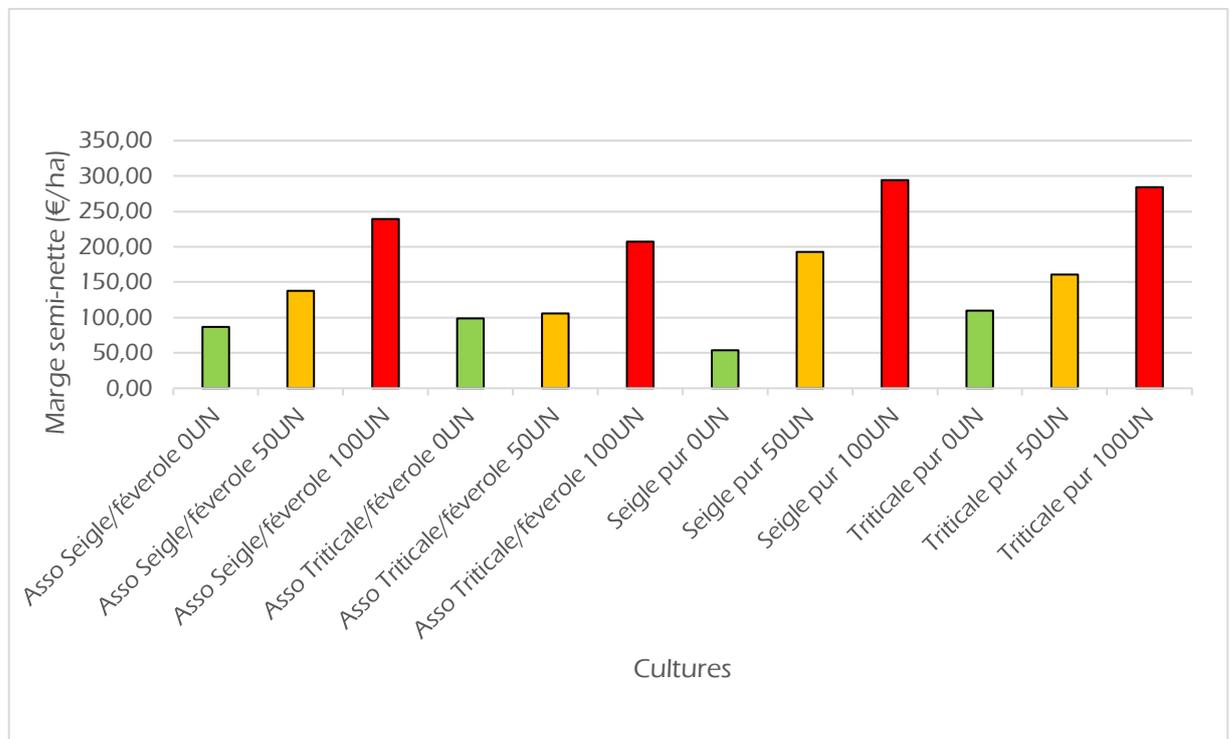


Figure 14 : Histogramme des marges semi-nettes avec retour de digestat

Les reliquats azotés ont également été observés au cas par cas, pour chaque essai. L'essai CA16_2_2021 montre en triticales pur sans fertilisation des reliquats azotés de 33 UN avec un rendement de 3,3 t MS/ha. En présence d'une fertilisation de 80 UN, 13 UN de reliquats azotés sont observés avec un rendement de 4,5 t MS/ha.

L'essai ACE_2022, montre une forte différence de reliquats azotés en culture associée (environ 30 UN de différence) et une différence bien plus faible en culture pure céréale (environ 10 UN).

Pour l'essai CA86_1_2021, le contraire est observé. Une différence d'environ 30 UN en culture pure triticales et une différence bien plus faible (environ 5 UN) en culture associée.

3.5.2. Impacts sur l'humidité du sol à la récolte

Concernant la fertilisation, la plupart des essais et des modalités montrent que l'humidité du sol à la récolte diminue lorsque la fertilisation augmente. En effet, pour la plupart des modalités, l'humidité du sol sur l'horizon 0-30 cm est supérieures ou égales avec une fertilisation réduite ou nulle (figure 13).

En ce qui concerne l'impact des légumineuses, sur les 7 essais montrant des différences d'humidité du sol à la récolte sur l'horizon 0-30 cm, 4 essais ont une humidité inférieure en association par rapport à la culture pure. Cela est également observé sur l'horizon 30-60 cm avec 4 essais sur 6 ayant une plus faible humidité en association.

Au sein des essais, aucune relation entre l'humidité du sol et la proportion de légumineuses à la récolte n'est observée.

Cependant des relations ont été observées entre l'humidité du sol et le rendement. Par exemple, pour les essais CA16_2_2021, Lusignan_2021 et Lusignan_2022, les humidités du sol sont supérieures en absence de fertilisation, lorsque les rendements sont faibles.

3.6. Intérêts des associations pour le bilan économique des CIVE

Pour rappel, dans SYSTERRE®, la marge semi-nette est calculée en soustrayant les charges totales au produit brut, sachant que le produit brut est proportionnel au rendement total. Ainsi, les rendements moyens pour les modalités de céréales pures en conditions fertilisées sont supérieurs aux rendements moyens des cultures associées pour les mêmes fertilisations (figure 14).

De plus, les charges sont supérieures en culture associée du fait d'un prix plus important des semences (estimé par SYSTERRE® à 33 €/ha en semences de féverole fermière, tableau 2).

Ainsi, la marge semi-nette est plus faible en culture associée fertilisées. En effet, pour une fertilisation de 100 UN, la différence est de 55 €/ha entre le seigle associé et le seigle pur. Alors qu'en absence de fertilisation le seigle associé montre une marge semi-nette supérieure de 33 €/ha. Concernant le triticales, il permet toujours une marge semi-nette supérieure en culture pure qu'en culture associée : sans fertilisation +10 €/ha et avec une fertilisation de 100 UN, +77 €/ha.

Ainsi, excepté avec le seigle en absence de fertilisation, la marge semi-nette observée est toujours plus faible en culture associée qu'en culture pure céréale.

4. Discussion et perspectives

4.1. L'association et la fertilisation impactent le rendement

4.1.1. L'association et fertilisation impactent la production de biomasse

Une très forte hétérogénéité des rendements entre les différents essais a été observée et cela est en accord avec la bibliographie. Cette hétérogénéité est probablement due aux différentes conditions pédoclimatiques. Cela peut également être dû aux différentes pratiques culturales (travail du sol, semis, fertilisation, etc...). En effet ces dernières n'ayant pas été imposées dans le protocole, les méthodes propres à chaque agriculteur ont pu influencer la réussite de la culture.

La première hypothèse (H1) était que « le rendement d'une culture associée avec une fertilisation réduite est similaire au rendement d'une culture en céréale pure fertilisée ». Cela n'a pas été vérifié dans les essais PAMPA. En effet, l'hypothèse est vérifiée uniquement dans les modalités sans fertilisation. Avec fertilisation, les rendements des cultures associées sont inférieurs aux cultures pures. Une différence moyenne 1 t MS/ha est observé pour une fertilisation de 25 à 50 UN, et d'1,5 à 2 t MS/ha pour un apport de 80 à 100 UN. Cela a été vérifié pour les deux années.

L'analyse de la variance a permis de vérifier que la composition du couvert ainsi que la fertilisation ont bien des influences significatives sur le rendement. Cependant, l'interaction entre ces deux variables n'est pas considérée comme significative, ce qui signifie que l'effet de la fertilisation est le même quelle que soit la composition du couvert. Il ne faut donc pas réduire la fertilisation si l'objectif est de garder le même niveau de rendement entre céréales pures et associations.

Il a été observé que les rendements sont inférieurs pour le triticale sur l'année 2022, cela est expliqué par une mauvaise levée (40 à 50 %) de ce dernier. Ce phénomène a été observé pour la plupart des essais, ainsi que chez des essais partenaires (ARVALIS et projet RECITAL) ayant également utilisé cette variété BIKINI. Il est donc probable que cette mauvaise levée ne soit pas due à un semis mal réalisé, mais plutôt à un défaut de la semence certifiée.

Néanmoins, la mauvaise levée du triticale en 2022 a permis un meilleur développement de la féverole. Par conséquent, cette année les rendements en triticale-féverole, ont été supérieurs ou équivalents au triticale pur quelle que soit la fertilisation. Ces résultats posent la question de l'optimisation de la densité de semis des mélanges. L'enjeu est double avec la maîtrise des charges liées aux semences.

Les essais du projet PAMPA ont été conduits avec une fertilisation minérale. L'impact de la forme de fertilisation minérale ou organique sur le rendement des associations serait à approfondir.

Les résultats des essais confirment une relation positive entre les rendements et le nombre de degrés-jours également lié à la durée du cycle de culture. Ces résultats sont en accord avec l'impact de la dates de semis et de récolte sur le rendement observé dans les études précédentes (Szerencsits, 2014; Marsac et al., 2019; Marsac & Dagorn, 2021; Launay et al., 2022). De même, dans le réseau PAMPA le mois d'avril est la période durant laquelle la production de biomasse est la plus importante. Les essais confirment qu'une récolte après le 15 avril permet d'atteindre 5 tMS/ha. Ce qui correspond à un niveau de rendement économiquement intéressant (ADEME, 2019; Marsac et al., 2020).

4.2.2. Variabilité de la proportion de légumineuse

L'hypothèse H1.2 est validée, les espèces végétales utilisées ainsi que la fertilisation ont bien des impacts sur la proportion de légumineuses à la récolte.

En 2022, la densité de semis de féverole a été doublée (20 grains par m²). Cependant, la proportion de légumineuses était plus importante que celle de la céréale, mais elle n'a pas doublé.

Il a également été observé que la proportion de légumineuses en triticale-féverole pour l'année 2022 est très importante et hétérogène quelle que soit la fertilisation. Un lien peut être fait entre la mauvaise levée du triticale expliquée plus tôt et le fort développement de la légumineuse. Sur une partie des essais le triticale a mal levé ce qui induit des rendements faibles en triticale pur. Alors qu'en culture associée, lorsque le triticale a mal levé, le rendement a été sécurisé par la féverole qui a eu un meilleur développement.

De plus, il existe une relation négative entre la fertilisation azotée et la proportion de légumineuse à la récolte quelle que soit la céréale utilisée. En effet, la céréale étant plus compétitive que la légumineuse pour l'azote du sol, la céréale va avoir un meilleur développement que la légumineuse en condition de fertilisation azotée (Louarn, et al., 2010).

L'impact négatif de la pluviométrie sur la proportion de féverole observé en 2022 est lié à deux essais. Ainsi, l'effet observé serait davantage lié au contexte pédoclimatique (type de sol) de ces deux essais qu'à l'effet seul de la pluviométrie. De plus, l'analyse de la variance ne considère pas de différence significative de la pluviométrie sur la proportion de légumineuse. Il pourrait être intéressant d'étudier sa répartition sur le cycle, avec par exemple, les cumuls mensuels.

4.3. L'association impacte négativement le taux de MS

Les résultats observés valident l'hypothèse H2 : le taux de MS diminue en culture associée comparé à une culture pure. En effet, il a été observé qu'en moyenne les cultures associées ont un taux de MS inférieur de 2,5 points. En moyenne, les légumineuses ont un taux de MS de 17,2 % et représentent 15,8 % du rendement, cela explique donc cette diminution. Cela a également été confirmé par l'analyse de la variance et ces différences sont observées en culture associée avec du seigle, comme avec du triticale. Le triticale a généralement un taux de MS supérieur au seigle en culture pure céréale comme en culture associée, ce qui est principalement dû à la variété BINIKI. Cependant, cette différence est plus faible en culture associée, cela est expliqué par le fait que le triticale a montré des proportions de féverole plus importante ce qui tend à diminuer davantage le taux de MS.

Il a été vu que le taux de MS est lié à la proportion de légumineuse et que cette proportion diminue lorsque la fertilisation augmente. Ainsi, le taux de MS devrait être lié positivement avec la fertilisation mais cela n'a pas été considéré comme significatif par l'analyse de la variance. Au vu de la plus forte proportion de légumineuse en association avec le triticale, des analyses de la variance ont été réalisées sur des jeux de données séparant triticale et seigle. Dans les deux cas, l'effet de la fertilisation et son interaction avec la composition de la CIVE ne sont pas considérés comme significatifs.

D'après la bibliographie, le taux de MS idéale est de 30 % (Marsac et al., 2021). Ainsi pour des récoltes tardives, il peut être intéressant d'inclure des légumineuses dans le mélange afin de baisser le taux de MS.

En effet, un taux de MS trop important pourrait engendrer des problèmes de stockage (le tas est plus difficile à tasser) en plus d'une diminution du pouvoir méthanogène. Cependant, sur des récoltes précoces, les légumineuses peuvent accentuer les problèmes liés à un taux de MS des céréales trop faible (jus d'ensilage plus importants).

4.4. Comparaison des dynamiques de l'azote avec retour de digestat en présence ou non de féverole

En comparant les schémas pour une fertilisation donnée, il est observé que les exportations d'azote sont toujours supérieures en présence de légumineuses. Cela induit qu'après les pertes liées au stockage et à l'épandage, le retour de digestat est plus riche en azote en condition de culture associée. En effet, la légumineuse a une biomasse plus riche en azote que la céréale. De plus, cette dernière fixe l'azote atmosphérique pour sa croissance, ce qui limite l'absorption de l'azote du sol.

Ainsi, même si les rendements, pour une fertilisation donnée sont équivalents ou légèrement inférieurs en présence de légumineuses, la part du rendement que représente la féverole augmente les exportations d'azote.

En comparant seigle pur et associé avec une fertilisation de 50 UN, une différence de 31 UN pour la variation du stock d'azote du sol à chaque cycle est observée, ainsi qu'un enrichissement en azote du digestat de 11 UN.

Sur l'ensemble des schémas (excepté le cas-type seigle-féverole sans fertilisation), la variation du stock d'azote à chaque cycle est négative. Cela est dû aux pertes d'azote liées au stockage et à l'épandage. Cependant, dans le cas-type seigle-féverole sans fertilisation, la fixation de l'azote atmosphérique réalisée par la féverole permet de compenser ces pertes et donc d'obtenir un bilan positif (annexe 5).

Ces schémas ont pour vocation d'expliquer la dynamique de l'azote avec retour de digestat. Ainsi, afin que ces schémas ne deviennent pas trop complexes, des hypothèses de simplifications ont été nécessaires. Ces schémas ont donc certaines limites.

En effet, la part d'azote fixée par la légumineuse diminue avec l'augmentation de la fertilisation, cela est difficile à estimer et n'a donc pas été pris en compte. Il est donc probable que l'effet de la légumineuse soit surestimé en condition de forte fertilisation (100 UN).

Pour une précision plus fine des teneurs en azote de la biomasse aérienne, il aurait été préférable d'avoir des moyennes pour chaque espèce (ici, les moyennes prennent en compte seigle et triticale) en condition de culture pure et de culture associée. Par manque de données, les moyennes de teneur en azote des céréales pour une fertilisation donnée confondent les résultats observés en pur et en culture associée.

Dans la réalité les parcelles ne reçoivent pas toujours exactement en digestat l'équivalent de ce qui a été exporté, et les intrants des méthaniseurs sont rarement 100 % CIVE. Ainsi, des intrants extérieurs au système peuvent permettre d'avoir un bilan azote positif par la méthanisation.

Concernant la catégorie « variation du stock d'azote du sol », cela est une simplification permettant de mettre en forme les différents postes du bilan azoté réalisé.

De plus, l'azote du sol est finement lié à la matière organique du sol. Or ces schémas ne la prennent pas en compte. Ils ne prennent également pas en compte les autres minéraux tels que le phosphore, le potassium, le magnésium et le calcium qui peuvent induire des carences dans certaines conditions.

Il serait également intéressant de réaliser ces simulations sur le long terme, en prenant en compte toute la rotation culturale.

4.5. Impacts des associations et de la fertilisation sur les biomasses d'adventices récoltées

Les résultats observés ne permettent pas de valider l'hypothèse H3, cela restera dépendant de la fertilisation considérée.

Une très forte hétérogénéité de la quantité d'adventices entre et au sein des différents essais est observée, cela peut être expliqué par un fort effet lié au contexte pédoclimatique et à l'état du stock de graines d'adventices de la parcelle. Sur les six essais étudiés, concernant la fertilisation, une tendance à l'augmentation de la quantité d'adventices avec l'augmentation de la fertilisation a été observée. En effet, les adventices sont bien souvent des espèces nitrophiles, ainsi elles profitent tout autant de l'azote disponible que la céréale.

Pour la composition du couvert, les résultats ont montré une diminution de la quantité d'adventices en culture associée, en absence ou avec une faible fertilisation, quelle que soit la céréale utilisée. En effet, lorsque la céréale n'aura pas suffisamment d'azote pour assurer un développement optimal, la féverole va permettre une meilleure couverture du sol ce qui limitera le développement des adventices. Cela est en accord avec la bibliographie, la couverture du sol est le facteur principal permettant de limiter le développement des adventices (Villefourceix-Gimenez et al., 2022).

Par contre, lorsque la fertilisation est plus importante (de 60 à 200 UN) on observe que les quantités d'adventices sont supérieures en culture associée. En effet, la légumineuse étant faiblement compétitive pour l'azote, l'azote disponible va davantage profiter à la céréale mais également aux adventices qui vont avoir un meilleur développement (Baraibar et al., 2018). De plus, la densité de semis de céréale est réduite en culture associée, donc la compétition avec les adventices va également être réduite ce qui induit leur plus fort développement.

Il se pourrait cependant, que dans un contexte d'agriculture biologique, les CIVE en cultures associées, non fertilisées soient une alternative efficace au désherbage, sur des parcelles ayant un salissement important.

4.6. Impacts des associations et de la fertilisation sur l'état du sol à la récolte

4.6.1. Impacts sur les reliquats azotés

Il n'est pas possible de valider ou non l'hypothèse H4.1.

Il a été vu que la majorité des essais ont montré des reliquats azotés à la récolte réduits en présence de fertilisation. Cependant, les R^2 ajustés sont très faibles et ne permettent pas de conclure à une corrélation négative entre ces deux variables. Il est possible que la fertilisation ait favorisé le développement de la culture ce qui, par la suite, lui a permis de puiser davantage d'azote et ainsi limiter les reliquats azotés à la récolte. Cela supposerait que les exportations d'azote et donc les rendements soient bien supérieurs en condition de fertilisation.

Cela a en parti été observé sur l'essai CA16_2_2021, en triticale pur, où les reliquats azotés sont plus importants sans fertilisation, lorsque les rendements sont faibles. Cependant, en calculant les exportations d'azote pour chacune de ces deux modalités, même en considérant que la biomasse du triticale en condition fertilisée est plus riche en azote que sans fertilisation, cela n'explique pas les différences de reliquats observées en plus de la fertilisation ajoutée. Il est également important de noter que les rendements observés sont des rendements faibles, n'ayant pas valorisé tout l'azote à leur disposition, ce qui suppose que l'azote n'était pas le facteur limitant la croissance de la culture.

Concernant la composition du couvert et au vu des différences observées entre les essais avec du seigle et ceux avec du triticale, il est difficile de conclure sur l'effet de la légumineuse sur les reliquats azotés à la récolte. Certains essais montrent des résultats en accord avec la bibliographie, comme l'essai CA47_3_2021, où les rendements en cultures associées montrent des proportions de légumineuse très importantes (31 % avec fertilisation et 77 % en absence de fertilisation).

L'azote du sol a donc été peu piégé ce qui induit des reliquats azotés importants. Mais cette tendance n'est pas retrouvée sur tous les essais. En effet, l'inverse est observé sur l'essai CA86_1_2021, pour des rendements totaux équivalents en absence de fertilisation, la culture associée a montré 25 % de légumineuses pour des reliquats équivalents à la culture pure triticales.

Ainsi, la majorité des différences observées ne sont pas dues aux associations, mais à la fertilisation ou à des facteurs que nous n'avons pas identifiés.

Afin de répondre au mieux à cette hypothèse, il serait intéressant de réaliser davantage de répétitions, mais également des mesures des reliquats azotés quelques semaines après la récolte, afin de considérer la minéralisation de l'azote apporté par les racines.

4.6.2. Impacts sur l'humidité du sol

Il n'est pas possible de valider ou non l'hypothèse H4.2.

Concernant la fertilisation, il a été vu que la plupart des essais montrent des humidités du sol à la récolte inférieures en condition de fertilisation comparé à une condition sans fertilisation. Cela est expliqué par le fait que les rendements augmentent avec la fertilisation, ce qui induit une diminution de l'humidité du sol. Cela est en accord avec les résultats observés par Tribouillois et al., 2018.

Pour la composition de la CIVE, les résultats sont hétérogènes, mais la majorité des essais montrant des différences d'humidité du sol à la récolte sur l'horizon 0-30 cm montrent une diminution en présence de féverole et sont donc en accord avec les résultats observés sur l'expérimentation réalisée par Blackshaw et al., en 2010.

En effet, la légumineuse a pour une date de récolte donnée, un taux de MS plus faible que la céréale. Ainsi, pour une quantité de matière sèche donnée, la légumineuse aura besoin de puiser plus d'eau que la céréale.

En ce qui concerne les essais montrant davantage d'humidité en présence de légumineuses, cela peut être expliqué par la perte de rendement suite à l'intégration de légumineuses. Cela est par exemple observé dans l'essai CA16_2_2021, où en condition de culture associée sans fertilisation, le rendement est bien inférieur au triticales pur et montre donc une humidité du sol supérieur de 2 points.

Il est donc difficile de valider ou non l'hypothèse H4.2. En effet, on aurait tendance à invalider l'hypothèse et dire que pour un rendement similaire l'humidité du sol est inférieure en culture associée. Cependant on a observé que l'intégration de légumineuses induit souvent une baisse de rendement ce qui peut engendrer une humidité du sol supérieure comparé à une culture de céréale pure.

Pour évaluer au mieux l'état du sol à la récolte, pour les reliquats azotés comme pour l'humidité du sol, il serait nécessaire de réaliser davantage de mesures, avec par exemple plusieurs répétitions par essai, afin de réaliser une étude statistique puissante.

4.7. L'association impacte négativement le bilan économique des CIVE

L'hypothèse H5 est invalidée.

Il a été vu que les marges semi-nettes sont toujours inférieures en culture associée comparée à une culture pure pour une fertilisation donnée (excepté dans le cas du seigle en absence de fertilisation). Cela est expliqué par les rendements qui sont inférieurs ou équivalents en culture associée, avec des charges liées aux semences qui sont plus importantes.

Cependant, ces calculs ne prennent pas en considération le retour de digestat. En effet, les calculs ont été réalisés avec un prix de vente de la CIVE de 110 €/t MS qui permet à l'agriculteur de récupérer du digestat.

Tableau 3 : Récapitulatif des hypothèses du mémoire

Comment la féverole, en association avec une céréale impacte les performances agronomiques, environnementales et économiques des CIVE d'hiver ?			
Questions	Hypothèses		Validation ou non ?
Comment l'association impacte le rendement ?	H1.1	Le rendement d'une culture associée avec une fertilisation réduite est similaire au rendement d'une culture en céréale pure fertilisée	NON
	H1.2	Les espèces végétales utilisées ainsi que la fertilisation azotée impacte la part de légumineuse à la récolte	OUI
Comment impacte le taux de matière sèche ?	H2	Le taux de matière sèche est diminué en culture associée avec des légumineuses	OUI
Quelle est l'efficacité de l'association vis-à-vis de la gestion des adventices ?	H3	La biomasse d'adventices est réduite en culture associée avec des légumineuses	OUI/NON
Quel est l'impact de l'association sur l'état du sol à la récolte ?	H4.1	Les reliquats azotés sont équivalents entre une culture associée et une culture pure céréale	?
	H4.2	L'humidité du sol à la récolte est équivalente entre une culture associée et une culture pure céréale	?
Comment les associations impactent-elles les performances économiques des CIVE ?	H5	Les marges semi-nettes sont équivalentes entre une culture associée et une culture pure céréale	NON

Comme il a été vu dans la partie sur la dynamique de l'azote avec retour de digestat, en présence de légumineuses le digestat est plus riche en azote et permettra donc une économie d'intrant azoté de l'ordre de 10 UN. Mais cela n'est valable uniquement si, pour un méthaniseur donné, la majorité des agriculteurs incluent des légumineuses dans leur CIVE, sinon cet effet sera dilué.

Il serait également intéressant de prendre en compte la pénibilité du chantier. En effet, une culture pure est bien souvent plus facile et plus rapide à travailler. Par exemple, l'hypothèse que le semis de la culture associée serait réalisé en une seule fois a été émise, cependant en fonction du semoir à disposition, cela n'est pas toujours faisable. Il est également possible que sur des récoltes précoces, un préfanage soit nécessaire afin de rehausser le taux de MS, en présence d'une quantité importante de féverole. De plus, la légumineuse ayant un taux de MS plus faible que les céréales, pour une quantité de matière sèche donnée, il sera nécessaire de transporter une quantité plus importante de matière fraîche en culture associée.

Cependant, les pertes de rendements pour la culture suivante n'ont pas été estimées et il a été vu dans l'introduction que l'intégration de légumineuses pourrait limiter ces pertes de rendement (Abdalla et al., 2019). Ainsi, il pourrait être intéressant de réaliser une étude approfondie sur le sujet, car il est important que les CIVE concurrencent le moins possible les cultures alimentaires.

4.8. Bilans des hypothèses

Au cours de ce mémoire, chacune des hypothèses citées en introduction ont été analysées. Ces analyses n'ont pas toujours permis de répondre aux différentes questions. Le tableau 3 résume les résultats de ces hypothèses.

Les analyses H4.1 et H4.2 n'avaient pas suffisamment de données afin de valider ou non les hypothèses.

H3 n'a pu être validée totalement, puisque l'hypothèse est dépendante de certains facteurs.

Et les hypothèses H1.2 et H2 ont été validées alors que H1.1, H5 ne l'ont pas été.

Ce travail aura permis de répondre à certaines questions posées par les acteurs de la méthanisation des régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire et d'en soulever de nouvelles. Une infographie basée sur les données de ce mémoire a également été réalisée afin de communiquer ces informations aux acteurs intéressés (agriculteurs, conseillers).

5. Conclusion

En France, la méthanisation se développe fortement, ce qui entraîne également une augmentation de la production de Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE). Actuellement, la majorité des CIVE sont des céréales cultivées en pure ce qui pourrait engendrer divers problèmes.

Dans le cadre de ce mémoire de stage, une étude approfondie a été réalisée sur les CIVE d'hiver en association céréales-féverole, en évaluant les performances agronomiques, environnementales et économiques, sur la base de 42 essais, mis en place chez des agriculteurs en région Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire.

Les rendements ont montré une forte hétérogénéité, probablement due aux différents contextes pédoclimatiques des régions considérées et aux différentes pratiques culturales des agriculteurs. Il a été vu que les dates de semis et de récolte ont une importance primordiale pour assurer des rendements corrects. Quant à la fertilisation, elle permet d'augmenter les rendements quelle que soit la composition de la CIVE. L'intégration de féverole induit généralement une perte de rendement en condition fertilisée, mais permet d'obtenir des rendements légèrement supérieurs en absence de fertilisation. En effet, dans ces conditions la proportion de légumineuses est importante et va diminuer avec l'augmentation de la fertilisation.

Le taux de MS de la féverole est plus faible que celui de la céréale, ainsi, la proportion de légumineuse et le taux de MS sont fortement liés. L'intégration de légumineuse peut donc être une solution afin de réguler et optimiser le taux de MS, lorsque les récoltes sont tardives.

Un cas-type a été étudié afin d'estimer l'enrichissement en azote d'un digestat produit à partir d'une CIVE en culture associée. Cela a montré un enrichissement du digestat d'environ 10 UN, ainsi qu'un bilan positif sur le bilan azoté global de 30 UN.

La quantité d'adventices entre et au sein des différents essais a également été très variable. Il a été mis en évidence que la fertilisation augmente la quantité d'adventices. En absence de fertilisation, ou lorsqu'elle est faible, ce sont les cultures associées qui ont montré le moins d'adventices. Cela permet d'envisager des alternatives au désherbage sur des parcelles ayant un salissement important.

Les performances environnementales ont été étudiées à travers les reliquats azotés et l'humidité du sol. Au vu de l'hétérogénéité des résultats, aucune tendance concernant l'impact seul de la composition de la CIVE sur ces deux indicateurs n'a pu être démontrée. Cependant, il a été vu qu'en plus de la composition de la CIVE, différents facteurs tels que le rendement, la proportion de légumineuses et la fertilisation ont un impact sur les reliquats azotés et l'humidité du sol à la récolte.

Pour les performances économiques, la marge semi-nette a montré une diminution en culture associée comparé à la culture pure céréale. En effet, les rendements ont tendance à être inférieurs et les charges de semences sont supérieures en présence de féverole. Ces résultats pourraient être contre balancé par l'intégration de l'impact sur la culture suivante, qui reste à explorer.

L'intérêt majeur de l'intégration de légumineuse dans les CIVE d'hiver semblerait être l'augmentation de la teneur en azote du digestat produit. Dans le contexte actuel cela ne représente pas un gain économique suffisant, mais cela pourrait le devenir si les prix des intrants augmentent. Le sujet mérite d'être approfondi sur certains aspects, tels que les intérêts environnementaux que pourraient apporter les légumineuses, comme sur le sol, sur la biodiversité ou sur les émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, une uniformisation des CIVE à l'échelle d'un territoire ne semble pas être une solution satisfaisante. Il serait intéressant de trouver des règles de décisions, pour choisir des itinéraires techniques et des associations, adaptées aux différentes contraintes techniques, pédoclimatiques et sociales de chaque agriculteur.

Liste de références bibliographiques

- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., Truu, J., Rees, R. M., & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology*, 25(8), 2530-2543. <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>
- ACE méthanisation. (2020). Maîtriser ma production de CIVE.
- Acharya, J., Bakker, M. G., Moorman, T. B., Kaspar, T. C., Lenssen, A. W., & Robertson, A. E. (2017). Time Interval Between Cover Crop Termination and Planting Influences Corn Seedling Disease, Plant Growth, and Yield. *Plant Disease*, 101(4), 591-600. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-16-0975-RE>
- ADEME. (2019). Réaliser une unité de méthanisation à la ferme.
- ADEME. (2022). La méthanisation. Consulté le 01/2023, <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-laction/valorisation-organique/methanisation>
- ADEME, & OBSERV'ER. (2020). Chiffres clés du parc d'unités de méthanisation en France au 1er janvier 2020.
- ARVALIS - Institut du végétal, CETIOM, & ITB. (2011). Cultures intermédiaires : Impacts et conduite.
- Avelin, C. (2022). Ressources en biomasse et méthanisation agricole : Quelles disponibilités pour quels besoins ? France AgriMer.
- Baraibar, B., Hunter, M., Schipanski, M., Hamilton, A., & Mortensen, D. (2018). Weed suppression in cover crop monocultures and mixtures.
- Bareha, Y. (2018). Modélisation des processus de transformation de l'azote en digestion anaérobie. Application à l'optimisation de la valorisation des digestats.
- Belleil, A., Ribeiro, E., & Valleix, S. (2015). Mélibio—Les céréales immatures—Synthèse bibliographique.
- Bes de Berc, L. (2020). Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique : La biomasse au service de l'Environnement et de l'Agriculture. *Agronomie, environnement et sociétés*. <https://doi.org/10.54800/bdb232>
- Blackshaw, R. E., Molnar, L. J., & Moyer, J. R. (2010). Suitability of legume cover crop-winter wheat intercrops on the semi-arid Canadian Prairies. *Canadian Journal of Plant Science*, 90(4), 479-488. <https://doi.org/10.4141/CJPS10006>
- Chambre d'agriculture du Gers. (2015). Compte rendu de l'essai méteil au LPA Valentées 2014/2015.
- Cohan, J.-P., Naudin, C., Hinsinger, P., Jeuffroy, M.-H., Corre-Hellou, G., Jeuffroy, M.-H., Pelzer, E., Justes, E., Biarnès, V., Schneider, A., & Bedoussac, L. (2014). Associations céréales-légumineuses récoltées en grain : Une réussite liée à l'ajustement de l'itinéraire.
- Cordeau, S., Grall, L., Lachmann, A., Martin, J., Matejcek, A., & Busset, H. (2019). Gestion des adventices en semis direct : Effet des couverts et de leur conduite. 24e Conférence du COLUMA - Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes – Orléans—3, 4 et 5 décembre 2019.
- Cordeau, S., Moreau, D., Rouge, A., Guillemin, J.-P., & Audeux, G. (2022). Optimiser la régulation biologique des adventices par l'utilisation de couverts végétaux à l'échelle du système de culture. <https://doi.org/10.54800/pet752>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-5777-4>
- Creamer, N., Bennett, M., Stinner, B., Cardina, J., & Regnier, E. (1996). Mechanisms of weed suppression in cover crop-based production systems.
- Decoopman, B., Houot, S., Germain, M., Hanocq, D., Airiaud, A., Lejare, L., & Le Roux, C. (2017). Valeur azote des digestat méthanisation. COMIFER.
- Ferrand, N. (2019). Bibliographie CIVE d'hiver.
- Ferrand, N., & Vrignaud, G. (2020). 1ère synthèse réseau CIVE 2019/2020. Réseau CIVE d'Hiver Vienne Agri Metha.
- Gungaabayar, A., Jha, A., Warkentin, T., Knight, D., Penner, G., & Biliget, B. (2023). Forage yield and biological nitrogen fixation of pea-cereal intercrops for hay production. *Agronomy Journal*, 115(2), 607-619. <https://doi.org/10.1002/agj2.21270>
- Hansen, V., Eriksen, J., Jensen, L. S., Thorup-Kristensen, K., & Magid, J. (2021). Towards integrated cover crop management : N, P and S release from aboveground and belowground residues. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313, 107392. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107392>
- Hermet, L. (2021). Étude de l'impact des cultures intermédiaires à vocation énergétique sur le bilan de l'eau et de l'azote—Mémoire de fin d'études.
- Holman, J. D., Arnet, K., Dille, J., Maxwell, S., Obour, A., Roberts, T., Roozeboom, K., & Schlegel, A. (2018). Can Cover or Forage Crops Replace Fallow in the Semiarid Central Great Plains? *Crop Science*, 58(2), 932-944. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.05.0324>
- Hupe, A., Naether, F., Haase, T., Bruns, C., Heß, J., Dyckmans, J., Joergensen, R. G., & Wichern, F. (2021). Evidence of considerable C and N transfer from peas to cereals via direct root contact but not via mycorrhiza. *Scientific Reports*, 11(1), 11424. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90436-8>
- Justes, E., Beaudoin, N., Bertuzzi, P., Charles, R., Constantin, J., Durr, C., Hermon, C., Joannon, A., Le Bas, C., & Mary, B. (2012). Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Rapport d'étude, INRA (France).
- Lamerre, J. (2020). FILABIOM - Produire de la biomasse en Hauts-de-France sans modification majeure de la rotation : Les CIVE. Agro-Transfert RT.
- Launay, C., Houot, S., Frédéric, S., Girault, R., Levavasseur, F., Marsac, S., & Constantin, J. (2022). Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems : Benefits and environmental impacts. A review.
- Lawson, A., Cogger, C., Bary, A., & Fortuna, A.-M. (2015). Influence of Seeding Ratio, Planting Date, and Termination Date on Rye-Hairy Vetch Cover Crop Mixture Performance under Organic Management. *PLOS ONE*, 10(6), e0129597. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129597>
- Legendre, A., Bouffartigue, B., Deleau, D., Deredat, 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 fourragers à base de céréales à paille et de légumineuses.

- Louarn, G., Corre-Hellou, G., Fustec, J., Pelzer, E., Julier, B., Litrico, I., Hinsinger, P., & Lecomte, C. (2010). Déterminants écologiques et physiologiques de la productivité et de la stabilité des associations graminées-légumineuses. <https://hal.science/hal-01173245>
- Marsac, S., & Chavassieux, D. (2019). Comment raisonner une culture intermédiaire pour la méthanisation ? Arvalis - Institut du végétal.
- Marsac, S., & Dagorn, N. (2021). RECITAL - CIVE - Tout ce que vous devez savoir. ARVALIS.
- Marsac, S., Dagorn, N., Van Vlierberghe, C., Cresson, R., & Cabeza-Orcel, P. (2021). Culture de biomasse : Zoom sur le potentiel méthanogène des CIVE. Consulté le 01/2023, <https://www.perspectives-agricoles.com/cultures-de-biomasse-zoom-sur-le-potentiel-methanogene-des-cive-@/view-3774-arvarticlepa.html>
- 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.
- Marsac, S., Heredia, M., Delaye, N., Labalette, F., Lecomte, V., & Bazet, M. (2020). Les cultures intermédiaires à vocation énergétique : De l'évaluation technico économique et environnementale à la construction des axes de travail régionalisés pour favoriser leur développement.
- Marsac, S., Quod, C., Leveau, V., Heredia, M., Delaye, N., Labalette, F., Lecomte, V., Bazet, M., & Sanner, E.-A. (2019). Optimization of French Energy Cover Crop Production in Double Cropping Systems for On-Farm Biogas Use. <https://doi.org/10.5071/27thEUBCE2019-1AO.4.5>
- Marx, I. (2020). Méthanisation agricole quelles conditions de durabilité de la filière en France ? Synthèse du rapport d'étude, WWF, World Wildlife Fund (France).
- Metais, P., Vuillemin, F., & Cordeau, S. (2019). Travail du sol et couverts : Quels effets sur les adventices ? MéthaFrance. (2023). Ensemble de la filière. <https://www.methafrance.fr/en-chiffres>
- Méthode d'Estimation des Restitutions par les Culture Intermédiaire—MERCİ. (2023). <https://methode-merci.fr/>
- Meyer, N., Bergez, J.-E., Constantin, J., Belleville, P., & Justes, E. (2020). Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management. *Agricultural Water Management*, 231, 105998. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105998>
- Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et de la Forêt. (2013). 1 000 méthaniseurs à la ferme en 2020 : Lancement du plan « Énergie Méthanisation Autonomie Azote ». Consulté le 01/2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/archives-presse-2012-2017/1-000-methaniseurs-a-la-ferme-en.html>
- Muhammad, I., Wang, J., Sainju, U. M., Zhang, S., Zhao, F., & Khan, A. (2021). Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure : A meta-analysis. *Geoderma*, 381, 114696. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114696>
- Pelzer, E., Bedoussac, L., Corre-Hellou, G., Jeuffroy, M.-H., Metivier, T., & Naudin, C. (2014). Association de cultures annuelles combinant une légumineuse et une céréale : Retours d'expériences d'agriculteurs et analyse.
- Peyrille, S., Bessonnet, S., Mauger, C., Mouillet, A., Rubin, B., Cabon, G., Le Moignier, V., & Bertrand, C. (2006). Sécuriser son système ! Avec des céréales ou des mélanges immatures. n° ISBN 2-84148-212-X.
- Ratier, F. (2018). Note technique—Les méteils fourragers conseils pour élaborer son mélange.
- Schneider, A., & Biarnès, V. (2021). Légumineuses, une entrée d'azote dans les systèmes : Comment ça marche et à quelles conditions ?
- Smith, R., Atwood, L., & Warren, N. (2014). Increased productivity of a cover crop mixture is not associated with enhanced agroecosystem services. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097351>
- Smith, R. G., Warren, N. D., & Cordeau, S. (2020). Are cover crop mixtures better at suppressing weeds than cover crop monocultures? *Weed Science*, 68(2), 186-194. <https://doi.org/10.1017/wsc.2020.12>
- Sturm, D., Kunz, C., Peteinatos, G., & Gerhards, R. (2017). Do cover crop sowing date and fertilization affect weed suppression. <https://doi.org/10.17221/1/2017-PSE>
- Szerencsits, M. (2014). Syn-Energy II – Synergetische Biogaserzeugung aus Zwischenfrüchten und nachhaltigen Fruchtfolgesystemen.
- Tonitto, C., David, M. B., & Drinkwater, L. E. (2006). Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems : A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(1), 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.07.003>
- Tosti, G., Benincasa, P., Farneselli, M., Tei, F., & Guiducci, M. (2014). Barley-hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. *European Journal of Agronomy*, 54, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.012>
- Tribouillois, H., Cohan, J.-P., & Justes, E. (2016). Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring : Assessment combining experimentation and modelling. *Plant and Soil*, 401(1-2), 347-364. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2734-8>
- Tribouillois, H., Constantin, J., & Justes, E. (2018). Cover crops mitigate direct greenhouse gases balance but reduce drainage under climate change scenarios in temperate climate with dry summers. *Global Change Biology*, 24(6), 2513-2529. <https://doi.org/10.1111/gcb.14091>
- Vandewalle, A. (2018). Synthèse régionale des expérimentations en grandes cultures—Récolte 2017. Chambre d'agriculture Pays de la Loire.
- Villefourceix-Gimenez, P., Colbach, N., Moreau, D., Minette, S., & Labreuche, J. (2022). Impact de la conduite des cultures intermédiaires sur la flore adventice : Résultats de l'analyse de 31 essais. <https://agronomie.asso.fr/aes-12-1-7>
- Vrignaud, G. (2019). Retour d'expérience sur l'implantation de CIVE en plaine de Thouars. ACE méthanisation.

Annexe 1 – Tableau récapitulatif des essais

Code Essai	Année de récolte	Classe sol	Pluviométrie (semis-21 avril)	Somme de températures (semis-21 avril)	Date de semis	Date de récolte	Essais retenus pour l'étude du rendement et du taux de MS	Raison expliquant la non retenue de l'essai pour l'étude du rendement et du taux de MS	Mesure de la biomasse d'adventice	Mesures des reliquats azotés	Mesures du taux d'humidité du sol
ACE_2021	2021	Sableux	330	1792	25/09/2020	03/05/2021		Pas de dose X/2	X	X	X
ACE_2022	2022	Sableux	223	1638	29/09/2021	04/05/2022	X		X	X	X
CA16_1_2022	2022	Argileux	341	1442	25/10/2021	14/04/2022	X		X		
CA16_2_2021	2021	Sableux	390	1462	07/11/2020	18/05/2021	X		X	X	X
CA16_3_2021	2021	Sableux	425	1672	22/10/2020	06/05/2021	X				
CA16_4_2021	2021	Argileux	375	1242	27/11/2020	12/05/2021	X				
CA16_5_2022	2022	Argileux	314	1440	19/11/2021	04/05/2022	X				
CA17_2_2022	2022		346	2145	03/09/2021	14/04/2022		Pas de dose X/2 et 0	X		
CA17_3_2021	2021	Argileux	434	1742	18/10/2020	22/04/2021		Pas de dose X/2			
CA17_3_2022	2022	Argileux	294	1679	18/10/2021	27/04/2022		Pas de dose X/2	X		
CA17_1_2021	2021	Limoneux	433	1729	20/10/2020	21/04/2021	X				
CA17_1_2022	2022	Limoneux	271	1594	12/10/2021	19/04/2022		Pas de dose X/2	X		
CA19_1_2021	2021	Sableux	400	1326	06/11/2020	06/05/2021	X		X		
CA19_2_2021	2021	Sableux	400	1326	06/11/2020	04/05/2021		Dose 0 : 50UN / 0.5X : 100UN / X : 150UN (apport de fumier 50UN)			
CA19_2_2022	2022	Sableux	393	1278	18/11/2021	13/05/2022	X				
CA23_2_2022	2022	Sableux	333	1666	14/10/2021	17/05/2022		Apport de digestat 104UN au semis → Dose X = 204UN	X		
CA23_1_2021	2021	Sableux	411	1210	19/10/2020	05/05/2021	X				
CA23_3_2021	2021	Sableux	383	1003	05/11/2020	05/05/2021		Uniquement Dose X = 165 UN	X		
CA37_1_2021	2021	Limoneux	399	1662	30/09/2020	03/05/2021	X		X		
CA37_1_2022	2022	Limoneux			25/10/2021	03/05/2022	X		X		
CA37_2_2022	2022				14/10/2021	04/05/2022	X		X		
CA37_3_2021	2021	Limoneux	399	1662	30/09/2020	10/05/2021	X				
CA40_1_2022	2022	Sableux	394	1621	22/10/2021	02/05/2022	X		X		
CA45_3_2021	2021				09/11/2020	10/05/2021		Pas de dose 0.5X			
CA45_1_2021	2021				15/10/2020	10/05/2021	X				
CA45_2_2022	2022		266	1384	13/10/2021	25/04/2022	X				
CA47_1_2022	2022	Argileux	355	1873	17/10/2021	02/05/2022	X				
CA47_3_2021	2021	Limoneux	456	1887	30/09/2020	29/04/2021		SeigleFeveroleX = 17.3tMS/ha (considéré comme une valeur aberrante)	X	X	X
CA47_2_2021	2021	Argileux	304	1184	30/11/2020	28/05/2021	X				
CA64_1_2021	2021	Limoneux	545	1710	22/10/2020	21/04/2021	X				
CA64_2_2021	2021	Limoneux	545	1710	22/10/2020	21/04/2021	X				
CA79_3_2022	2022		179	1284	14/10/2021	29/03/2022		Pas de dose 0 et 0.5X			
CA79_3_2022	2022		215	1429	14/10/2021	15/04/2022		Pas de dose 0 et 0.5X			
CA79_1_2021	2021	Limoneux	430	1460	20/10/2020	19/04/2021	X				
CA79_1_2022	2022	Limoneux	311	1505	13/10/2021	25/04/2022		Pas de dose 0			
CA79_2_2021	2021	Sableux	431	1468	15/10/2020	14/04/2021	X				
CA86_1_2021	2021	Argileux	391	1694	29/09/2020	22/04/2021	X		X	X	X
CA86_2_2021	2021	Argileux	411	1788	22/09/2020	26/04/2021		Seul essai à dose X > 100 (X = 160UN)	X		X
CA86_2_2022	2022	Argileux	234	1837	20/09/2021	02/05/2022		Pas de dose 0	X		
CA87_1_2021	2021	Sableux	671	1555	29/09/2020	30/04/2021	X				
CA87_2_2022	2022	Sableux	526	1548	24/09/2021	27/04/2022		Pas de dose 0	X		
Lusignan_2021	2021	Limoneux	429	1540	09/10/2020	28/04/2021	X		X	X	X
Lusignan_2022	2022	Limoneux	366	1752	01/10/2021	04/05/2022	X		X	X	X

Annexe 2 – Analyses des variances

```
> Anova(modelNEI2, type = 3, test = "F")
Analysis of Deviance Table (Type III wald F tests with Kenward-Roger df)

Response: Rendement_total

          F Df  Df.res    Pr(>F)
(Intercept)      49.2037  1    1.252  0.05886 .
Classe_azote_spé  27.4212  2 315.150 1.049e-11 ***
Pur_melange       4.5978  1 315.066  0.03278 *
Classe_azote_spé:Pur_melange  2.7257  2 315.002  0.06704 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure A : Analyse de la variance modelNEI2

```
> Anova(modelleg2, type = 3, test = "F")
Analysis of Deviance Table (Type III wald F tests with Kenward-Roger df)

Response: ln_pourcentage_légumineuse

          F Df  Df.res    Pr(>F)
(Intercept)      35.749  1    5.881 0.0010564 **
Pluviométrie       4.997  1    4.544 0.0810353 .
Classe_azote_spé  17.212  2 109.071 3.186e-07 ***
Espèces           14.636  1 110.127 0.0002168 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure B : Analyse de la variance modelleg2

```
> Anova(modelclimato2bis, type = 3, test = "F")
Analysis of Deviance Table (Type III wald F tests with Kenward-Roger df)

Response: MS_total_prc

          F Df  Df.res    Pr(>F)
(Intercept)      0.2213  1   27.339 0.6417945
Degré_jour       17.6813  1   43.197 0.0001291 ***
Classe_azote_spé  2.6995  2 312.579 0.0688089 .
Pur_melange       34.7835  1 312.607 9.561e-09 ***
Classe_azote_spé:Pur_melange  1.9290  2 312.300 0.1470219
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure C : Analyse de la variance modelclimato2bis

```
> Anova(modelclimato2bisseigle, type = 3, test = "F")
Analysis of Deviance Table (Type III wald F tests with Kenward-Roger df)

Response: MS_total_prc

          F Df  Df.res    Pr(>F)
(Intercept)      0.2605  1   27.512  0.61383
Degré_jour       7.4943  1   25.485  0.01113 *
Classe_azote_spé  2.1611  2 146.696  0.11885
Pur_melange      19.5599  1 146.593 1.888e-05 ***
Classe_azote_spé:Pur_melange  1.5855  2 146.467  0.20835
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure D : Analyse de la variance modelclimato2bisseigle

```
> Anova(modelclimato2bistriti, type = 3, test = "F")
Analysis of Deviance Table (Type III wald F tests with Kenward-Roger df)

Response: MS_total_prc

          F Df  Df.res    Pr(>F)
(Intercept)      0.4247  1   21.399 0.5215209
Degré_jour       17.8826  1   49.622 0.0001008 ***
Classe_azote_spé  1.7160  2 134.568 0.1836918
Pur_melange      29.9473  1 135.111 2.087e-07 ***
Classe_azote_spé:Pur_melange  1.2589  2 134.398 0.2872952
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figure E : Analyse de la variance modelclimato2bistriti

Annexe 3 – Complément de graphique

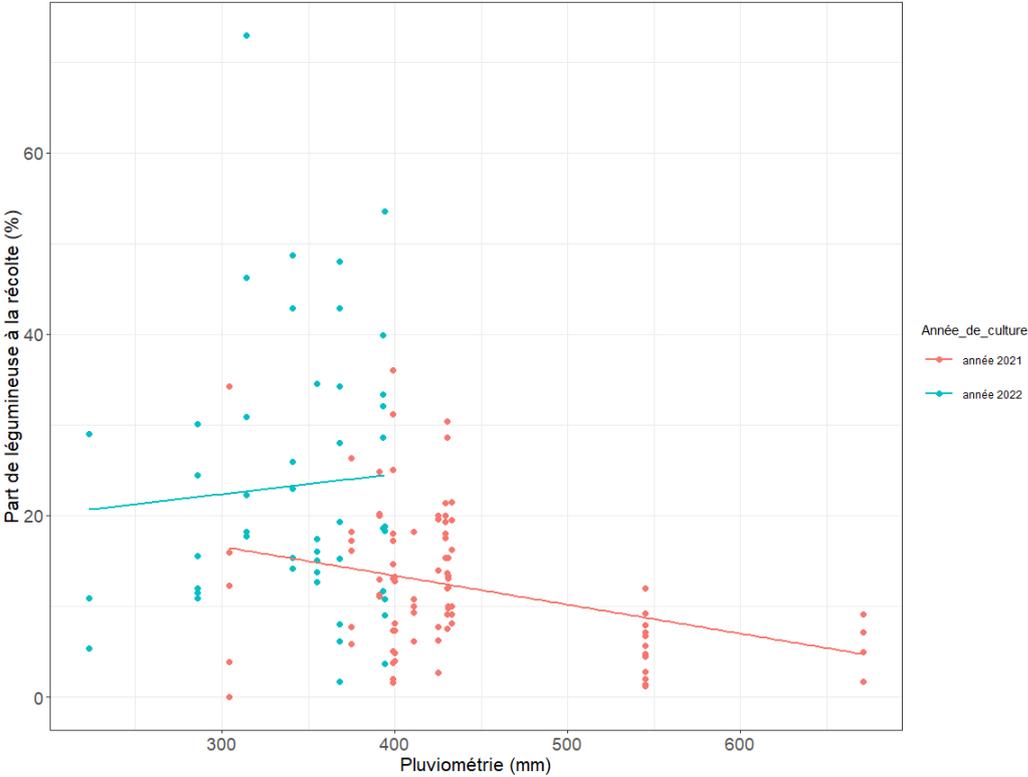
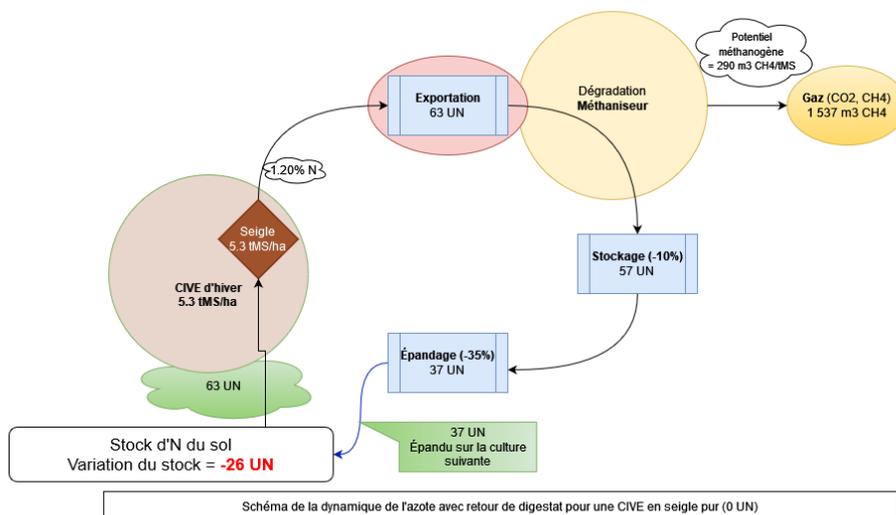
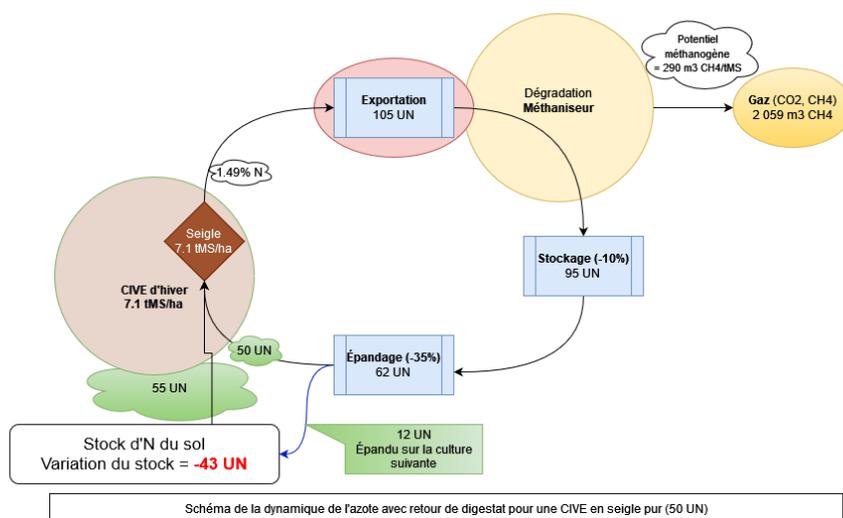
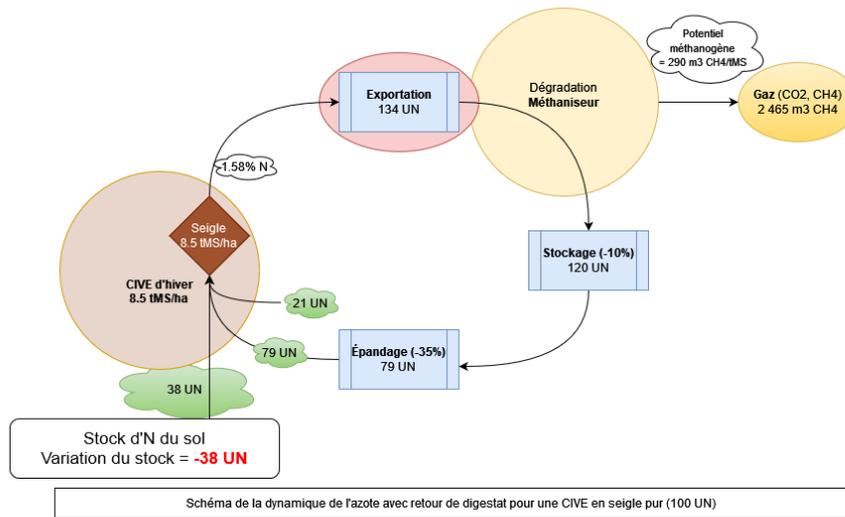


Figure A : Proportion de légumineuse à la récolte en fonction de la pluviométrie et de l'année

Annexe 4 – Schémas dynamique de l'azote avec retour de digestat en culture pure céréale



Annexe 5 – Schémas dynamique de l'azote avec retour de digestat en culture associée

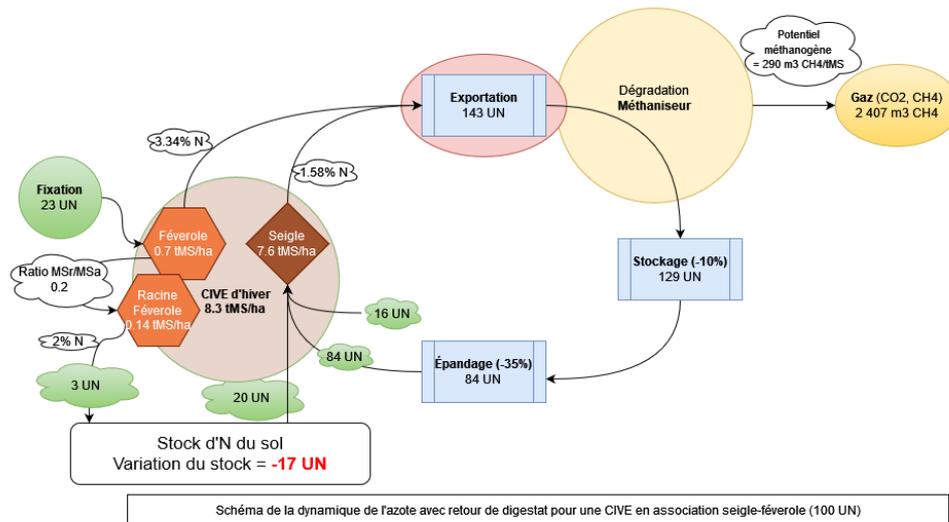


Schéma de la dynamique de l'azote avec retour de digestat pour une CIVE en association seigle-féverole (100 UN)

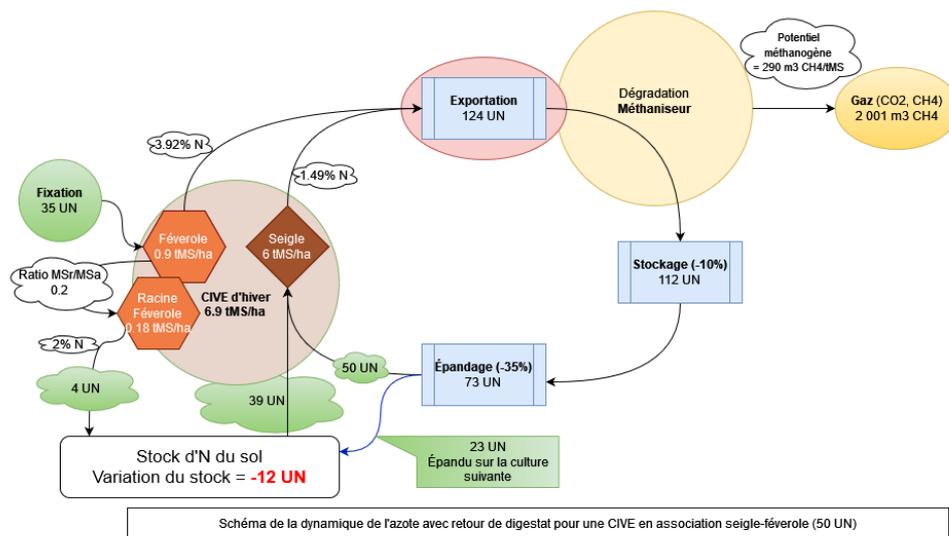


Schéma de la dynamique de l'azote avec retour de digestat pour une CIVE en association seigle-féverole (50 UN)

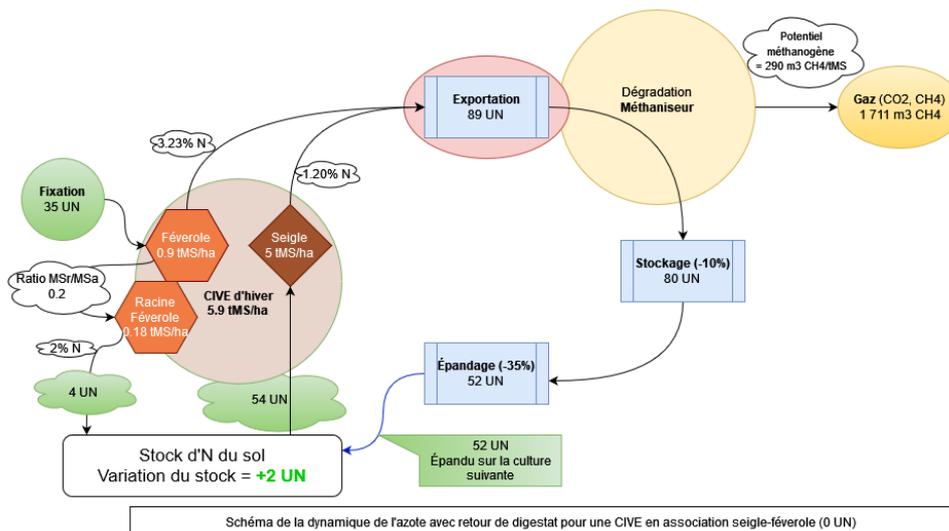


Schéma de la dynamique de l'azote avec retour de digestat pour une CIVE en association seigle-féverole (0 UN)

 	Diplôme et Mention : Master Biologie, Agrosociétés Parcours : Amélioration, Production et Valorisation du Végétal Option : Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes Responsable d'option : Matthieu CAROF
Auteur(s) : Jason LASSINCE Date de naissance* : 13/06/1998	Organisme d'accueil : Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine Adresse : Les Verrines, Lusignan, 86600
Nb pages : 25 Annexe(s) : 5	Maître de stage : Nicolas FERRAND
Année de soutenance : 2023	
Titre français : Intérêts d'associer de la féverole avec des céréales pour produire des CIVE d'hiver dans les régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire	
Titre anglais : The benefits of combining faba beans with cereals to produce winter energy cover crops in the Nouvelle-Aquitaine and Centre-Val de Loire regions.	
Résumé (1600 caractères maximum) : En France, la méthanisation et les Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) se développent fortement. Les CIVE alimentent en substrat les unités de méthanisation. Généralement, elles sont uniquement composées de céréales ce qui peut engendrer divers problèmes. Ainsi, dans ce mémoire est réalisée une étude approfondie sur les CIVE d'hiver en association céréales/féverole. Les performances agronomiques, environnementales et économiques, sont évaluées, sur la base de 42 essais, mis en place chez des agriculteurs en région Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val de Loire. Les résultats ont montré que le rendement d'une culture associée est inférieur ou équivalent au rendement d'une culture pure céréale pour une fertilisation azotée donnée. La fertilisation diminue la proportion de féverole à la récolte. Cette dernière ayant un taux de matière sèche (MS) inférieur à la céréale, le taux de MS de l'association est inférieur à celui d'une culture pure céréale. La présence de féverole induit un enrichissement en azote du digestat, ce qui peut permettre une réduction d'intrant minéral. L'association montre des biomasses d'adventices réduites lorsque la fertilisation est faible, mais plus importante en cas de forte fertilisation. Les résultats n'ont pas permis d'identifier les impacts de l'association sur l'état du sol à la récolte. La marge semi-nette a montré une diminution en culture associée. Ainsi, plutôt qu'une uniformisation des CIVE à l'échelle d'un territoire, il serait intéressant de trouver des règles de décisions, pour choisir des itinéraires techniques et des associations, adaptées aux différentes contraintes de chaque agriculteur.	
Abstract (1600 caractères maximum) : In France, anaerobic digestion and Energy Cover Crops (ECC) are developing significantly. ECC provide substrate for anaerobic digestion units. They typically consist of cereals only, which can give rise to various problems. The present report is an in-depth study of winter ECC in cereal/legume combination. 42 trials set up with farmers in the Nouvelle-Aquitaine and Centre-Val de Loire regions enabled the assessment of agronomic, environmental and economic performances of these mixed crops. The results show that the yield of mixed crops is lower or equivalent to the yield of a pure cereal crop for a given nitrogen fertilization. Fertilization reduces the proportion of faba bean at harvest. As the faba bean has a lower dry matter (DM) content than the cereal, the DM content of the combination is lower than that of a pure cereal crop. The presence of faba bean increases the nitrogen content of the digestate, which can lead to a reduction in mineral inputs. The combined crops show reduced weed biomass when fertilization is low, but higher weed biomass with high fertilization. The results did not allow us to identify the impact of mixed crops on soil condition at harvest. The semi-net margin showed a reduction with mixed cropping. Thus, instead of standardizing ECIs on a regional scale, it would be interesting to define decision rules for selecting technical itineraries and combinations that are adapted to the different constraints of each farmer.	
Mots-clés : CIVE ; méthanisation ; association ; féverole ; céréale ; digestat ; azote	
Key Words: Energy Cover Crops ; anaerobic digestion ; mixed crops ; faba bean ; cereal ; digestate ; nitrogen	