



Avril
2019

OPTICIVE

OPTIMISATION DE LA MOBILISATION
DE CIVE POUR LA METHANISATION
DANS LES SYSTEMES D'EXPLOITATION

Rapport Final

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

ARVALIS Institut du végétal
Terres Univia
Terres Inovia
GIE GAO

euràlis
NOURRIR VOTRE CONFIANCE

En partenariat avec :

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du comité technique qui ont par leur disponibilité et leurs conseils contribué à la réussite de ce travail :

Julien THUAL (ADEME)
Françoise LABALETTE (Terres Univia)
Lea MOLINIE (Ministère de l'Agriculture)
Sylvain FREDERIC (GRDF)
Arnaud DIARA (Club Biogaz)
Gildas FOUCHET (AAMF)
Armelle DAMIANO (AILE)

CITATION DE CE RAPPORT

Sylvain Marsac, Manuel Heredia, Marie Bazet, Nicolas Delaye, Robert Trochard, Hélène Lagrange, Caroline Quod, Eve-Anna Sanner : Optimisation de la mobilisation de CIVE pour la méthanisation dans les systèmes d'exploitation. 2019 ; 73 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1506C0035

Projet de recherche coordonné par :

Sylvain MARSAC (GIE GAO - ARVALIS - Institut du végétal)

Appel à projet de recherche : DOSTE

Coordination technique - ADEME :

Julien THUAL - DECD / SMVD

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	6
1. Contexte du projet	7
2. Management technique des séquences de culture avec CIVE	7
2.1. Méthodologie d'acquisition de références	7
2.1.1. Les types d'essais mis en œuvre.....	7
2.1.2. Les essais conduits et leurs conditions pédoclimatiques	8
2.1.2.1. Coteaux argilo-calcaire du Sud-Ouest.....	8
2.1.2.1. Béarn	10
2.1.3. Protocoles	10
2.2. Résultats.....	11
2.2.1. Choix d'espèces.....	11
2.2.1.1. CIVE Hiver	11
2.2.1.2. CIVE d'été.....	14
2.2.2. Dates de semis	16
2.2.3. Alimentation minérale et valorisation du digestat	17
2.2.3.1. Intérêt de la fertilisation	17
2.2.3.2. Valorisation des digestats.....	19
2.2.3.3. Autres conduites de CIVE	20
2.2.4. Impact des CIVE sur l'état hydrique et azoté de sol à la récolte	21
2.2.4.1. Impact des CIVE sur les reliquats azotés.....	21
2.2.4.2. Impact des CIVE d'hiver sur l'état hydrique du sol à la récolte	22
2.2.5. Impact et adaptation pour la culture suivante	24
2.2.6. Semis sous couvert.....	25
2.2.7. Optimisation du travail du sol dans la succession	29
3. Composition physico-chimique et digestion anaérobie	30
3.1. Caractérisation du potentiel méthanogène.....	30
3.2. Essais pilotes de méthanisation de CIVE	31
3.3. Autres éléments de composition	34
3.4. Potentiel éthanol	34
4. CIVE et Etat organique des sols	35
4.1. Résidus de culture à la récolte	35
4.2. Méthodologie de simulation de l'état organique des sols.....	37
4.3. Résultats.....	39
4.3.1. Effet type de sol et couvert	39
4.3.2. Effet CIVE et changement de pratiques.....	40
4.3.3. Analyse dans des essais systèmes performants Syppre ®.....	42

4.4.	Evaluation technique économique et environnementale des systèmes de culture et systèmes d'exploitation avec intégration de CIVE	44
4.4.1.	Les méthodes.....	44
4.4.2.	Les scénarii	45
4.5.	Résultats.....	46
4.5.1.	Indicateurs économiques	46
4.5.1.1.	Coût de production des ressources.....	46
4.5.1.2.	Coût de l'énergie produite	48
4.5.1.3.	Seuils de rentabilité	48
4.5.1.4.	Impact de l'adaptation de systèmes sur la rentabilité des systèmes d'exploitation ..	50
4.5.2.	Indicateurs techniques et environnementaux des successions de culture	50
4.5.2.1.	Impact de l'adaptation de systèmes de cultures sur le temps de travail à la parcelle 50	
4.5.2.2.	Impact de la mobilisation de biomasse sur le besoin en main d'œuvre d'une unité de méthanisation	51
4.5.2.3.	Bilan des gaz à effet de serre produits ou économisés à l'échelle du système de culture et/ou d'exploitation	52
5.	Transfert	53
5.1.	Communication.....	53
5.2.	Formation.....	54
6.	Extrapolation des résultats	54
6.1.	Méthode	54
6.2.	Premières pistes d'extrapolation	55
6.2.1.	CIVE d'hiver	55
6.2.2.	CIVE d'été	58
7.	Recommandations et perspectives	59
7.1.	Limites.....	59
7.2.	Le besoin en références complémentaires.....	59
7.3.	Structuration des travaux.....	61
7.4.	Besoin en communication.....	61
8.	Conclusion / Perspectives	62
	Références bibliographiques	63
	Index des tableaux et figures	65
	Sigles et acronymes	67
	Annexes	68
1.	THEME DE L'ETUDE	71
2.	OBJECTIFS DE L'ESSAI	71
3.	FACTEURS ETUDIES.....	71
4.	MATERIEL EXPERIMENTAL.....	71
5.	DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	72
6.	VARIABLES MESUREES	73

7.	CONDUITE DE L'ESSAI	75
8.	TRAITEMENT STATISTIQUE DES RESULTATS	75
9.	DIFFUSION	75
10.	MOYENS MATERIELS.....	75
11	PERSONNEL NECESSAIRE	75

Résumé

Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) sont au coeur des stratégies de transition énergétique et de développement de la bioéconomie. Elle représentent un enjeu majeur pour l'approvisionnement des méthaniseurs (ADEME et al., 2018) et pour le développement de l'agroécologie. Si les premiers retours d'expérience confirment l'intérêt de ces séquences de 3 cultures en 2 ans avec deux cultures alimentaires et une culture valorisée en méthanisation, les interrogations restent nombreuses sur la conduite de culture, les coûts et seuils d'intérêt économique.

Le projet OPTICIVE visait à optimiser la conduite de ces séquences de culture et à évaluer leur intérêt technique, économique et environnemental. Pour cela un programme d'expérimentation a été élaboré sur la base d'essais analytiques et de dispositifs d'expérimentation à long terme : Syppre®. Ces dispositifs ont été mis en œuvre dans deux contextes pédoclimatiques marqués du sud-ouest : en coteaux argilo-calcaire séchant et en zone limono argileuse humifère du piémont pyrénéen avec une pluviométrie abondante et régulière. Ces deux conditions et les mesures réalisées avaient pour objectif de débiter des travaux sur l'extrapolation de ces résultats.

Les premières recommandations techniques ont pu être établies et diffusées, tant sur les choix d'espèce que les dates de semis et la fertilisation mais la variabilité de production est très élevée. L'intérêt de ces intercultures se confirme également pour réduire les risques de lixiviation d'éléments minéraux mais elles peuvent engendrer des pertes de rendements pour la culture suivant les CIVE d'hiver essentiellement, en raison de retards d'implantation. Ces résultats ont aussi permis de confirmer l'intérêt des CIVE et du retour des digestats pour l'état organique des sols. Face à l'absence de différence significative de potentiel méthanogène, la recherche d'une production optimale est un enjeu essentiel pour la rentabilité de ces systèmes.

Grâce à une co-conception des hypothèses d'évaluation avec différents acteurs de la filière, les coûts de production des CIVE et de l'énergie produite ont pu être évalués : 120 €/tMS environ et 120 €/MWh pour des valorisation via injection dans les réseaux. Des seuils de rentabilité proches de 6 tMS/ha ont également été calculés et rejoignent les rendements moyens en expérimentation. Dans les conditions étudiées, ces systèmes de culture peuvent présenter un intérêt pour la rentabilité des exploitations agricoles avec une conduite optimale de la séquence. Mais des travaux complémentaires devront permettre d'apporter des recommandations régionalisées sur ces séquences et d'élargir le champ des espèces travaillées afin de maximiser les services écosystémiques rendus par ces cultures en compléments de leur fonction économique.

Abstract

Energy cover crops represent a large opportunity for French energy transition strategy and bioeconomy development. Energy cover crops are a main issue for on-farm biogas plants (ADEME et al., 2018) and agroecology development. Energy cover crops are grown into a 3 crops over 2 years succession, composed of 2 food/feed crops and one for biogas. Many questions have to be studied on crop management, costs, profitability indeed first feedback. OPTICIVE program aimed at optimising crop management of the whole succession and to assess technical, environmental and economic parameters. Analytic and long term experiments (Syppre®) were carried out in two contrasted pedoclimatic conditions of Southwestern France : in chalky clay soil of Lauragais hillside with summer drought and deep loamy clay soils and with a high organic content soil in Béarn area with regular and important rain. Crop modelling was an objective with these conditions in order to extrapolate results.

First management recommendations were built on species, sowing date, fertilisation but cover crop production was highly variable. Energy catch crops can decrease the yield of the following crops, mainly for winter cover crops because of a later sowing date of the following crop, but they decrease risks in nitrogen leaching even with a low fertilisation. Carbon storage into the soil allowed by these energy cover crops and digestate is another result. Without any difference for biomethane potential between crops, optimal productivity is the main issue for the crop rotation profitability.

Hypothesis of the global assessment were built during a co construction meeting with stakeholders. Energy catch crop production cost reached 120 €/tDM and 120 €/MWh for the total energy cost of biomethane injected into the grid. Profitability yield were closed to experiment results : 6 tDM/ha. New cropping systems including energy catch crops could be interesting for farm profitability with an optimal crop management of the whole crop rotation. Further work will focus on regionalised recommendations and new species of cover crops in order to improve ecosystemic services (weeds, diseases...) in complement to economic function.

1. Contexte du projet

Des objectifs ambitieux ont été fixés pour la production de biométhane à la ferme (Plan EMAA, 2013). Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) sont au coeur des stratégies de transition énergétique et de développement de la bioéconomie. Elle représentent un enjeu majeur pour l’approvisionnement de ces méthaniseurs (ADEME et al., 2018) et pour le développement de l’agroécologie.

Leur valorisation renforce en effet les fonctionnalités écosystémiques ((Berti et al. 2015; Williams 2014; Goff et al. 2010; Justes, Beaudoin, et Bertuzzi 2012) par de nouvelles fonctions économiques (revenu, résilience des systèmes d’exploitation) et environnementales (énergie renouvelable, lutte contre les émissions de GES - (Graß et al. 2013; Marsac et al. 2015; Szerencsits et al. 2015). Malgré quelques références sur la conduite des CIVE dans différents pédoclimats français (Expé CIVE - ADEME, CIBIOM - fonds ENERBIO 2010 - 06, Chambre d’agriculture du Loiret, Chambre régionale d’agriculture de Bretagne), les références et évaluations multicritères sur les séquences complètes de 3 cultures en 2 ans sont peu nombreuses en France comme en Europe (Marsac et al. 2015; Szerencsits et al. 2015). La mobilisation de ces intercultures interroge alors sur de nombreux points : coût, impact dans la succession de culture, impact sur l’état organique des sols.

Les précédents projets tels Expé-CIVE ou CIBIOM avaient mis en avant l’intérêt de ces séquences de cultures avec une forte variabilité de production et le besoin de :

- Réduire les coûts de ces ressources ;
- Optimiser la conduite de culture afin de réduire les risques et coûts : travail du sol dans la séquence, choix des espèces et optimisation des cycles de développement... ;
- Mieux apprécier les facteurs de risque sur ces séquences de culture : structure du sol, alimentation hydrique, climat...).

Avec près de 600 unités de méthanisation dont 350 agricoles fin 2018, les attentes restent fortes. D’après une enquête de l’ADEME, sur la période 2012-2019 près de 80% des unités de méthanisation mobilisent des CIVE dont 60% en faible pourcentage de l’approvisionnement total (0 à 10%) et 30% jusqu’à 20% du total des substrats. Cette vision est toutefois déclarative et ne tient pas compte du développement de projets actuels a priori plus mobilisateurs de CIVE pour des valorisations en injection dans le réseau de gaz.

Les agriculteurs sont dans l’attente de références fiables et reconnues sur ces systèmes de culture afin de sécuriser leur approvisionnement et rassurer les éventuels opposants à ces techniques. Ils sont aujourd’hui largement acteurs de ces recherches et se structurent en groupes techniques tels que les GIEE (Groupement d’Intérêt Economique et Environnemental) ou groupe thématique spécifique de l’Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France.

Ces actions étaient toutefois beaucoup plus réduites à l’initiation du projet OPTICIVE dont l’objectif essentiel réside dans l’optimisation de la conduite de ces séquences de cultures innovantes. L’évaluation technique économique et environnementale de ces systèmes conduite sur la base des recommandations techniques constitue un autre objectif majeur pour la filière.

2. Management technique des séquences de culture avec CIVE

Les problématiques dégagées par le management de séquences de 3 cultures en 2 ans concernent différents horizons temporels :

- annuel avec la conduite propre d’une culture de la succession ;
- Pluriannuel avec les impacts positifs ou négatifs de cette succession de culture sur l’état hydrique du sol, sa structure selon les opérations culturales conduites, la pression adventices et ravageurs voire de nombreux autres critères agronomiques.

2.1. Méthodologie d’acquisition de références

2.1.1. Les types d’essais mis en œuvre

Trois types d’expérimentations ont alors été mis en œuvre dans l’objectif d’optimiser la conduite des séquences de cultures :

- Des essais dits analytiques qui avaient pour objectif de travailler le management d'une des opérations de la succession. Ces essais analytiques concernaient notamment les choix, d'espèces, dates de semis ou alimentation minérale. Ils étaient conduits sous forme de bandes de plusieurs centaines de m² (avec ou sans répétition mais avec duplication des mesures) et des microparcelles.
- Des essais sur une séquence de culture. Ces essais de type analytiques permettaient d'évaluer l'impact d'une des cultures ou mode de conduite de la succession sur la culture suivante ; par exemple, l'évaluation de l'impact de CIVE d'hiver sur la culture alimentaire suivante, ou celui d'un mode de travail du sol sur les résultats techniques de la séquence de culture.
- D'autres essais dits systèmes ont également été valorisés pour apprécier l'impact de ces séquences de culture dans des systèmes plus longs et diversifiés. Ces essais systèmes concernaient les dispositifs Syppre® mis en œuvre dans le cadre d'une collaboration inter-instituts : ARVALIS, Terres Inovia, Institut Technique de la Betterave. Ces plateformes d'essais systèmes ont pour objectif de tester des systèmes de cultures innovants afin d'améliorer leur performance économique et environnementale. Ces systèmes sont comparés à des systèmes témoin de chacune des régions d'étude. Ils ont été co-construits avec les agriculteurs, acteurs de la recherche et du développement pour répondre à ces enjeux de performance avec une contrainte environnementale majeure pour chacun des sites. 5 plateformes ont été installées en France. Deux ont été mobilisées pour ce projet OPTICIVE à Vieilleville en coteaux argilo-calcaire du Sud-Ouest (Lauragais, 31) et dans le Béarn (64) (Annexe I). Ces sites sont constitués de bandes de culture de plusieurs centaines de m² avec répétition.

Les essais analytiques peuvent être conduits dans les mêmes conditions pédoclimatiques ou même parcelle que les essais système.

2.1.2. Les essais conduits et leurs conditions pédoclimatiques

Deux conditions pédoclimatiques distinctes ont été retenues pour ces expérimentations :

- Le Béarn en conditions pluviales avec précipitations abondantes, hivers doux et étés chauds ;
 - Coteaux du Lauragais en conditions séchantes avec hivers plus frais et étés chauds.

Ces deux conditions contrastées vis-à-vis de l'alimentation hydrique avaient pour objectif d'apprécier les potentiels de CIVE en conditions peu limitantes (Béarn) et l'impact sur la production en zone plus contrainte. La durée du projet et ses enjeux budgétaires ne permettaient pas de couvrir plus largement le territoire. L'extrapolation des résultats à partir de ces deux conditions constitue également un élément fort de ce projet. C'est pourquoi la majorité des sites ont été finement caractérisés. Des conditions plus exigeantes en termes de températures (froides) auraient été nécessaires pour capter une autre palette de contraintes.

2.1.2.1. Coteaux argilo-calcaire du Sud-Ouest

Sur le site du Lauragais (31), en coteaux argilo-calcaires, les CIVE d'hiver ont majoritairement été travaillées en essais analytiques (bandes avec ou sans répétition selon les facteurs) afin de (Tableau 1) :

- Déterminer leur potentiel de production et cycle de développement selon la date de semis ;
- Mesurer l'état hydrique du sol sous ces CIVE d'hiver ;
- Mesurer l'impact de ces couverts sur le rendement de la culture suivante selon le type d'implantation.

Une CIVE est également présente dans la succession innovante de la plateforme Syppre® du Lauragais (31).

Tableau 1 : Caractéristiques des sites expérimentaux et facteurs étudiés dans les essais OPTICIVE

Caractéristiques	Lauragais	Sendets/ Burros	Castétis/ Larreule	Lay Lamidou	Uzan
Type de sol	Sol colluvial calcaire-rédoxique	Touyas	Limons profonds/moyens	Touyas	Boulbènes (Limon argilo sableux)
RU (mm)	110-120 (Syppre)	150/175	120-140 /100-120	150	
Pluviométrie (mm)					
Moyenne(18 ans)	688	1144	1144	1144	1144
2016	591	1149	1149	1149	1149
2017	647	998	998	998	998
2018	946	1202	1202	1202	1202
Facteurs testés					
2016	Screening espèces (CIVE hiver) Dates de semis	Screening espèces (CIVE hiver/été)	Screening espèces (CIVE hiver) Fertilisation (CIVE hiver) Impact CIVE sur la culture principale d'été (maïs ensilage)	Screening espèces (CIVE hiver) Dates de semis	Screening espèces (CIVE été)
2017	Screening espèces (CIVE hiver) Partition biomasse Travail du sol et suivi de la culture principale d'été : sorgho semé en semis direct ou strip till	Screening espèces (CIVE hiver/été) Partition biomasse Fertilisation (CIVE hiver) Pouvoir méthanogène (CIVE hiver)	Screening espèces (CIVE hiver/été) Fertilisation (CIVE hiver/été)		
2018	Screening espèces (CIVE hiver) Partition biomasse Travail du sol et suivi de la culture principale d'été : sorgho semé en semis direct ou strip till	Screening espèces (CIVE hiver/été) Partition biomasse	Screening espèces (CIVE hiver)		

2.1.2.1. Béarn

Sur la plateforme Syppre® Béarn, située à Sendets (64), sur des sols profonds, limono argileux humifères de type « terres noires à Touyas », CIVE d'hiver et CIVE d'été sont évaluées dans différents systèmes :

- une CIVE d'hiver dans le système "étalon 1" : double culture maïs -CIVE d'hiver
- une CIVE d'hiver dans le système "étalon 3" : rotation de 2 ans maïs - couvert - soja – CIVE
- une CIVE d'été dans le système "rupture 1" : rotation de 3 ans maïs - orge - soja (dérobé) - blé - CIVE d'été - couvert

Le site proche de Burros avec des conditions pédoclimatiques identiques a permis d'évaluer la production de CIVE d'été et d'hiver en Grande parcelle en vue de l'approvisionnement du méthaniseur expérimental. Un essai analytique sur l'alimentation azotée de CIVE d'hiver a également pu être réalisé.

EURALIS, partenaire du projet, s'est également livré à des essais sur une plateforme d'expérimentation et sur des parcelles agriculteurs.

Sur la plateforme d'Astria 64 à Castétis (64), des CIVE ont été testées en microparcelles afin de :

- Comparer le comportement hivernal et la production de différents couverts d'hiver semés à l'automne et récolté au printemps suivant ;
- Mesurer l'intérêt d'un apport d'azote en fin d'hiver ;
- Evaluer l'impact des différentes CIVE et de l'itinéraire technique sur la culture suivante (maïs fourrage).

Des couverts d'hiver à base de Ray Grass Italien (RGI) pur ou associés à des légumineuses, ont également été semés à l'automne et récoltés au printemps suivant avec pour objectif de :

- Déterminer le potentiel de production d'un RGI pur ou associé à des légumineuses
- Evaluer la croissance de ces couverts au cours du printemps, en mesurant la production à 3 dates de récolte
- Mesurer l'état hydrique du sol à ces 3 dates.
- Evaluer l'intérêt d'un apport d'azote en fin d'hiver

Les sites « agriculteur », conduits en bandes sans répétition, de Lay Lamidou (64) et Uzan (64) en 2016 puis Larreule (64) en 2017 ont permis de travailler sur les choix d'espèces, dates de semis et travail du sol.

2.1.3. Protocoles

Les protocoles mis en œuvre ont été partagés et reproduits sur l'ensemble des sites. Un exemple est disponible en Annexe II. Les modes opératoires ont pu être mis à jour pour des observations comme les masses racinaires.

Les mesures de biomasse visaient à obtenir des rendements :

- dits biologiques (au ras du sol) ;
- dits « machine » après pesée de la récolte des bandes (ensilées ou fauchées et pressées) ou après pesée de placettes récoltées à la motofaucheuse.

Plusieurs dates d'observation ont été réalisées sur les CIVE d'hiver afin d'évaluer la dynamique de croissance : 15/03 – 1/04 et 20/04 environ. La règle de décision stabilisée visait une implantation de la culture suivante au 1/05 au plus tard. Des mesures de l'état hydrique et azoté étaient effectuées à chaque mesure. Des pesées de biomasse selon la hauteur dans la plante ont également été réalisées sur CIVE d'hiver en relation avec le projet SOLEBIOM afin de caractériser les retours au sol.

Des masses racinaires ont été mesurées sur l'essai analytique du Lauragais en CIVE d'hiver 2017.

Les observations de biomasse et d'état hydrique et azoté du sol ont été réalisées pour une seule date en CIVE d'été.

Des échantillons de biomasse ont systématiquement été constitués pour alimenter le plan d'analyse.

Ces mesures ont été effectuées sur chaque microparcelle des essais analytiques et reproduites a minima 3 fois dans les essais en bandes.

2.2. Résultats

2.2.1. Choix d'espèces

2.2.1.1. CIVE Hiver

Les CIVE d'hiver ont été semées du 1/10 au 3/11 et récoltées fin avril (autour du 24 avril dans le Lauragais). Ces dates de récolte sont plus variées dans le Béarn, mi-avril pour les graminées annuelles à fin mai pour des raygrass. Tous les essais ont été fertilisés avec 40 à 80 kg N/ha en sortie hiver (Tableau 2).

Tableau 2 : modalités et conduites des essais CIVE d'hiver sur les sites Syppre® Coteaux argilo-calcaire et Béarn

Site	Date de semis	Date de récolte	Fertilisation
Lauragais	1 octobre 2015 21 octobre 2016 11 octobre 2017 (4/11/2017 pour avoine ES)	~24 avril	80kgN/ha (ammonitrate) en deux passages épi 1 cm et 15j plus tard
Béarn	~20 octobre <i>Exceptions</i> RGI : 21/09/2015 CIVE hiver Castétis : 3/11/2017	mi-avril à fin mai	Sendets : 30kgN/ha - ammonitrate en 2016, 18m3 digestat en 2017/70 kg N environ, 70kgN/ha en 2018 Castétis et Lay Lamidou : entre 40 et 80kgN/ha (ammonitrate ou digestat)

Lauragais : deux CIVE d'hiver (avoine rude, variété Charmoise en 2017 et variété Timoko en 2018) ont été testées dans des essais systèmes et essais analytiques :

Avoine ES : avoine testée dans le cadre de l'essai système Syppre®

Avoine EA : avoine testée dans le cadre d'un essai analytique

Béarn : sur la plateforme Syppre® de Sendets (64), deux CIVE d'hiver (avoine) ont été testées dans des essais systèmes :

CIVE d'hiver dans le système "étalon 1" : double culture maïs - CIVE d'hiver [E1]

CIVE d'hiver dans le système "étalon 3" : rotation de 2 ans maïs - couvert - soja – CIVE d'hiver [E3.1]

LL : espèces testées sur le site de Lay Lamidou (64) en 2016

C1 : espèces testées sur le site de Castétis en 2017 et 2018 et ayant reçu une fertilisation de 40U

C2 : espèces testées sur le site de Castétis en 2016 et 2017 et ayant reçu une fertilisation de 80U

Figure 1 : Rendements biologiques moyens et variabilité interannuelle par espèces de CIVE Hivers 2016 - 2018

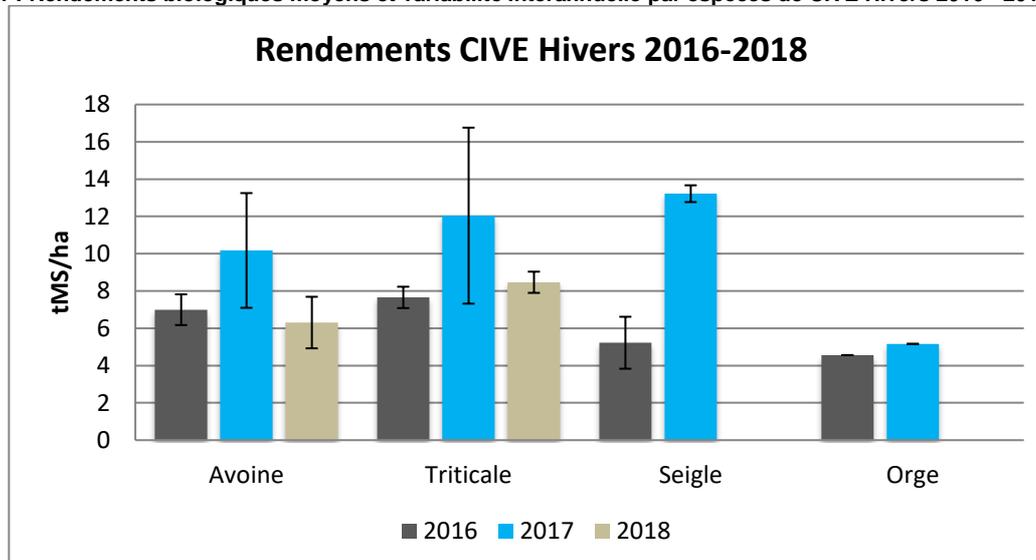


Figure 2 Rendements biologiques des CIVE Hivers 2016 - 2018 – Avoine

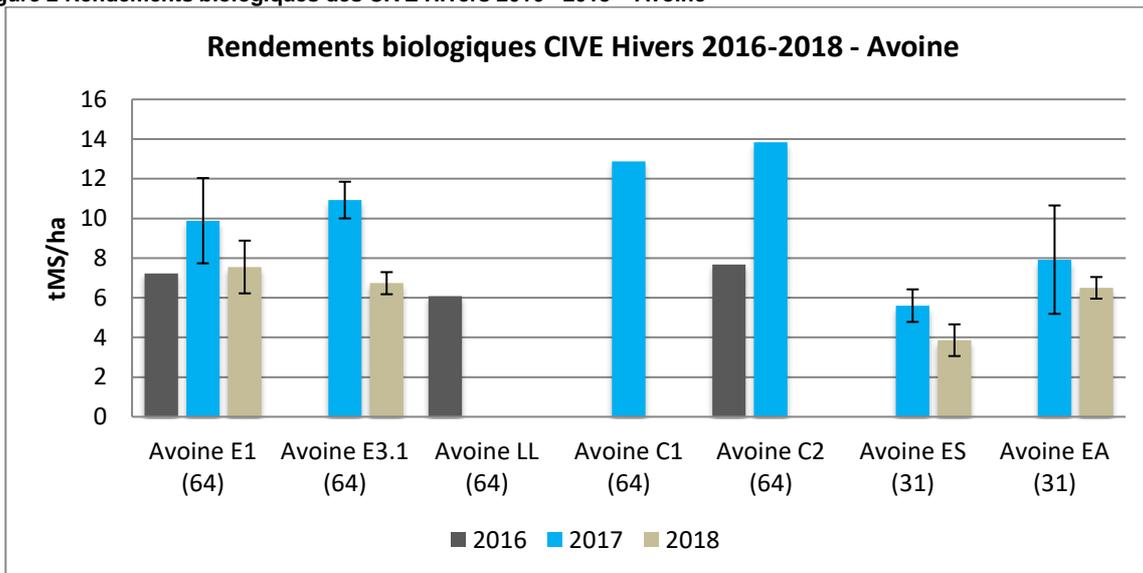
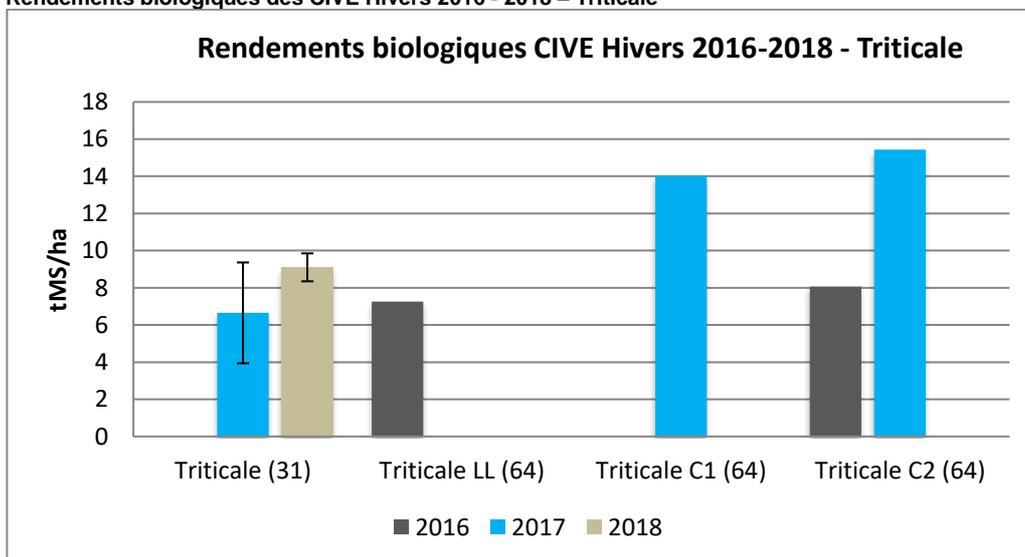


Figure 3 Rendements biologiques des CIVE Hivers 2016 - 2018 – Triticale



Les rendements varient fortement d'une année sur l'autre de 2tMS/ha à près de 16tMS/ha (Figure 1, Figure 2, Figure 3). Les analyses statistiques font ressortir des différences significatives de rendement d'une année sur l'autre avec les meilleurs rendements obtenus en 2017 toutes espèces confondues. L'avoine est l'espèce la plus productive sur les 3 années des plateformes d'essais systèmes.

La dynamique de croissance entre 2017 et 2018 est différente pour les espèces triticale, avoine et association avoine - vesce (Figure 4). En 2017 la montaison a été plus précoce qu'en 2018. 2018 est marquée par des biomasses plus élevées en sortie hiver mais avec des cultures qui se sont peu développées avant mi-avril alors qu'en 2017 le développement était continu depuis la mi-mars.

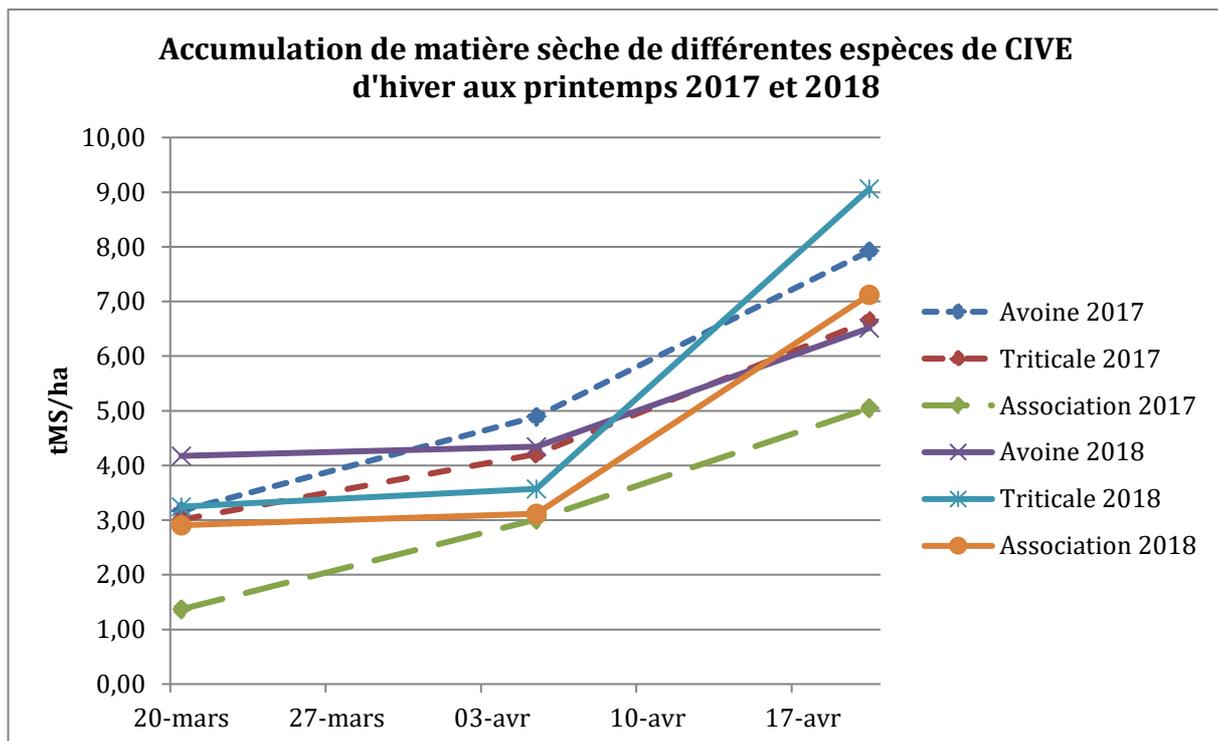
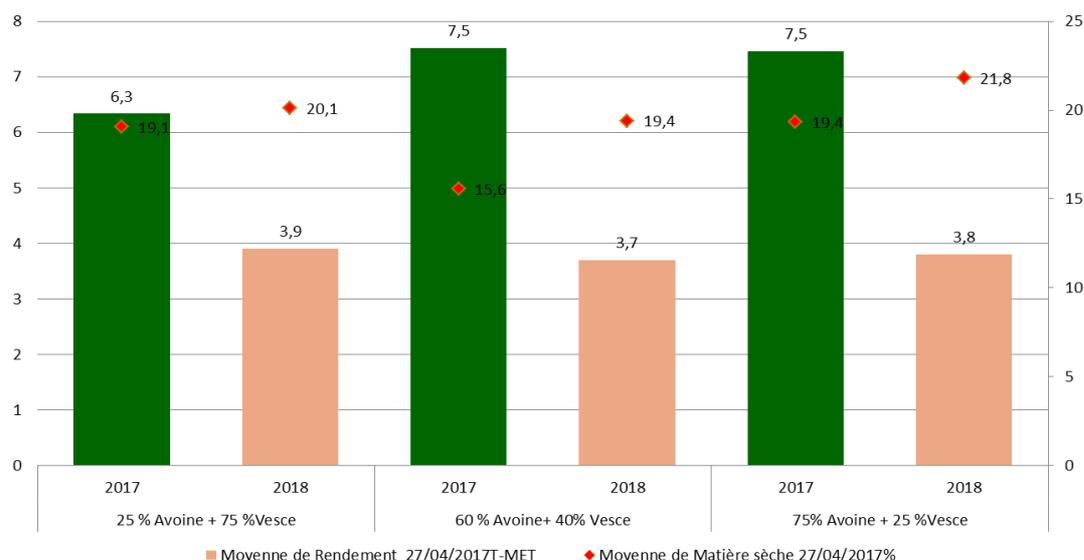


Figure 4 : Dynamique d'accumulation de biomasse pour quelques espèces expérimentées au cours d'OPTICIVE (moyenne des observations de chacune des espèces) Vieillevigne, 31
 Les différences intra annuelles entre espèces ne sont en revanche pas significatives. Des différences variétales ont été remarquées sur avoine sur le site de Castetis. Ce choix devrait aussi être approfondi en raison de son impact sur la précocité montaison et les risques de gel.

Les associations d'espèces avec légumineuses ont également été étudiées (Figure 5). Ces associations présentent un intérêt pour le développement de l'autonomie azotée des exploitations. Ces essais ont été conduits plus spécifiquement sur le site de Castetis.

Figure 5 : Rendements CIVE d'hiver en association – 2017 et 2018 OPTICIVE (Castetis, 64 ; Euralis)



Si la production de légumineuses pures procure des potentiels de rendement inférieurs aux graminées pures, l'association des deux espèces, où les légumineuses sont présentes à une proportion de 20 à 40%, ne pénalise pas le rendement en biomasse. L'apport supplémentaire d'azote dans un digesteur, via les légumineuses, devra toutefois être calculé en fonction de l'ensemble des co-substrats pour éviter des dysfonctionnements de cette digestion.

De nombreuses autres espèces sont travaillées par les agriculteurs, notamment le seigle. Les références sur cette espèce devront être approfondies afin de prendre en compte la diversité génétique offerte sur cette espèce comme sur l'avoine.

De nombreuses autres espèces (famille des brassicacées ; autres graminées) sont peu ou pas travaillées mais gagneraient à intégrer ces évaluations tant pour leur potentiel de biomasse que pour les autres services écosystémiques.

2.2.1.2. CIVE d'été

Trois sites d'essais ont permis d'acquérir des références sur CIVE d'été semées fin juin à mi-juillet. Elles ont été récoltées entre le 3 et le 27 octobre de chaque année, avec une exception pour 2016 où la récolte s'est effectuée le 8 novembre.

Tableau 3: modalités et conduites des essais CIVE d'été dans le Béarn

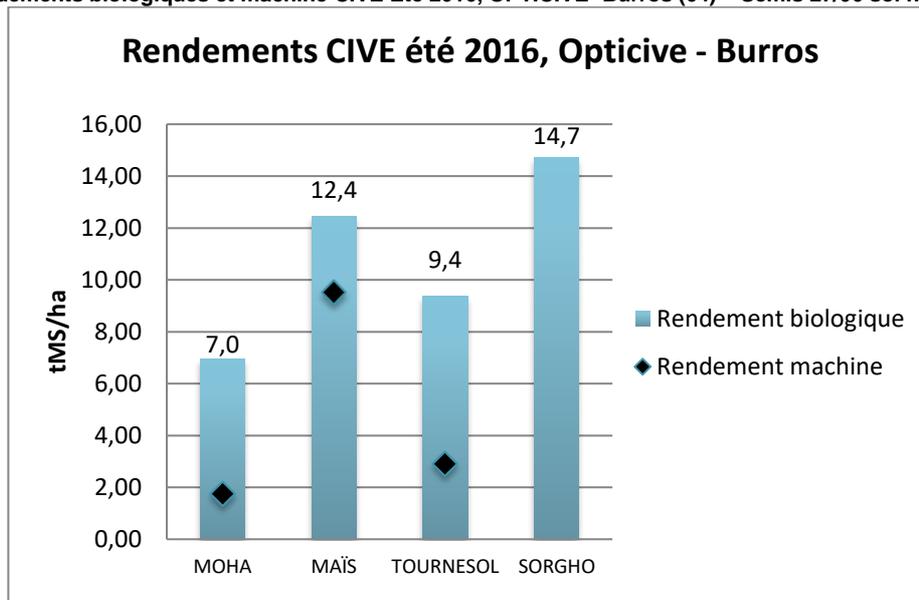
Site	Date de semis	Date de récolte
Béarn	Du 6 au 17 juillet	Du 3 au 27 octobre
	<i>Exception 2016</i>	<i>Exception 2016</i>
	Semis le 27/06/2016	Récolte le 8/11/2016

Le premier essai à Buros en 2016 a permis d'étudier le potentiel de différentes espèces pures. Ce site implanté le 27 juin sur sol nu avait également pour objectif de constituer une ressource d'approvisionnement pour les tests en digesteur instrumenté.

Un évènement climatique exceptionnel (orage de très forte intensité) sur le secteur a fortement endommagé la parcelle et de nombreuses autres alentour. La récolte programmée début septembre n'avait pu être réalisée à cause d'un défaut de disponibilité de l'entrepreneur. Le sorgho et le millet n'ont pas pu être récoltés mécaniquement car trop versés. Ceci explique également les rendements machine¹ bas pour le moha et le tournesol (Figure 6). Seul le maïs n'avait pas versé, même si d'autres parcelles et variétés ont été endommagées à proximité.

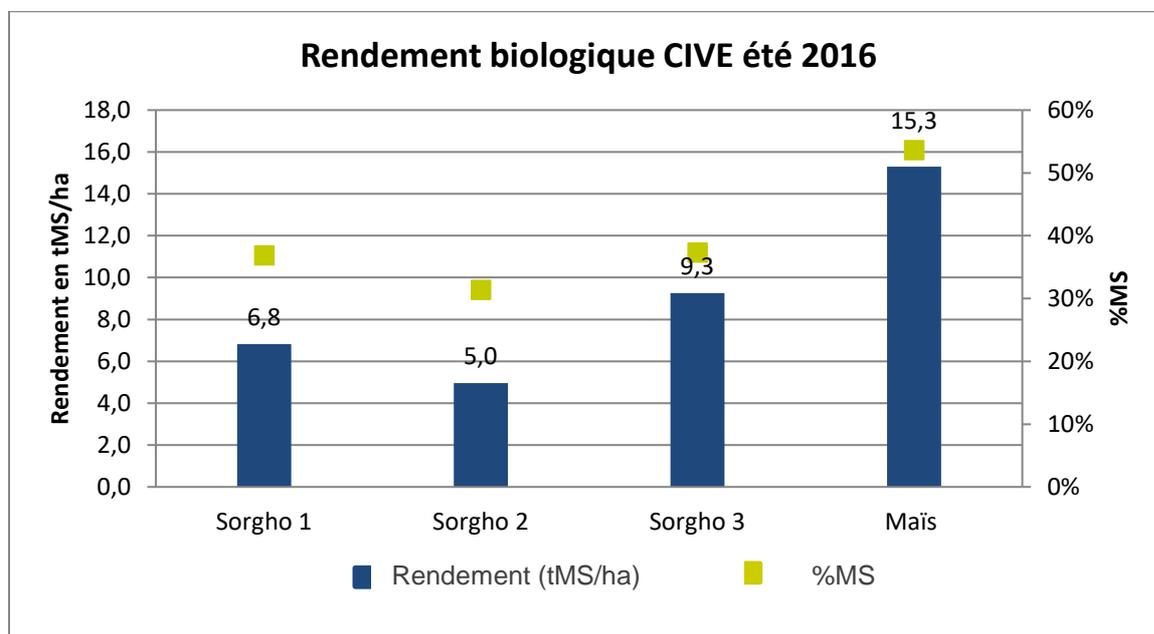
¹ Rendement machine = biomasse pesée en sortie de parcelle après récolte avec des matériels de type agriculteur. Le rendement biologique est mesuré sur des placettes à raz de sol, contrairement au rendement machine qui inclue des pertes à la récolte dues aux chaumes.

Figure 6 Rendements biologiques et machine CIVE Été 2016, OPTICIVE- Burros (64) – Semis 27/06 sol nu



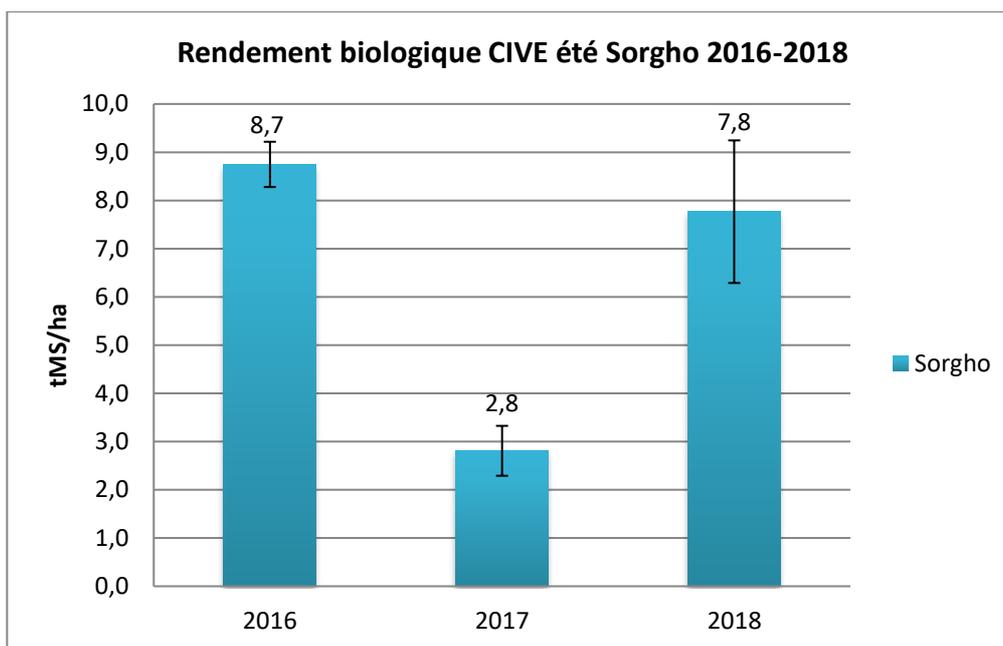
En raison des mêmes conditions climatiques, la majorité des modalités de l'essai ont versé, seuls le maïs Gallery (modalité 3) et le sorgho (modalité 14) ont pu être récoltés mécaniquement. Le moha et le millet semés à la volée n'ont pas suffisamment produit de biomasse pour des mesures représentatives. Sur le site d'Uzan (Figure 7), un fort stress hydrique à la levée a nécessité d'irriguer pour assurer un bon démarrage de la culture. La parcelle a été fertilisée (60 kg N/ha) mais le même évènement climatique a occasionné de la verse sur les différentes modalités, expliquant la variabilité des résultats.

Figure 7 Rendements biologiques CIVE Été 2016, OPTICIVE- Uzan (64) – Semis 27/06 après céréale



La production interannuelle de sorgho peut être étudiée sur l'essai Syppre ® Béarn à Sendets (Figure 8). Les écartements entre-rangs ont été adaptés au cours du temps sur cet essai fertilisé et semé après blé tendre : de 76 cm à 38 cm en 2018.

Figure 8 Rendements CIVE Eté – Sorgho 2016 – 2018, Sendets – Syppre®, 64



Malgré des potentiels intéressants, la forte variabilité interannuelle observée s'explique par des attaques importantes de ravageurs (sésamie) en 2017. Le reste de la parcelle d'essai étant protégé, cette espèce hôte en décalage de cycle a servi de refuge aux populations. Un insecticide a été appliqué en 2018.

2.2.2. Dates de semis

La dynamique d'accumulation de biomasse interroge sur la date de semis nécessaire pour atteindre une biomasse optimale à la récolte. Deux essais ont permis de comparer un semis précoce (fin septembre –début octobre) à un semis plus tardif proche des recommandations pour les espèces travaillées. En raison de conditions climatiques sèches en automne sur les campagnes d'essais, les semis ont souvent dû être décalés dans l'attente des pluies afin de garantir une levée homogène. Face à ces contraintes, les rendements ont pu être comparés sur les deux sites Syppre® coteaux argilo-calcaire et OPTICIVE pour l'avoine en 2017 (semis 2016) (Figure 10).

D'autres observations ont pu être réalisées dans le Béarn (Figure 9) en 2016 avec un semis le 20 septembre 2015 (D1) comparé au 10/10/15 (D2). Pour une même récolte le 12/04/16, le semis précoce permet une production de 2 à 5tMS/ha de plus que le semis du 10/10/2015. Ce constat est valable pour l'ensemble des espèces testées.

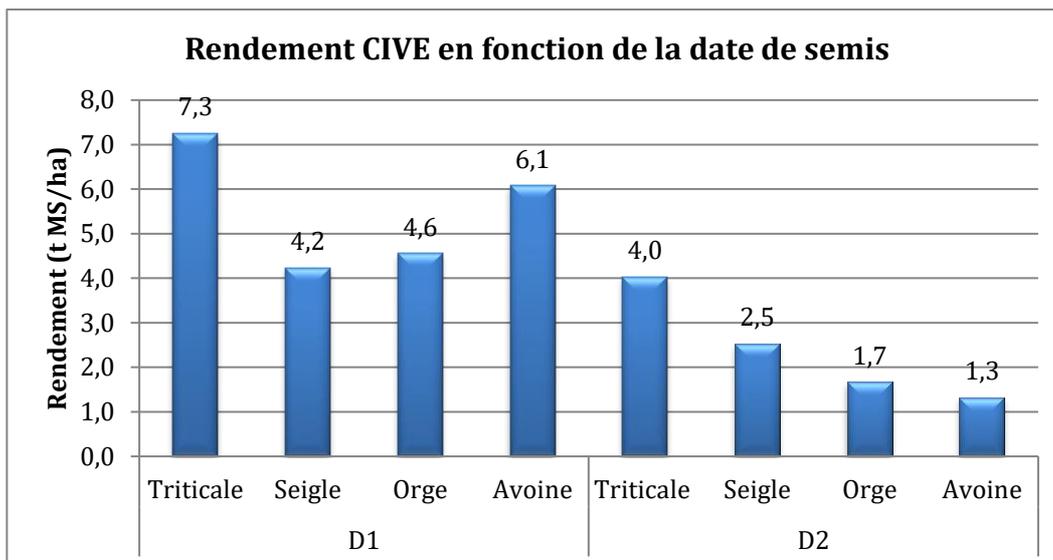
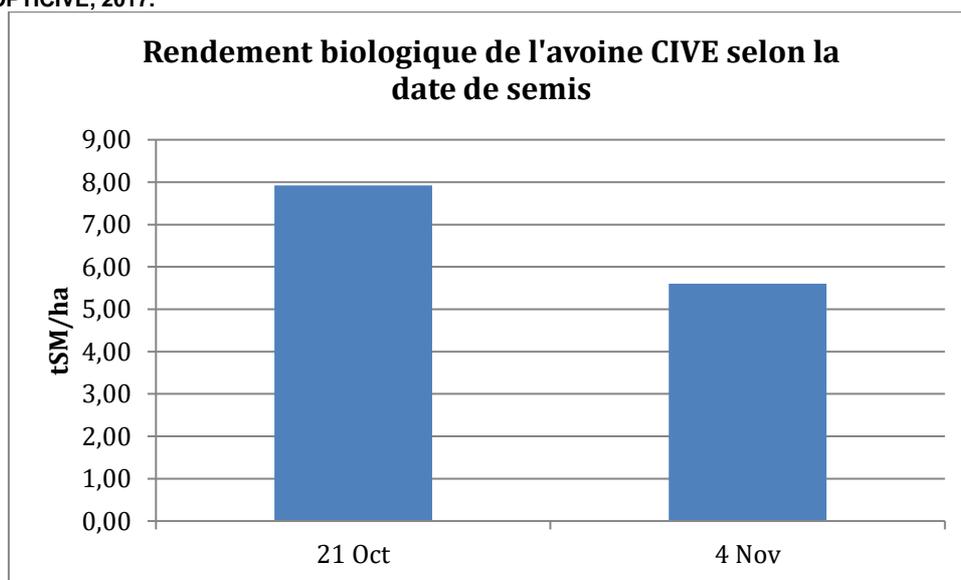


Figure 9 : Rendement CIVE d'hiver en fonction des dates de semis, OPTICIVE 2016, Lay Lamidou (64)

Les résultats sont identiques en 2017 dans le contexte des coteaux du Lauragais avec un semis 21/10/16 et la plateforme Syppre® où l'avoine a été semée 10 jours plus tard, le 4/11/16.

Figure 10 : Comparaison des biomasses de CIVE d'hiver selon la date de semis en contexte argilo-calcaire du Lauragais, OPTICIVE, 2017.



2.2.3. Alimentation minérale et valorisation du digestat

La conduite des CIVE interroge quant à leur besoin en fertilisation. Cette fertilisation doit répondre aux besoins de la croissance des plantes sous forme d'engrais minéral ou de valorisation des digestats de méthanisation. Quel est l'intérêt d'une fertilisation pour ces cultures récoltées à des stades immatures? Différentes observations ont été mises en œuvre tant par la comparaison d'une même espèce plus ou moins fertilisée que par des essais visant à évaluer les coefficients d'équivalence engrais (KeqN) et coefficients apparents d'utilisation (CAU) pour les digestats.

2.2.3.1. Intérêt de la fertilisation

La comparaison d'espèces conduite sur le site de Castetis (64) a permis d'observer des modalités avec apport de 80 kg N/ha (du redressement début montaison selon les espèces) ou sans fertilisation azotée (Figure 11). Cet apport d'azote occasionne systématiquement une production supérieure de biomasse de 2 à 4 tMS/ha selon les espèces étudiées.

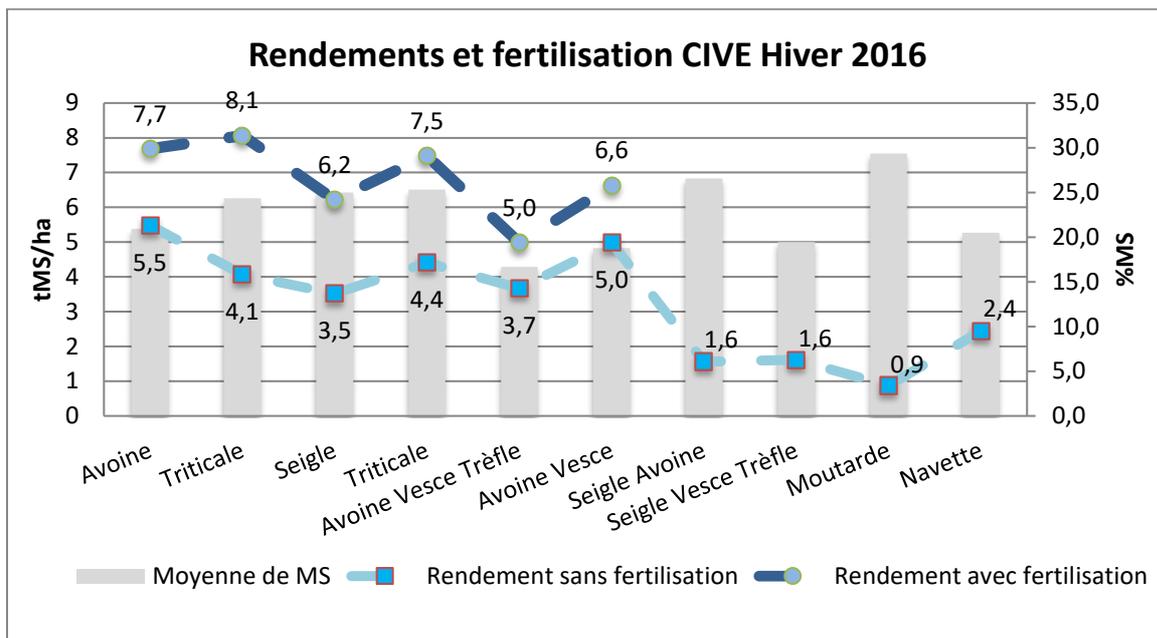


Figure 11 : Effet de la fertilisation sur le rendement en biomasse de CIVE d'hiver 2016 ; OPTICIVE (Castetis, 64), semis 23/10/2015-Récolte 12/04/16

Le même type d'essai conduit en 2017 sur un nombre d'espèces réduit conduit aux mêmes conclusions : de 0.6 à 1.5 tMS/ha de biomasse supplémentaire pour 80 kg N/ha par rapport aux 40 kg N/ha de la référence (Figure 12 Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

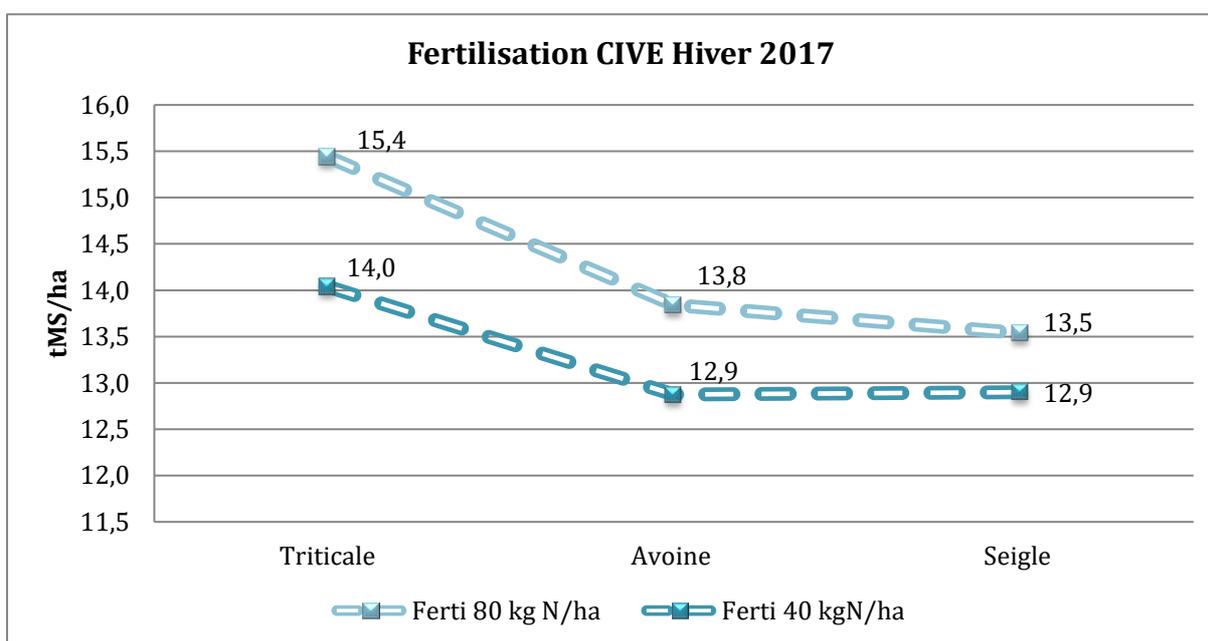


Figure 12 : Effet de la fertilisation sur le rendement en biomasse de CIVE d'hiver 2017 ; OPTICIVE (Castetis, 64), semis 28/10/2016-Récolte 09/05/17

Les conclusions sont identiques en CIVE d'été. L'essai conduit à Larreule en 2017 confirme l'intérêt d'une fertilisation de 60 kgN/ha pour toutes les espèces (Figure 15 Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

2.2.3.2. Valorisation des digestats

Deux essais conduits en 2017 ont permis d'apprécier l'impact de la fertilisation sous forme de digestat. Ces essais conduits selon les recommandations du RMT Fertilisation et Environnement² permettent d'évaluer les Coefficients Apparents d'Utilisation (CAU) et Coefficients d'équivalence (KeqN) d'un digestat de méthanisation apporté sur CIVE.

Sur CIVE d'hiver, trois modalités de fertilisation ont été conduites sur l'avoine en sols de Touyas. L'apport de digestat (18m³ ; pour 70 kgN/ha avec 0.4% d'azote total / produit brut et 0.32 % azote ammoniacal s'est fait le 17 février, en plein sans enfouissement (tonne à lisier sans pendillard). L'effet fertilisation s'observe sur la modalité d'azote minéral (+2.5tMS/ha pour 70 kg N/ha sous forme d'ammonitrate), mais pas sur la modalité digestat. L'absence d'enfouissement, et l'absence de pluie les jours suivant l'apport de digestat (Figure 14) n'a pas permis de valoriser cet apport avec l'hypothèse d'une forte volatilisation de l'azote ammoniacal (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les coefficients apparents d'utilisation et coefficient d'équivalence engrais (Tableau 4) traduisent cette mauvaise valorisation des apports.

Tableau 4: résultats des coefficients apparents d'utilisation et d'équivalence engrais sur CIVE d'hiver en 2017, Buros dans la cadre d'OPTICIVE

Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) digestat testé	0.27
CAU Minéral	1.09
Coefficient d'équivalence engrais KeqN	0.25

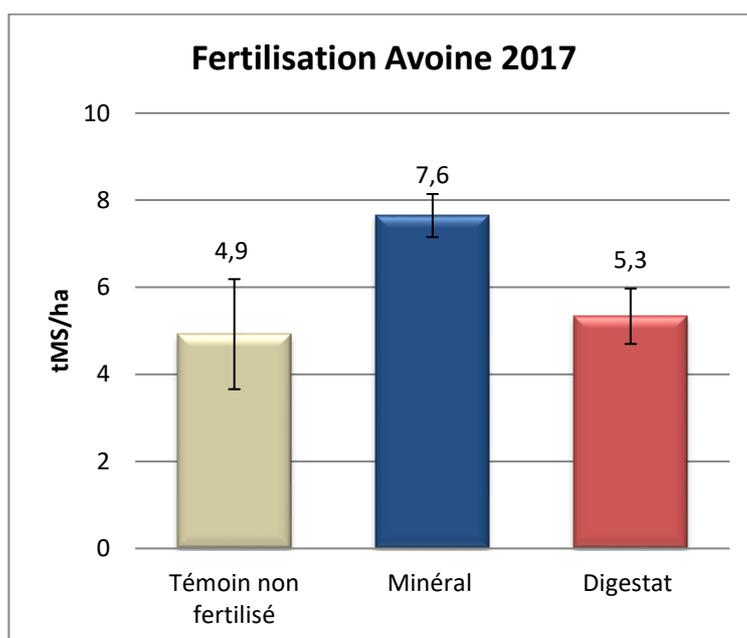


Figure 13 : Effet de la fertilisation sur le rendement de CIVE d'hiver (Avoine) 2017 ; OPTICIVE – Buros, 2017 – semis 2/11/2016, fertilisation 17/02/17 (70 kg N/ha sous forme d'ammonitrate ou de digestat – 18 m³), récolte 18/04/2017

² Guide méthodologique Réseau PRO - Mise en place d'un essai au champ pour l'évaluation agronomique, environnementale et sanitaire d'un Produit Résiduaire Organique : <http://www.rmt-fertilisationenvironnement.org/moodle/mod/resource/view.php?id=1034>

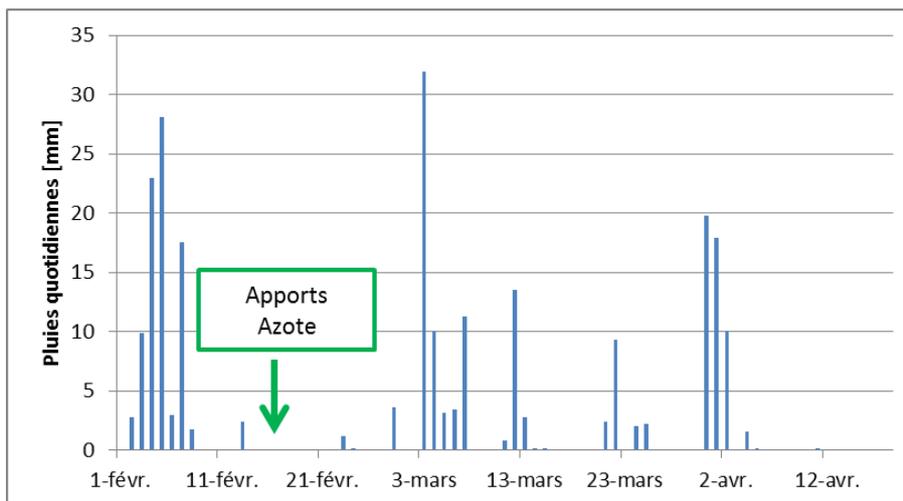


Figure 14 : Précipitations observées sur le site de Buros (64) au cours de l'essai fertilisation et valorisation de digestat sur Avoine CIVE d'hiver - OPTICIVE

Un essai identique (Figure 15 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) a été conduit sur CIVE d'été. Une règle de décision a été stabilisée pour l'apport de digestat (2/08/2017) face à ce risque de volatilisation et à l'absence d'équipement d'enfouissement. Cet apport a été réalisé en fonction des prévisions météorologiques avant orage estival.

L'effet fertilisant est confirmé avec une bonne valorisation du digestat (50 kg N sous forme de digestat de qualité identique à celui testé en CIVE d'hiver 2016 équivalente à la forme minérale (50 kg N sous forme d'urée).

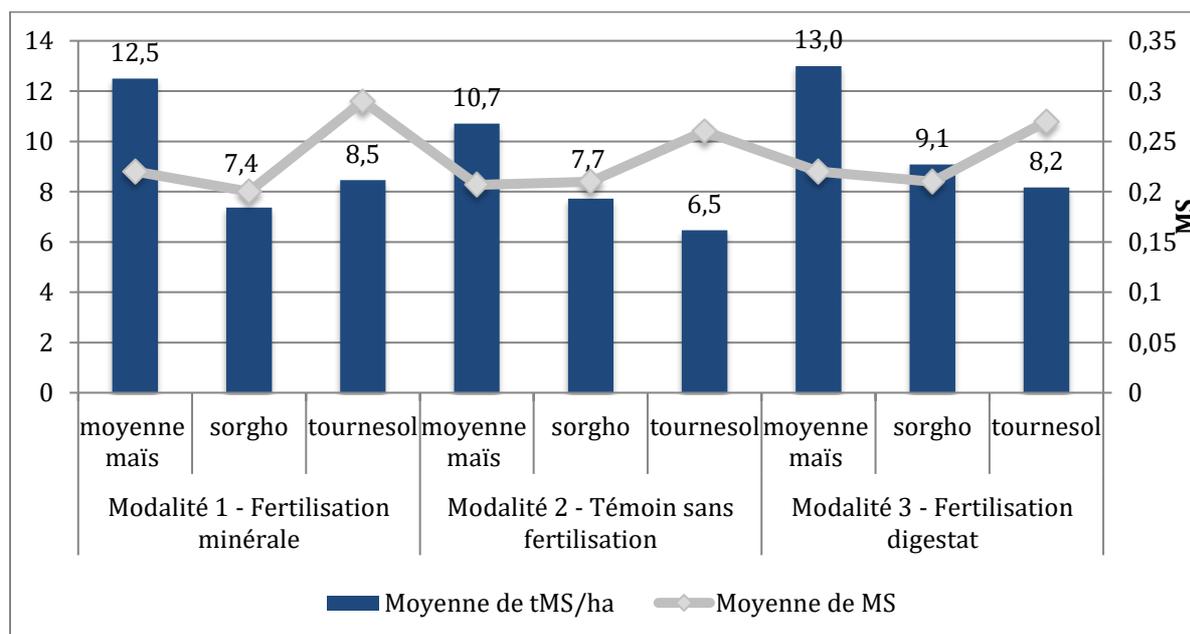


Figure 15 : Effet de la fertilisation et de la forme d'apport sur la biomasse de CIVE d'été ; OPTICIVE- Larreule 2017 ; Semis 17/07, Récolte 27 Octobre 2017, fertilisation 2/08/2017

2.2.3.3. Autres conduites de CIVE

Un autre essai conduit sur le site de Castetis a permis d'évaluer l'intérêt de la fertilisation sur des graminées pluriannuelles fréquemment implantées comme prairies temporaires dans des systèmes d'élevage comme le Ray Grass d'Italie. Cette espèce implantée seule ou associée à une légumineuse a été conduite avec deux niveaux de fertilisation minérale (ammonitrate) : 40 et 80 kgN/ha et trois dates d'observation de biomasse : La première date de coupe (D1) est réalisée courant montaison (5 avril), la deuxième (D2) 8 jours après (12 avril) et la troisième (D3) une semaine plus tard (19 avril). Ces différences de conduite n'occasionnent pas de différence significative de rendement en biomasse (Figure 16 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

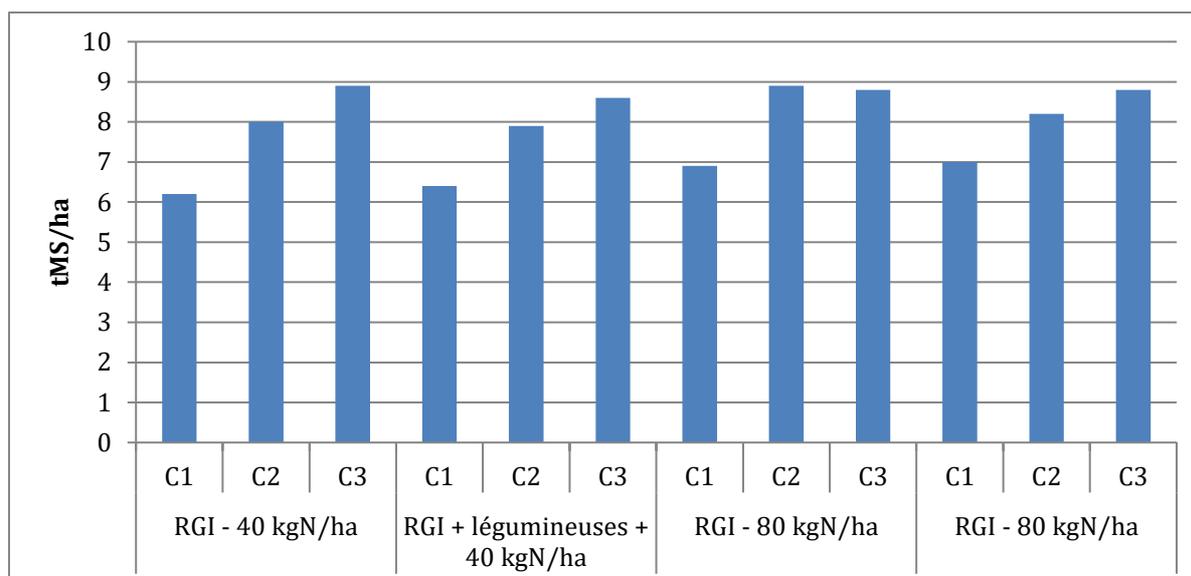


Figure 16 : Impact de la fertilisation azotée sur le rendement en biomasse de ray grass d'Italie conduit en CIVE d'hiver – OPTICIVE, 2016 – Semis 21/09/15, 3 dates de récolte dès avril (2016).

2.2.4. Impact des CIVE sur l'état hydrique et azoté de sol à la récolte

2.2.4.1. Impact des CIVE sur les reliquats azotés

Les CIVE doivent remplir des fonctions économiques mais avant tout écosystémiques des couverts d'interculture, en premier lieu de réduction des risques de lixiviation des éléments minéraux. Pour cela l'état des reliquats azotés du sol en entrée et sortie hiver a pu être mesuré sur chacun des essais, notamment sur les essais systèmes et leurs essais analytiques adjacents.

Ce type de dispositif expérimental permet de comparer des concentrations en azote du sol sous les CIVE d'hiver et en situation témoin de sol nu. Il faut rappeler que le sol nu est observé en système témoin d'une succession blé-tournesol dans les coteaux argilo-calcaire du Lauragais. Les reliquats observés à l'implantation du tournesol correspondent à la date de récolte de la CIVE, fin avril. En 2017, à l'exception du triticale, ce niveau de reliquats sous CIVE est inférieur de 50% environ à celui observé en sol nu (Figure 17). Cette année est marquée par une pluviométrie de printemps très régulière et a largement facilité la minéralisation du sol qui se retrouve dans des niveaux de reliquats extrêmement élevés sur ce type de sol. Ces mesures élevées de reliquats azotés en entrée hiver, en 2017, peuvent aussi s'expliquer d'une part du fait d'une forte minéralisation de l'azote pendant l'été, d'autre part d'une efficacité moindre de l'absorption en azote du précédent cultural. La situation sous triticale peut éventuellement s'expliquer de par la position de la parcelle et de zones facilitées de circulation d'eau.

En 2018, année excessivement pluvieuse au printemps, les constats sont identiques avec une très forte minéralisation et une quantité d'azote sous CIVE nettement inférieure au témoin sol nu.

Ces mesures confirment et traduisent la capacité des CIVE à valoriser et puiser l'azote du sol assurant ainsi leur rôle de couverts d'interculture piège à nitrate vis-à-vis des risques de lixiviation.

En CIVE d'été (Figure 18), le même type de mesure réalisé sur Syppre® Béarn montre des reliquats à la récolte des CIVE (Octobre) de 50 à 70 kg N/ha sur 90 cm. Ces reliquats traduisent la minéralisation importante en été et début d'automne. Ces niveaux légèrement élevés restent toutefois inférieurs à la référence en système maïs mulching : 47% de la référence en 2017 et 90% en 2018. L'intérêt de systèmes avec un autre couvert d'interculture, semé après CIVE d'été ou en système témoin se confirme.

D'autres sites moins humifères, avec une pluviométrie estivale moindre devraient compléter cette analyse pour évaluer cet état azoté en situations contraintes.

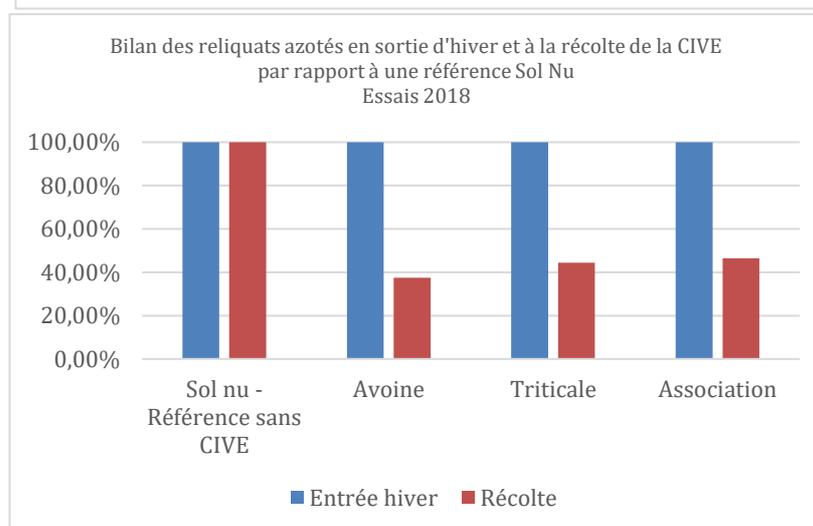
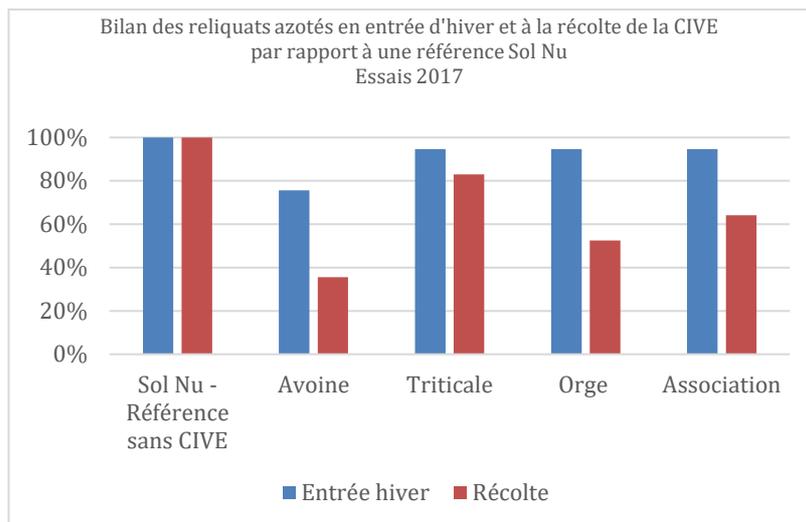
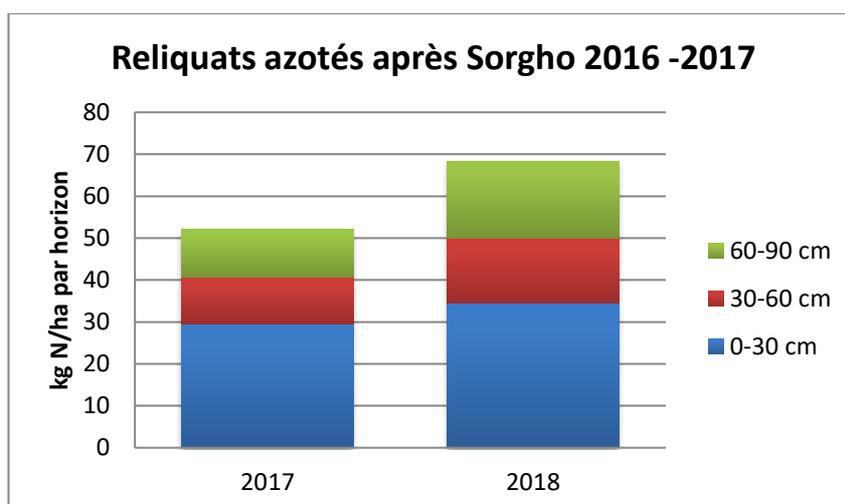


Figure 17 : Reliquats azotés par espèce de CIVE (fertilisée au printemps) en entrée hiver et à la récolte (fin avril) sur l'essais Syppre® en coteaux argilo-calcaire du Lauragais, OPTICIVE.

Figure 18 : Reliquats azotés après CIVE d'été (Sorgho 2016-2017) fertilisé (46 kgN/ha) sur le site Syppre ® Béarn, OPTICIVE.



2.2.4.2. Impact des CIVE d'hiver sur l'état hydrique du sol à la récolte

Des mesures d'humidité pondérale ont été effectuées à chaque date de mesure de biomasse aérienne sur 3 horizons : 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm. Une mesure sur une bande de sol nu attenante

à l'essai a également été faite en sortie hiver pour les CIVE d'hiver. Les systèmes témoin des sites Syppre® constituent également une référence.

Les résultats ci-dessous (Tableau 5) correspondent aux mesures effectuées à la récolte des CIVE d'été sur le site de Buros. Ces mesures illustrent la consommation en eau des CIVE d'été avec un niveau de réserve facilement utilisable totalement consommée à la récolte de ces couverts. Les mesures sont issues de la méthode gravimétrique, avec pesée de la quantité d'eau par horizon. Les mesures de densité apparente effectuées sur ces sites sont alors valorisées.

Tableau 5 : Eau disponible à la récolte de CIVE d'hiver sur le site de Buros – OPTICIVE

	Mm d'eau disponible par espèce en mm		Horizons en cm			Total eau sur 0-90 cm
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	
2016	Moha	Récolte	12.8	11.7	11.7	36.2
		Réserve de survie				34.0
	Millet	Récolte	12.9	11.2	11.3	35.4
		Réserve de survie				34.0
	Tournesol	Récolte	10.4	8.8	9.2	28.4
		Réserve de survie				34.0
	Sorgho	Récolte	12.1	11.1	11.8	34.9
		Réserve de survie				34.0
	Maïs	Récolte	12.5	10.8	10.8	34.1
		Réserve de survie				34.0

Pour les CIVE d'hiver, le processus est identique. Les mesures effectuées à la récolte sont proches de la réserve de survie (Béarn) ou cette dernière est en partie consommée dans le Lauragais (Tableau 6). Dans tous les cas, il n'existe pas de différence significative entre espèce. Ces mesures confirment la consommation en eau des CIVE à cette période où les besoins sont maximaux.

Tableau 6 : Eau disponible à la récolte de la CIVE d'hiver sur les dispositifs Syppre® Béarn et coteaux argilo-calcaire du Lauragais dans le cadre d'OPTICIVE.

	Mm d'eau disponible par espèce en mm		Horizons en cm			Total eau sur 0-90 cm
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	
2016	Avoine E1	Récolte	12.5	13.4	13.8	39.7
		Réserve de survie				34.0
2017	Sol Nu Béarn	Récolte	9.7	11.0	11.6	32.3
		Réserve de survie				34.0
	Avoine E1	Récolte	9.1	9.7	10.3	29.1
		Réserve de survie				34.0
	Avoine E3.1	Récolte	9.7	10.8	10.9	31.4
		Réserve de survie				34.0
	Sol Nu EA	Récolte	7.4	8.5	8.0	23.9
		Réserve de survie				31.0
	Avoine ES	Récolte	4.9	5.7	5.8	16.5
		Réserve de survie				31.0
Avoine EA	Récolte	4.9	6.0	6.5	17.4	
	Réserve de survie				31.0	

	Triticale	Récolte	4.5	6.0	7.5	17.9
		Réserve de survie				31.0
	Orge	Récolte	5.3	6.0	7.5	18.8
		Réserve de survie				31.0
	Association	Récolte	3.6	5.0	5.5	14.1
		Réserve de survie				31.0
2018	Sol Nu EA	Récolte	7.1	8.5	9.0	24.6
		Réserve de survie				31.0
	Avoine ES	Récolte	7.2	8.6	8.7	24.5
		Réserve de survie				31.0
	Avoine EA	Récolte	7.1	8.0	9.5	24.6
		Réserve de survie				31.0
	Triticale	Récolte	6.7	8.5	9.0	24.2
		Réserve de survie				31.0
	Association	Récolte	6.2	7.5	8.5	22.2
		Réserve de survie				31.0

2.2.5. Impact et adaptation pour la culture suivante

Cet assèchement de la réserve par les couverts sur la culture suivante est une source d'impact sur le rendement de la culture suivante non négligeable qu'il convient d'instrumenter. Des bilans hydrique ont alors été réalisés sur la séquence de culture, avec réinitialisation et correction éventuelle de l'état initial de la réserve de la culture suivante à partir des mesures précédentes (Tableau 6). Ces bilans illustrent le rechargement de cette réserve hydrique du sol sur le mois de mai, historiquement un des mois les plus arrosés de l'année sur de nombreuses régions françaises. Ces pluies rechargent alors la réserve pour la culture suivante qui ne serait pas pénalisée par ce déficit hydrique mais potentiellement par d'autres.

Les mesures d'impact ont été réalisées sur les sites Syppre® mais également sur Castetis. Sur ce dernier lieu, un maïs ensilage (conduite pluviale) était semé après les différents couverts :

- Couverts fertilisés (80 kgN/ha) ou pas ;
- retournés au sol (nom espèce seul) ou récoltés (nom espèce exporté).

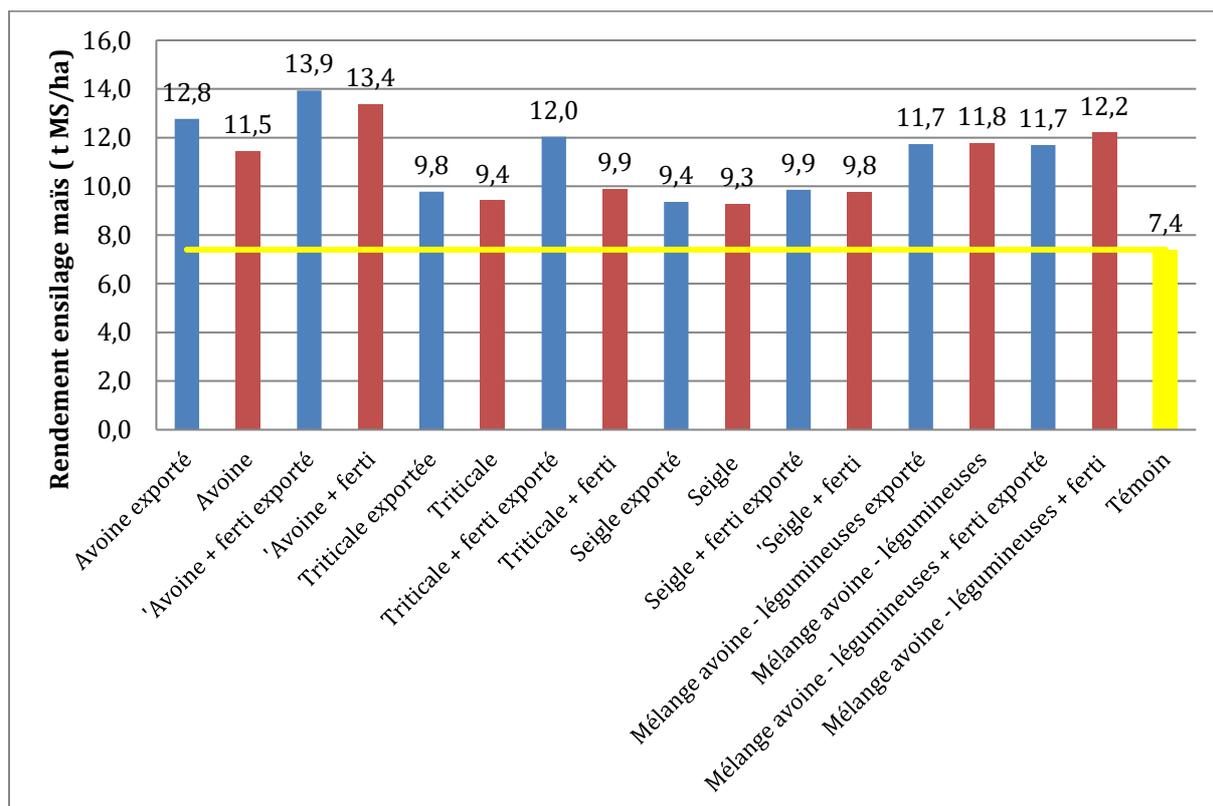


Figure 19 : rendement du maïs ensilage après CIVE d'hiver selon la conduite de cette OPTICIVE 2016, castetis

Pour cet essai, un maïs témoin sans couvert et non fertilisé permet de mesurer un impact positif sur le rendement du maïs de l'ensemble des couverts précédents (Figure 19). Pour des couverts précédents en espèces pures de graminées, le rendement obtenu pour le maïs est supérieur à celui obtenu dans le cas où les couverts précédents étaient exportés et fertilisés. Cela confirme les besoins en azote pour dégrader les résidus de couvert plus abondants dans la seconde modalité de couverts enfouis. Pour les modalités d'association graminées-légumineuses, cet impact reste positif sur le rendement du maïs suivant sans différence entre les modalités de couverts fertilisés ou pas. Cet essai, avec un objectif spécifique pour des systèmes fourrage ouvre de nombreuses opportunités en termes d'efficacité énergétique et environnementale. Il reste toutefois dépendant des conditions du milieu et demanderait à être reproduit dans d'autres conditions.

Sur le site Syppre® Béarn, le semis des maïs après CIVE d'hiver a été réalisé 10 à 15j après les maïs de référence en monoculture et mulching. Une variété de maïs plus précoce a été choisie pour compenser ce décalage de date de semis. Sur 3 campagnes d'essai, le différentiel de rendement entre ces modalités de maïs témoin (mulching) et après CIVE s'élève à 0.9t/ha au profit de la référence :

- Rendement séquence de référence maïs (grain) mulching : 12.8 t/ha ;
- Rendement du maïs (grain) de séquence innovante maïs CIVE : 11.9 t/ha ;
 - Rendement moyen de la CIVE : 6.1 tMS/ha

La perte de rendement serait majoritairement due à ce décalage de semis. Le besoin de génétiques plus précoce après CIVE se confirme pour toutes les cultures alimentaires suivantes en cas de décalage de semis (tournesol, voire soja ou sorgho selon les régions).

2.2.6. Semis sous couvert

Les précédentes expériences comme le programme ExpéCIVE avaient mis en avant le besoin d'adapter le cycle des CIVE afin d'optimiser leur production. Des solutions alternatives telles que les semis sous couverts pourraient présenter un intérêt afin de gagner quelques jours sur le cycle de développement.

L'objectif poursuivi dans OPTICIVE était de mettre en œuvre différentes techniques de semis sous couvert. Ces techniques ne sont toutefois pas répandues et maîtrisées pour la problématique des CIVE. La question se pose particulièrement pour les CIVE d'hiver afin d'avancer les dates d'implantation notamment dans des systèmes maïs. Trois différentes techniques ont été testées : i) en limite passage tracteur avec un choix d'espèce adapté (mi juin) ; ii) en semis à l'enjambeur avant récolte à maturité physiologique ; iii) à l'hélicoptère.

La première technique en limite passage tracteur ne pose pas de problème technique d'implantation (via une bineuse ou des équipements existants). Les premiers retours interrogent fortement sur la concurrence du maïs, mais surtout vis-à-vis de la lumière pour le développement du futur couvert.

Pour le semis à maturité physiologique, la hauteur du maïs rend l'opération délicate. Il est nécessaire d'être équipé d'un enjambeur et d'adapter des matériels de semis ou d'épandage.

Trois espèces ont été testées à différentes densités (Tableau 7) et deux dates de semis.

Tableau 7 : Modalités testées en semis de CIVE à l'enjambeur sous couvert de maïs, OPTICIVE 2016

espèces	variété	densité semis (kg/ha)	Date semis sous couvert (maturité physiologique)	Semis à la récolte
Avoine rude	Iapar	40	21/09	25/10
triticale	Tribeca + TS Gaucho	70		
orge	KWS Cassia + TS Gaucho	130		

Les densités de semis sont réduites pour quelques espèces, aucune fertilisation n'a été apportée sur CIVE. Un prélèvement de biomasse le 14 mars 2016, a été effectué. Sur l'ensemble des espèces, un semis plus précoce de CIVE dans le maïs permet d'améliorer le rendement final de 0.4 à 1.4 tMS/ha (Tableau 8). Le triticale et l'avoine semblent être les deux espèces au comportement le plus intéressant.

Tableau 8 : Rendements de biomasse (tMS/ha) de CIVE d'hiver au 2/03/2017 pour des CIVE implantées sous couvert de maïs à maturité physiologique

	semis le 21 sept à maturité physio	semis le 25 oct après récolte
Avoine	2	1,6
Orge	1,4	0,8
Triticale	2,8	1,4

Pour les modalités de semis à l'hélicoptère, différentes règles ont été établies sous maïs semences ou maïs consommation. Sur du maïs semences, le semis devra être réalisé 60 jours minimum après le dernier désherbage et avant le broyage des mâles pour assurer un contact sol graines soit le 28 et 29 août pour les années d'essais.

Pour du maïs de consommation, le semis du couvert dans le maïs devra être réalisé lorsque les feuilles inférieures et les spathes commencent à se dessécher. La répartition des graines sera donc facilitée. La date de semis correspond au stade maturité physiologique vers le 30 septembre.

Des notations de hauteurs, de biomasse, de répartition ont été effectuées 15, 30 ou 45 jours après semis sur plus de 110 ha. Les résultats sont très hétérogènes tant pour :

- La répartition au sol (Epandage aérien) :
 - Densité des graines différentes (répartition des mélanges de graines délicate) ;
 - Végétation de maïs qui parfois gêne la répartition.
- Le développement des couverts :
 - Développement plus important derrière les pieds mâles en maïs semence ;
 - Germination et développement directement corrélés à la disponibilité en eau après les semis (pluviométrie et réserve en eau des sols) ;

- Développement différent en fonction de la propreté de la parcelle. Germination délicate et développement moindre lors de compétition avec les adventices.
- Une grille de comportement (Tableau 9) a pu être établie.

Graines	Répartition au sol		Développement			Très bonne
	Inter rang	Epandage Hélico	Capacité de germination (graine posée au sol)	Rapidité	Couverture	
Avoines						
Seigles						
Vesce						
Trèfle						
Navette						

Tableau 9 : Tableau récapitulatif du comportement des espèces de CIVE en semis sous couvert de maïs, OPTICIVE

Les mesures de biomasse effectuées sur 4 parcelles (Figure 20) en février-mars donnent des résultats très hétérogènes avec des rendements fréquemment faibles. Des densités de semis correspondaient à une conduite de type couvert d'interculture sans objectif de production. Ces semis gagneraient à être testés à plus forte densité afin de mieux analyser et extrapoler ces résultats

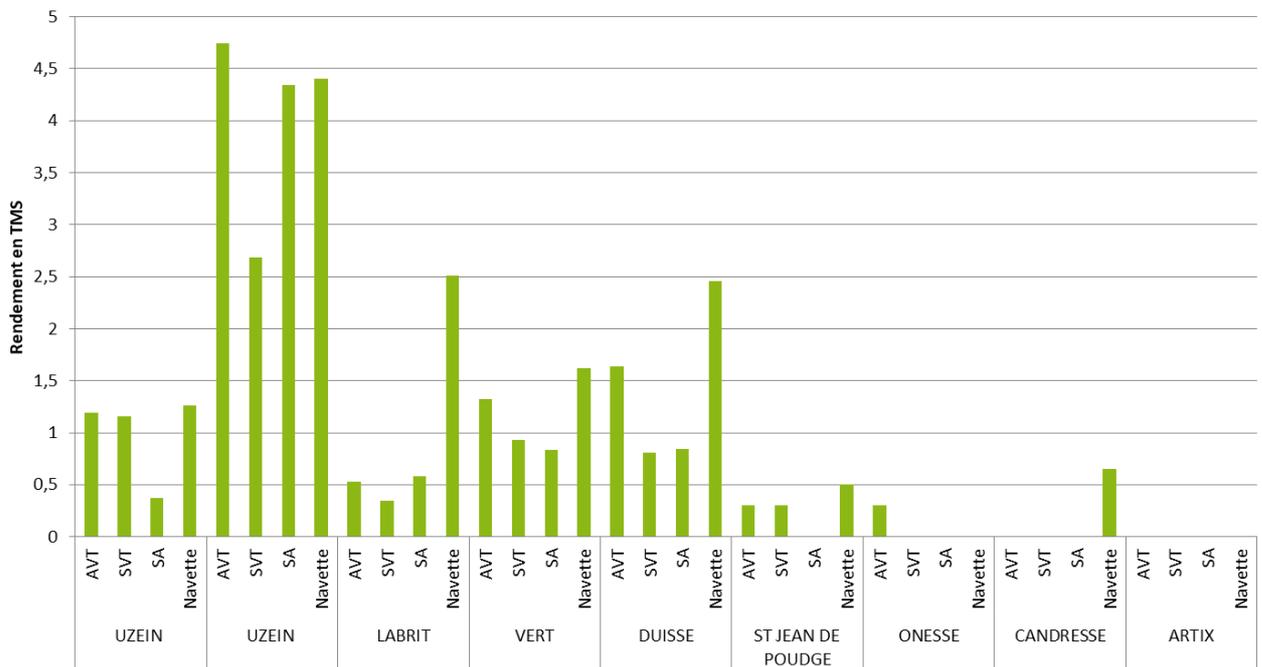


Figure 20 : Rendements biomasse de parcelles de CIVE semées sous couvert de maïs à l'hélicoptère au cours du programme OPTICIVE

Ces deux techniques d'implantation permettent de gagner 15 jours sur le semis des CIVE et d'envisager un développement sur ces surfaces de maïs. Ce constat s'est particulièrement confirmé pour les semis à l'enjambeur avec une bonne aptitude de l'avoine et du triticale.

Concernant les semis par hélicoptère, que ce soit en maïs semence ou en maïs consommation, les résultats sont hétérogènes et les conditions de réussites semblent être les suivantes :

- Il est nécessaire d'épandre sur des parcelles propres sans une trop forte pression des adventices
 - Espèces navette, avoine et vesce à privilégier ;
 - Réaliser l'épandage 15 jours maximum avant la récolte,
- Méthode très dépendante du climat et notamment de la pluviométrie derrière le semis des couverts

Si les comparaisons d'émissions de GES pour ces techniques sont en cours, ces techniques gagneront à être approfondies pour assurer un bon développement des CIVE. Leur adaptation pour les CIVE d'été semées dans des céréales est également une opportunité pour réduire les risques de stress hydrique à la levée.

2.2.7. Optimisation du travail du sol dans la succession

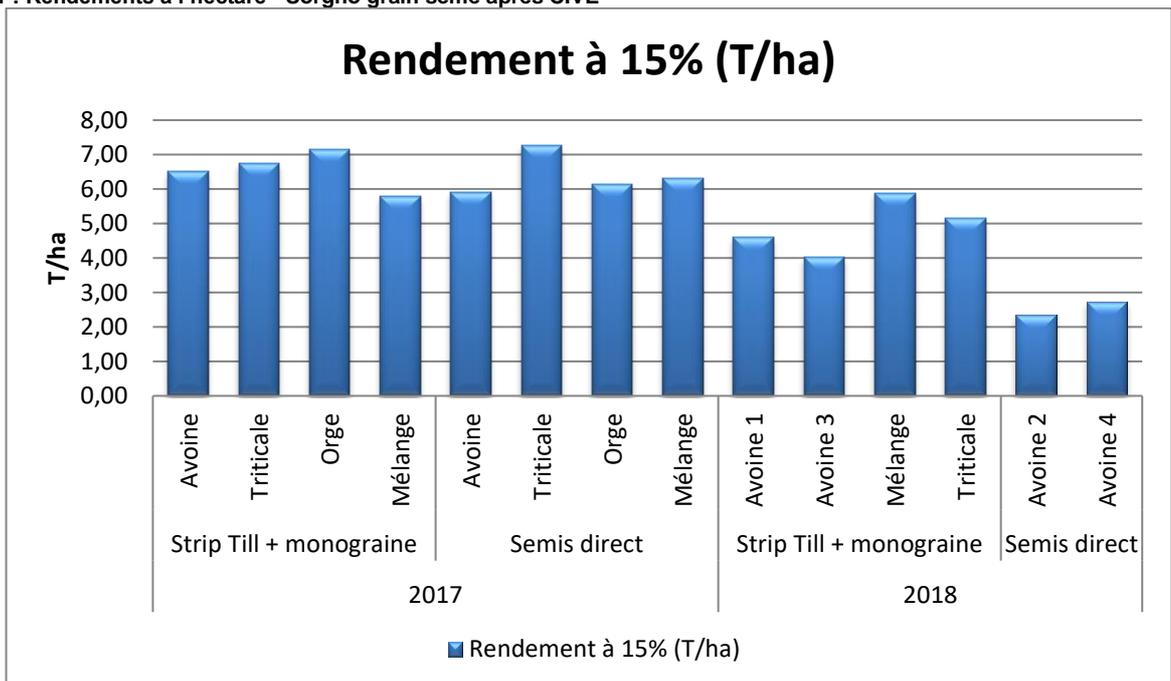
Les enjeux du travail du sol et des modes d'implantation dans les successions de 3 cultures en 2 ans sont nombreux : maintien de l'humidité des sols, réduction de l'enherbement, temps disponible et portance des sols. Cette question avait été mise en avant dans le projet CIBIOM notamment pour les séquences avec CIVE d'hiver et l'implantation des cultures alimentaires après CIVE.

Un essai de comparaison de mode d'implantation a été conduit à proximité de plateformes Syppre® coteaux argilo-calcaire du Sud-Ouest en 2017 et 2018. Deux modes d'implantation de sorgho grain ont été réalisés : un semis direct et un semis avec travail du sol sur le rang au strip-till après récolte de CIVE d'hiver. En 2017 ces semis ont été réalisés perpendiculairement aux bandes de CIVE d'hiver récoltées, avec répétition. En 2018 cet essai a été semé dans le même sens qu'une avoine, un triticale et une association conduits en CIVE d'hiver.

Pour l'année 2017, le rendement du sorgho grain atteint 6 t/ha aux normes, sans différence significative de rendement entre ces deux modalités (Figure 21). Le sorgho semé en direct a été marqué par un faible peuplement (potentielle perte de graines en raison d'un orage après semis), mais a obtenu un nombre de grains par panicule plus important que pour la modalité strip-till (Figure 22). La densité de grains/m² et le PMG (poids mille grains) sont proches pour les deux modalités.

En 2018, les fortes précipitations relevées au printemps ont refroidi le sol et affecté le potentiel du sorgho. Comme en 2017, les levées en modalité semis direct étaient faibles et irrégulières. Une différence significative de rendement est observée au profit du semis après strip-till mais le couvert précédent l'implantation du sorgho n'a pas d'effet significatif sur le rendement.

Figure 21 : Rendements à l'hectare - Sorgho grain semé après CIVE



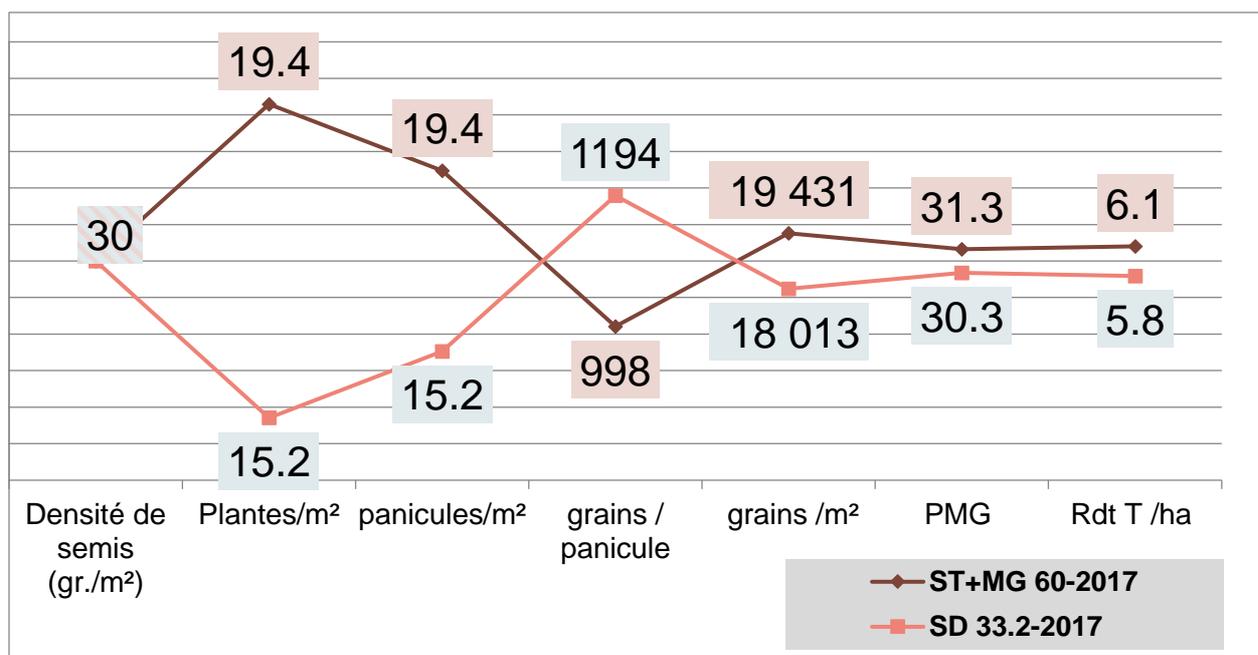


Figure 22 : Elaboration du rendement du sorgho grain en 2017 selon le mode de semis, Essais analytique OPTICIVE 2017

Ces observations confirment ainsi la possibilité de réduire le travail du sol entre une CIVE d'hiver et la culture suivante (sorgho). Le semis direct comme lors du programme CIBIOM doit être maîtrisé et l'outil adapté en raison d'un état du sol plus gras en surface. En revanche, y compris en sol argileux, un travail de la ligne de semis sur 10-15 cm avec strip-till paraît envisageable selon les conditions de l'année afin d'assurer une bonne implantation de la culture. Les CIVE assèchent le profil en profondeur et réduisent ainsi le risque de lissage. Ces choix doivent rester annuels et sont dépendants de chacune des années. Ces modalités d'implantation permettent toutefois de gagner du temps entre les 2 cultures avec un semis possible le jour de la récolte. Des observations à plus long terme sur la gestion du désherbage dans ces systèmes seront toutefois nécessaires.

3. Composition physico-chimique et digestion anaérobie

3.1. Caractérisation du potentiel méthanogène

Des échantillons de biomasse ont été collectés sur toutes les expérimentations conduites au cours du projet. Un plan d'analyse a ensuite été construit et adapté lors du comité de pilotage élargi du projet. En effet, les agriculteurs méthaniseurs présents souhaitaient aborder l'évolution du pouvoir méthanogène (BMP) au cours du développement des CIVE. Les analyses de compositions physico-chimique plus classiques ont également été réalisées sur la base de recommandations et protocoles mis en œuvre dans de précédents projets (Regix, ANR ; Da Silva Perez, 2010 ; Labalette ; 2010).

D'autres voies de valorisation ont été étudiées comme le potentiel éthanol de seconde génération.

Les espèces, sites et échantillons analysés avaient donc comme objectifs majeurs d'aborder :

- La comparaison des BMP entre espèces ;
- L'évolution des BMP pour quelques espèces de CIVE d'hiver selon le stade de récolte ;
- La variabilité du BMP et de la composition physico-chimique de quelques espèces selon la zone pédoclimatique.

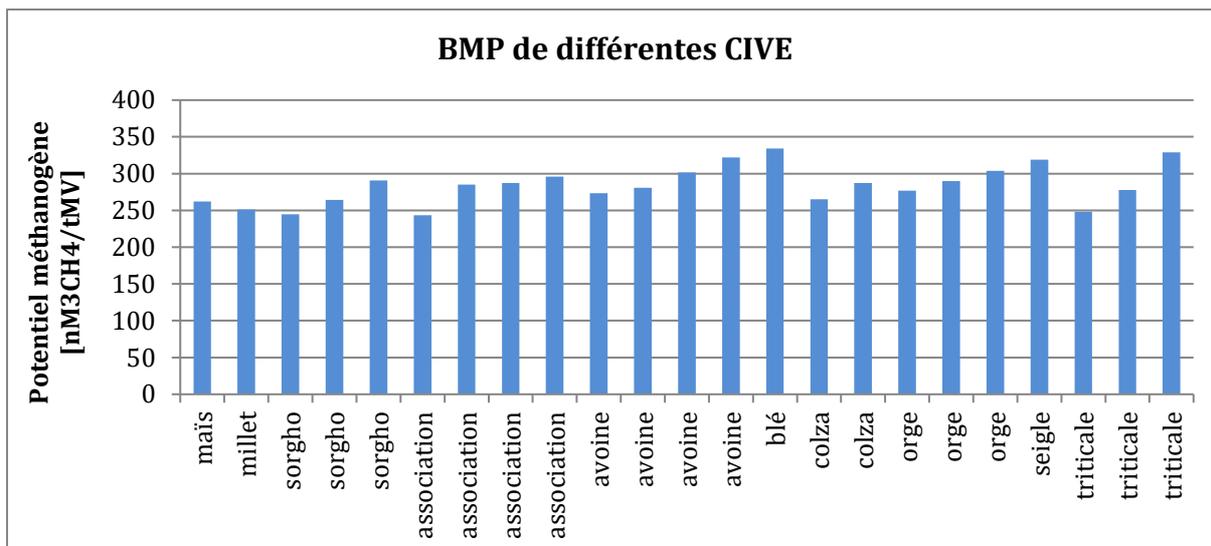


Figure 23 : Pouvoir méthanogène de 23 échantillons de CIVE

Les mesures de potentiel méthanogène (BMP) présentées dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ont été effectuées dans le cadre d'OPTICIVE et du précédent programme CIBIOM sur 23 échantillons de CIVE (échantillons, frais, secs, ensilés après 2 mois...) par l'INRA Transfert Environnement et quelques échantillons traités par l'IRSTEA dans le cadre de la thèse de Y Bareha), OPTICIVE – mesures ITE). Une analyse de variance de ces BMP (litre CH₄/kgMV) ne montre pas de différence significative.

Suite aux interrogations des agriculteurs, des mesures complémentaires ont été réalisées pour différents stades de développement de CIVE d'hiver : 3 dates de récolte au 15/03, 1/04 et 15/04 (Figure 24). Ces mesures vont à l'encontre des retours agriculteurs. Les BMP diminuent avec le développement des plantes et donc leur lignification. En revanche la production supplémentaire de matière sèche et la siccité des plantes occasionnent des potentiels de production de méthane nettement supérieurs : 2000 à 2500 Nm³ CH₄/ha pour une récolte à l'épiaison des CIVE d'hiver (25/04 environ).

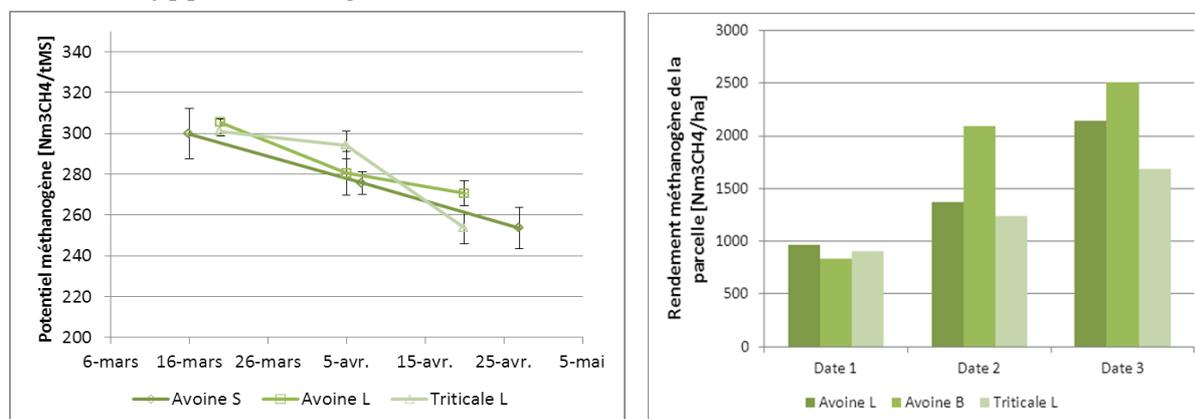
La vision des agriculteurs et termes employés sont alors certainement à expliciter. La production de méthane est supérieure avec un développement plus long des CIVE d'hiver en raison de la production de biomasse supérieure à l'hectare.

Ces résultats traduisent le besoin de rechercher une production maximale de biomasse. Cette recherche de productivité en relation avec l'optimisation de la conduite est également une voie d'intensification des services environnementaux (émission GES, stockage de carbone et efficacité énergétique).

Figure 24 : Pouvoir méthanogène unitaire et rendement méthanogène à l'hectare d'avoine et de triticale conduits en CIVE selon le stade de développement, OPTICIVE.

S = site Syppre[®] Béarn

L = Site Syppre[®] Lauragais (Coteaux Argilo-calcaire Sud-Ouest)



3.2. Essais pilotes de méthanisation de CIVE

Il était prévu de tester l'assemblage de CIVE dans le digesteur expérimental d'ARVALIS à Montardon (64) afin de tester la biodégradabilité anaérobie du mélange de co-produits entrants et de lever certaines incertitudes, notamment sur des effets potentiellement limitants (toxicité, inhibition, carence...) pour le processus biologique de méthanisation. Ce dispositif expérimental n'a pas permis comme envisagé d'introduire les CIVE dans le digesteur. Ces essais ont alors été confiés à l'APESA dans leur réacteur pilote.

Deux tests en procédé infiniment mélangé ont été réalisés sur deux assemblages. L'essai en réacteur pilote vise à reproduire les conditions de fonctionnement industriel. L'APESA a une expérience de plusieurs années sur ce type d'essais et dispose sur son plateau technique de Lescar (64) des équipements adaptés pour reproduire le schéma de traitement envisagé et obtenir les renseignements attendus.

Cet essai permet également d'obtenir un digestat brut dans des conditions similaires à des unités industrielles. Des analyses de caractérisation sont réalisées sur les digestats obtenus.

Deux assemblages de CIVE et de lisiers ont été testés dans des conditions de mix les plus représentatives des pratiques de terrain (Tableau 10). Une teneur en matière sèche de l'ordre de 12% a été fixée pour se rapprocher de valeurs classiques observées en méthanisation infiniment mélangé. Le tableau suivant présente les proportions des différents intrants pour les deux mélanges testés.

Paramètres	Unité	CIVE AVOINE	CIVE MAÏS	CIVE TOURNESO L	CIVE SORGHO	LISIER PORC	LISIER BOVIN	MELANGE 1 (calcul)	MELANGE 2 (calcul)
Proportions mélange 1	% PB	19%	12%	12%	0%	0%	57%	100%	
Proportions mélange 2	% PB	20%	10%		10%	60%			100%
MS	% PB	15,0%	30,7%	19,2%	17,7%	4,8%	5,6%	12,0%	10,7%
Humidité	% PB	85,0%	69,3%	80,8%	82,3%	95,2%	94,4%	88,0%	89,3%
MSV	% PB	13,4%	29,5%	16,9%	16,6%	3,7%	4,7%	10,8%	9,5%
	% MS	89,4%	96,1%	88,2%	94,0%	76,7%	83,6%	89,7%	88,7%
MM	% PB	1,6%	1,2%	2,3%	1,1%	1,1%	0,9%	1,2%	1,2%
	% MS	10,6%	3,9%	11,8%	6,0%	23,3%	16,4%	10,3%	11,3%
Corg	% PB	6,7%	14,7%	8,5%	8,3%	1,8%	2,3%	5,4%	4,8%
	% MS	44,7%	48,0%	44,1%	47,0%	38,4%	41,8%	44,8%	44,3%
NTK	g/kg PB	286	534	348	285	491	216	283	434
	g/kg MS	191	174	181	161	102	384	2 352	4 044
C/N		265	308	264	341	79	150	231	181
Méthane	(Nm3/ t PB)	462	910	502	393	56	151	344	256
	Nm3/t MSV)	3 444	3 087	2 965	2 365	1 515	3 226	3 183	2 695
Biogaz**	(Nm3/ t PB)	724	1 462	896	621	76	204	537	399
	Nm3/t MSV)	5 399	4 963	5 289	3 739	2 063	4 337	4 972	4 196
Durée de fermentation**	jours	25	25	25	24	36	39		
80% de dégradation **	jours	10	11	11	13	17	23		
Teneur en CH4**	%	64%	62%	56%	63%	73%	74%	64%	64%

*Mesures réalisées sur les mélanges au cours des semaines d'essai. Valeur moyenne.

**Données de test, fournies à titre indicatif.

Tableau 10 : Composition et caractéristiques des assemblages de substrats testés en essais pilote de méthanisation pour OPTICIVE dans le réacteur pilote APESA.

Les mélanges ont été méthanisés en conditions infiniment mélangées (12% MS), mésophiles à la charge d'environ 3 kg MSV/m³/j, dans des conditions représentatives de ce qui se fait à l'échelle industrielle.

Les résultats obtenus permettent de dresser un premier bilan et certaines conclusions peuvent être faites :

- La digestion anaérobie des mélanges de lisier et CIVE, dans les conditions opératoires testées et notamment la charge organique, présente un fonctionnement biologique stable et en adéquation avec les seuils de contrôle habituels.
- Malgré les pH acides des mélanges d'alimentation (de l'ordre de 5 à 6), le pouvoir tampon du milieu de digestion a été suffisant pour conserver un pH satisfaisant pour la méthanogénèse. Par ailleurs les acides organiques présents dans les différents ensilages ont été correctement assimilés et dégradés sans créer de déséquilibre.
- La teneur en azote élevée du lisier de porc n'a pas non plus engendré d'inhibition. Les concentrations en ammonium mesurées dans les digestats des deux pilotes (< 2 kg/m³) sont inférieures au seuil généralement considéré comme inhibiteur.
- Les paramètres de fonctionnement biologique, contrôlés pendant une phase stabilisée de 1,5 fois le temps de séjour, permettent de valider la CVO testée (respectivement 2,9 et 3,1 kg MSV/m³/j, pour les mélanges 1 et 2).
- Dans ces conditions, les potentiels méthane exprimés en pilote sont de l'ordre de 91% du potentiel méthane théorique (calculé à partir des potentiels méthane de chacun des intrants) pour les deux mélanges. Les rendements volumiques biogaz sont de 1,43 et 1,38 Nm³/m³/j et les taux de méthane obtenus en pilote sont de 57,1% et 55,5%, respectivement pour les mélanges 1 et 2.

3.3. Autres éléments de composition

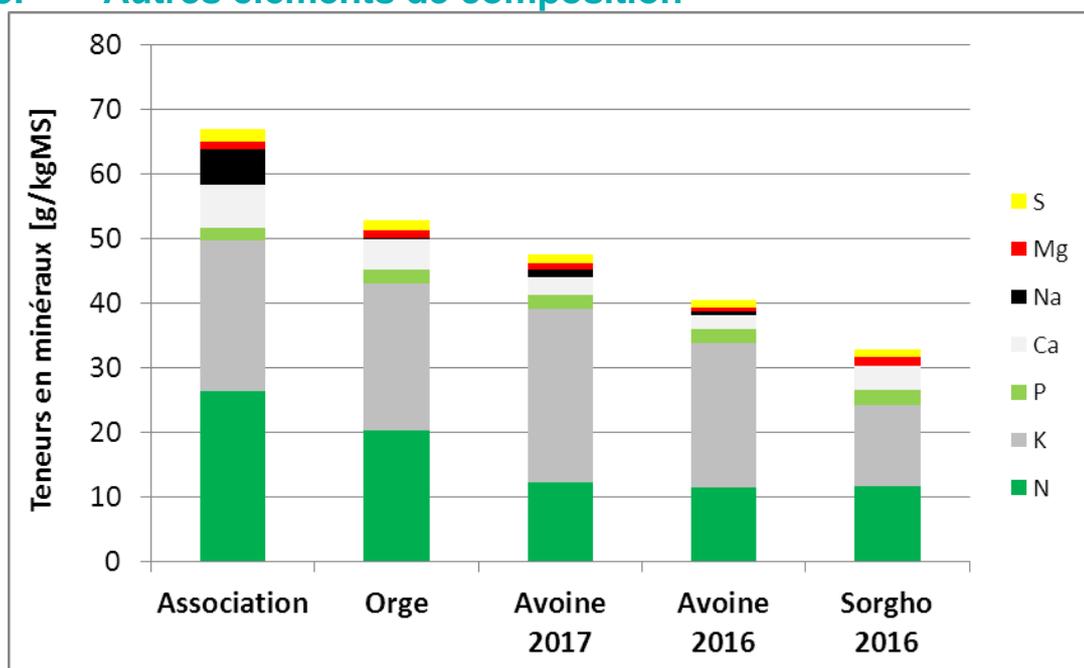


Figure 25 : Teneur en minéraux de la biomasse

La teneur en azote dans les graminées se situe entre 1 et 2% (Figure 25), tandis que la teneur en potassium est bien plus importante. Un point d'attention doit donc être porté sur les exportations de K₂O à la récolte des CIVE.

3.4. Potentiel éthanol

Au-delà de l'intérêt que représentent les CIVE pour leur pouvoir méthanogène, d'autres valorisations énergétiques sont envisageables dans le cadre du développement des énergies renouvelables. En effet leur composition biochimique recherchée pour la digestion anaérobie pourrait présenter un intérêt équivalent pour la production d'éthanol ou de composés précurseurs.

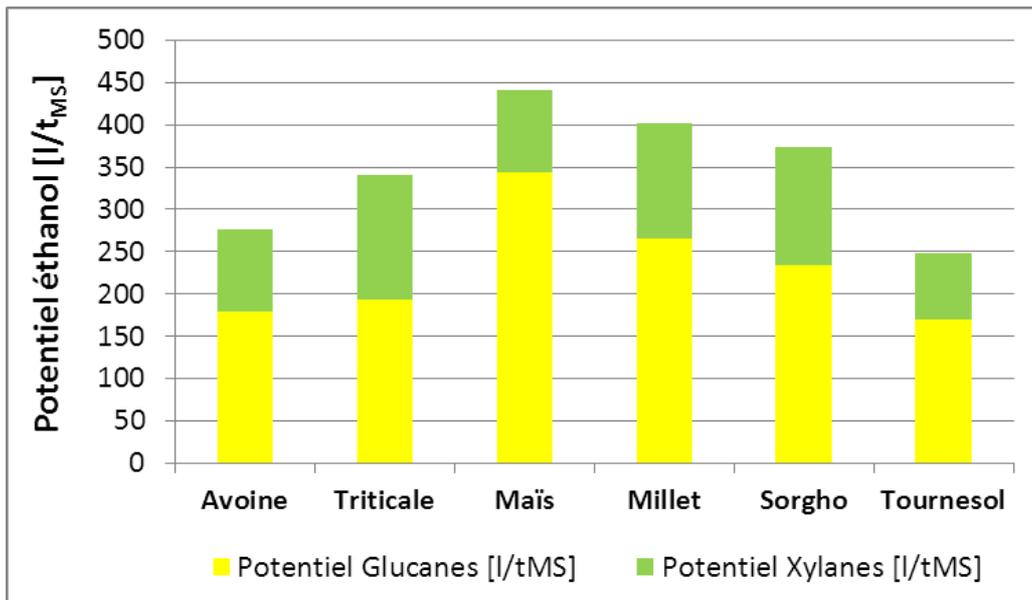


Figure 26 : Potentiel éthanol des CIVE

Ces analyses réalisées avec un protocole adapté (Determination of structural Carbohydrate cellulose, hemicellulose and lignin in Biomass – Lap 002 NREL) confirment ces potentiels d'intérêt avec 250 à plus de 400 l d'éthanol par tonne de matière sèche (Figure 26). Un plus grand nombre d'échantillons serait nécessaire pour confirmer des différences de comportement selon les espèces. Les plantes en C4 semblent offrir un potentiel légèrement supérieur. Cette valorisation pourrait constituer une autre voie de développement de ces systèmes.

4. CIVE et Etat organique des sols

4.1. Résidus de culture à la récolte

Des mesures de biomasse selon la hauteur de la plante ont été effectuées en 2017 et 2018 pour évaluer la quantité de biomasse restituée en fonction de la hauteur de récolte. Ces mesures ont été complétées en 2017 de mesures de masse racinaire sur 30 cm de profondeur de sol sur le dispositif analytique en coteaux argilo-calcaire du Lauragais.

Le premier tronçon de 10 cm au-dessus du sol représente plus de 1 tMS/ha (Figure 27 ; Figure 28 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Avec les équipements de récolte mobilisés sur les essais, la hauteur de coupe était en moyenne de 15 cm. Cette hauteur peut être réduite aujourd'hui à près de 7 cm avec une bonne préparation de sol et des équipements adaptés. Le poids des chaumes non récoltés représente alors pour les essais conduits près de 2 tMS/ha. Les racines quant à elles représentent également près de 2 tMS/ha sur les trente premiers centimètres. Ces quantités de biomasse aérienne restituées par les résidus de récolte sont équivalentes à la biomasse moyenne d'une CIPAN enfouie.

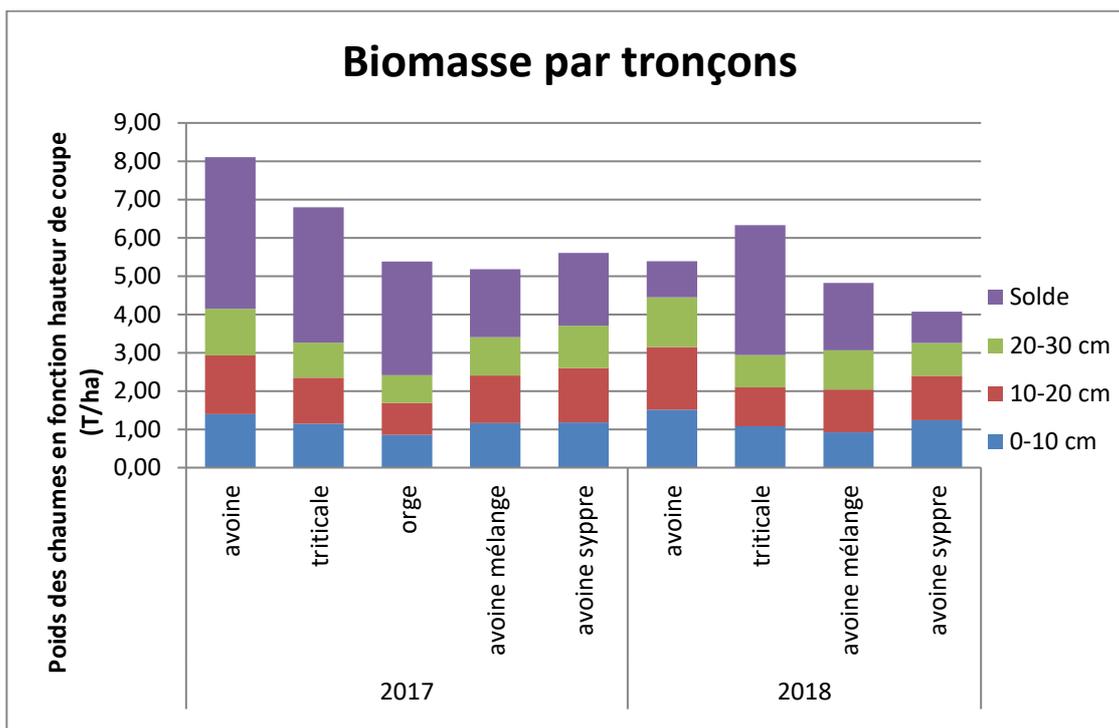


Figure 27: Poids de la biomasse aérienne de CIVE d'hiver mesurés sur les dispositifs Syppre® et essais analytiques OPTICIVE

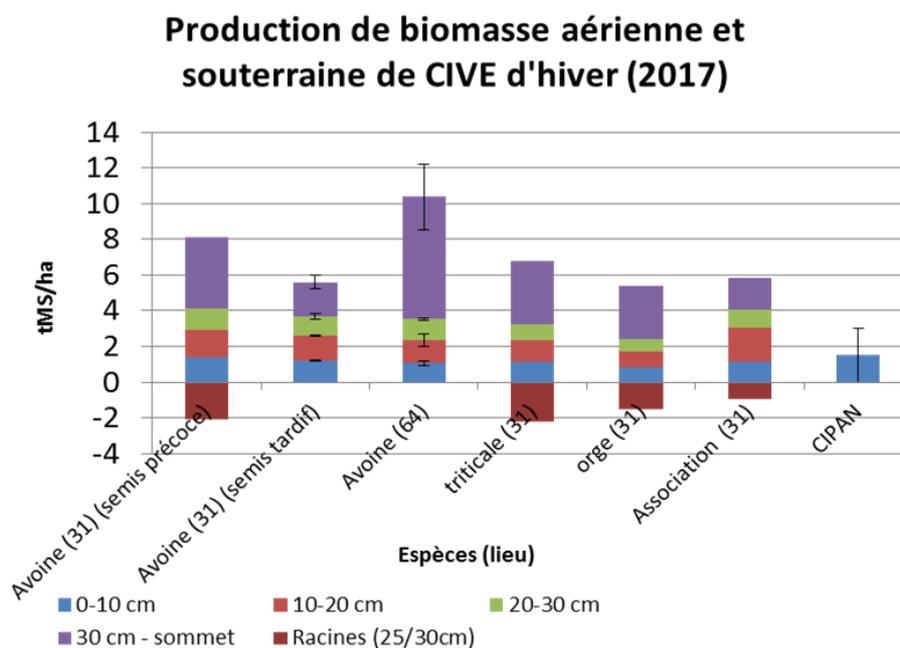


Figure 28 : Production de biomasse aérienne et souterraine de CIVE d'hiver 2017

Ces mesures constituent une première série de références qui ont pu être valorisées dans le cadre du projet SOLEBIOM afin d'améliorer le paramétrage du modèle de simulation de l'état organique des sols AMG (Andriulo, Mary et Guérif). Elles confirment l'intérêt des couverts pour le retour de la matière organique et donc du carbone organique au sol, malgré une large partie exportée dans le cas des CIVE.

4.2. Méthodologie de simulation de l'état organique des sols

L'état ou le statut organique d'un sol s'observe à travers la quantité, la qualité et la répartition dans le sol de la Matière Organique (MO) (Duparque et al. 2007). Le modèle AMG permet de fournir des résultats sur ce premier point. Il a donc été utilisé afin d'estimer les évolutions du stockage de carbone dans les sols suite à l'introduction de CIVE et l'utilisation de digestats dans un système de culture.

Des cas types de simulation sont construits afin d'être représentatifs de la région étudiée. Ils sont construits par étapes successives afin de permettre de dissocier les différents facteurs conduisant à d'éventuelles modifications du stockage du carbone dans les sols.

Le modèle AMG proposé en 1998 se base sur deux pools d'humus sur l'horizon 0-30cm, dont les dynamiques dans le temps sont différentes. Ce modèle fait référence en France et a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre à l'échelle d'une exploitation. Il a fait l'objet de mises à jour et améliorations, notamment lors du projet GCEOS (porté par Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2004-2010), le CASDAR ITA-AMG (porté par ARVALIS, 2010-2012), le projet SOLEBIOM (porté par Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2014 -2018). La version 2 d'AMG, issue de ce dernier projet, est celle utilisée pour l'étude OPTICIVE via l'outil « AMG ARVALIS version 6.1 ». Les mesures réalisées sur CIVE dans le cadre d'OPTICIVE ont été valorisées dans ce nouveau paramétrage de modèle.

Plusieurs cas type ont été construits (Tableau 11) afin de simuler cette évolution du carbone organique du sol : succession de culture, types de sol, production des cultures dans la succession...

Tableau 11 : Cas type de simulation du stock de carbone organique avec AMG dans des successions avec CIVE

Nom du cas type	Choix du sol	Cultures dans la rotation	CIVE	Travail du sol
A	Terreforts moyens	Sorgho – Orge d'hiver	Cive d'hiver avant le sorgho -5q/ha pour le sorgho	Labour 25 cm
B	Terreforts moyens	Blé – Orge d'hiver – Maïs grain irrigué	Cive d'hiver avant le maïs grain ; -10q/ha pour le maïs	Labour 25 cm
C	Boulbènes	Blé – Orge d'hiver – Maïs grain irrigué	Cive d'hiver avant le maïs grain ; -10q/ha pour le maïs	Labour 25 cm
D	Terreforts moyens	Blé – Orge d'hiver – Maïs grain irrigué	Cive d'été après l'orge	Labour 25 cm

Dans les simulations, les pailles sont restituées et enfouies.

Les simulations décrites en Tableau 12 permettent de répondre aux points ci-dessous :

- Rôle d'un couvert type CIPAN dans le stockage du carbone (1 <->2)
- Effet de la production d'une CIVE en comparaison de la biomasse d'une CIPAN (2 <->3)
- Effet de la perte de rendement potentielle sur la culture suivant la CIVE sur le stockage du carbone (3 <->4)
- Effet de l'exportation de la CIVE (4 <->5)
- Effet de l'intégration d'apports de digestats dans le système (5 <-> 6 et 7)
- Comparaison entre l'état initial (CIPAN) et la rotation avec CIVE (2 <-> 6 et 7)

Les comparaisons entre cas types permettront de répondre aux questions :

- Effet de la rotation : A <-> B
- Effet type de sol : B <-> C

Tableau 12 : caractéristiques des simulations d'évolution des stocks de carbone du sol réalisées avec AMG V2 dans le cadre d'OPTICIVE

Cas type	N° simulation	Culture 1	Culture 2	Culture 3	Couvert*	Produit organique	Objectif de la simulation
A	1	Sorgho	Orge d'hiver				Base A
	2	Sorgho	Orge d'hiver		CIPAN enfouie		Effet CIPAN
	3	Sorgho	Orge d'hiver		CIVE enfouie		Effet production de la CIVE
	4	Sorgho -5q/ha	Orge d'hiver		CIVE enfouie		Impact de la diminution de rendement du sorgho
	5	Sorgho -5q/ha	Orge d'hiver		CIVE exportée		Impact de l'exportation de biomasse
	6	Sorgho -5q/ha	Orge d'hiver		CIVE exportée	Digestat 1 sur CIVE	Effet du digestat 1
	7				CIVE exportée	Digestat 2 sur CIVE	Effet du digestat 2
B	1	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain			Base B
	2	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain	CIPAN enfouie		Effet CIPAN
	3	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain	CIVE enfouie		Effet intégration de la CIVE
	4	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain - 10q/ha	CIVE enfouie		Impact de la diminution de rendement du maïs
	5	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain - 10q/ha	CIVE exportée		Impact de l'exportation de biomasse
	6	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain - 10q/ha	CIVE exportée	Digestat 1 sur CIVE	Effet du digestat 1
	7	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain - 10q/ha	CIVE exportée	Digestat 2 sur CIVE	Effet du digestat 2
C	1	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain			Base C
	2	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain	CIPAN enfouie		Effet CIPAN
	3	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain	CIVE enfouie		Effet intégration de la CIVE
	4	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain - 10q/ha	CIVE enfouie		Impact de la diminution de rendement du maïs
	5	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain - 10q/ha	CIVE exportée		Impact de l'exportation de biomasse
	6	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain - 10q/ha	CIVE exportée	Digestat 1 sur CIVE	Effet du digestat 1
	7	Blé	Orge d'hiver	Maïs Grain - 10q/ha	CIVE exportée	Digestat 2 sur CIVE	Effet du digestat 2

Les rendements moyens représentatifs de types de sols et de la région considérée ont été intégrés aux simulations (Tableau 13).

Tableau 13 : Rendements moyens des cultures des cas types construits pour les simulations AMG du programme OPTICIVE

A	Sorgho : 55q/ha	Orge d'hiver : 65q/ha	CIPAN : 2 tMS/ha	CIVE : 6tMS/ha	
B	Blé tendre d'hiver : 60q/ha	Orge d'hiver : 65q/ha	Maïs grain : 110q/ha	CIPAN : 2 tMS/ha	CIVE : 6tMS/ha
C	Blé tendre d'hiver : 60q/ha	Orge d'hiver : 65q/ha	Maïs grain : 110q/ha	CIPAN : 2 tMS/ha	CIVE : 6tMS/ha

Deux digestats issus d'unités de méthanisation avec une mobilisation majeure de CIVE ont été caractérisés (Tableau 14 ; Tableau 15) après prélèvements au plus près des dates d'apport : composition chimique, fractionnement biochimique de la matière organique de ces digestats et minéralisation du carbone à 3 jours pour la détermination de l'ISMO.

Tableau 14 Composition chimique des digestats analysés essai OPTICIVE

	Code échantillon	Produit	pH	MS (% MB)	matière organique (% MB)	Carbone organique (g/kg MB)	Ntot (g/kg MB)	N-NH ₄ (g/kg MB)	P ₂ O ₅ (g/kg MB)	K ₂ O (g/kg MB)
Digestat 1	776966	Digestat brut issu de méthanisation de lisier porc + déchets verts + CIVES + déchets abattoir	7.7	5.38	3.7	18.5	4.2	1.3	1.6	4.5
Digestat 2	777054	Digestat brut issu de méthanisation de CIVES + mâles maïs semence	9.8	5.71	4.3	21.5	5.4	3.2	3.1	2.0

Tableau 15 : Fractionnement biochimique et ISMO des digestats analysés essai OPTICIVE

	Code échantillon	Produit	MV (% MS)	Soluble (% MVsec)	Hemicellulose (%Mvsec)	Cellulose (% MVsec)	Lignine (% MVsec)	Cmin3j (% Corg)	ISMO (% MO)
Digestat 1	776966	Digestat brut issu de méthanisation de lisier porc + déchets verts + CIVES + déchets abattoir	67.91	80.22	9.74	2.25	7.79	7.92	71.4
Digestat 2	777054	Digestat brut issu de méthanisation de CIVES + mâles maïs semence	76.07	45.89	17.53	20.63	15.95	5.31	62.3

Ces valeurs ISMO sont proches et se rapprochent également des données obtenues dans d'autres projets comme VADIMETHAN.

4.3. Résultats

4.3.1. Effet type de sol et couvert

L'effet type de sol et couvert (CIPAN) peut être analysé à partir des scénarii n°2 sur chacun des cas A, B, C (Figure 29). Chacun de ces cas permet de stocker du carbone mais avec des quantités dépendantes du sol étudié et de la rotation.

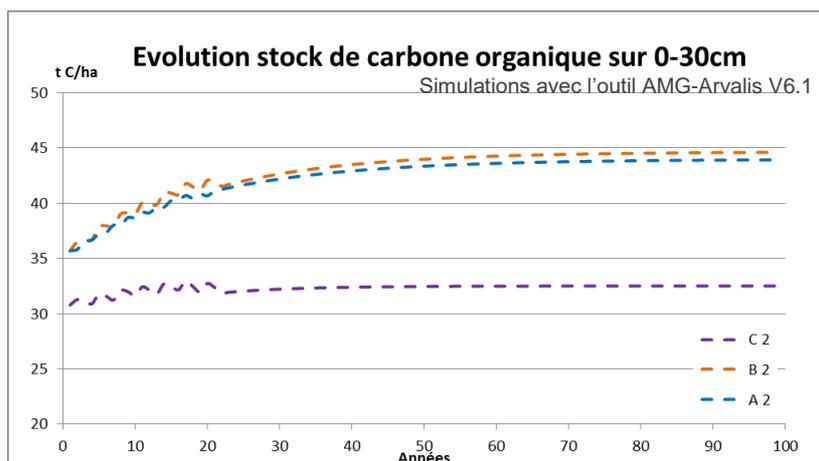


Figure 29 : Evolution du stock de carbone au cours du temps pour les simulations A2, B2 et C2

Tableau 16 : Ecarts de stock de carbone du sol simulés avec l'outil Arvalis-AMG V6.1 selon les scénarii A,B,C OPTICIVE

	Ecart stock carbone entre l'année 1 et l'année 100 (t C/ha)
A2	+ 8.24
B2	+ 8.92
C2	+ 1.72

A rotation identique (B et C), le cas C stock moins que le cas B (Figure 29 ; Tableau 16). Il y a donc un effet type de sol sur la quantité de carbone stockée ; mais les évolutions vont dans le même sens. Cette différence est due à la teneur de carbone de chacun de sols à l'état initial et à la différence de minéralisation entre les deux sols. En effet la minéralisation dépend des paramètres suivants :

- Elle diminue quand CaCO_3 augmente (CaCO_3 sol A > CaCO_3 sol C)
 - Elle augmente quand le pH augmente (pH sol A > pH sol B)
 - Elle diminue quand %argile augmente (%Argile sol A > %Argile sol B)
- A sol identique, la comparaison entre les cas A et B donne des informations sur l'effet rotation :
 - Malgré le fait que la CIPAN ne soit présente qu' 1 an sur 3 pour la rotation B au lieu d'1 an /2 pour la rotation A, les deux rotations permettent de stocker quasiment les mêmes quantités de carbone. Au global les restitutions sont donc équivalentes. Celles apportées par les cultures de la rotation B compensent une présence moins importante de CIPAN dans cette rotation.

4.3.2. Effet CIVE et changement de pratiques

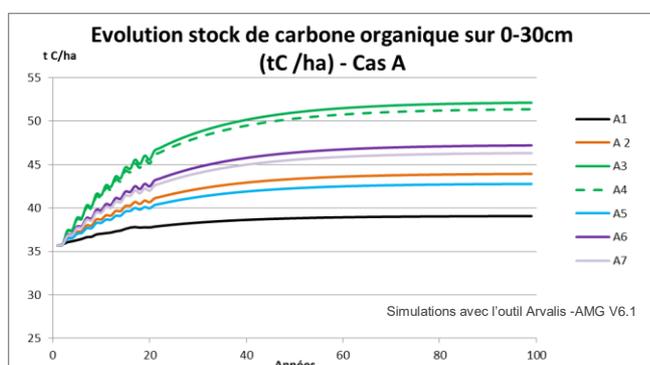


Figure 31 : Evolutions des stocks de carbone pendant 100 ans pour les simulations du cas A (Terrefort Moyen), Opticive, Simulation AMG V2

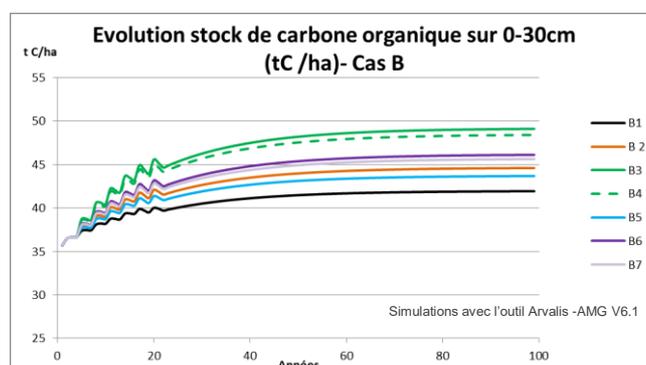


Figure 30 : Evolutions des stocks de carbone pendant 100 ans pour les simulations du cas B (Terrefort Moyen), Opticive, Simulation AMG V2

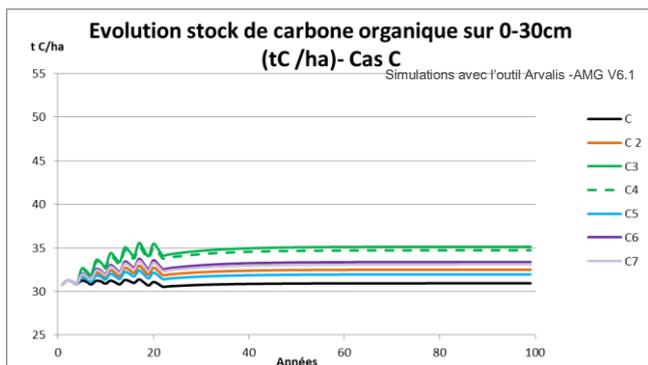


Figure 33 : Evolutions des stocks de carbone pendant 100 ans pour les simulations du cas C (Boulbènes), OPTICIVE, Simulation AMG V2

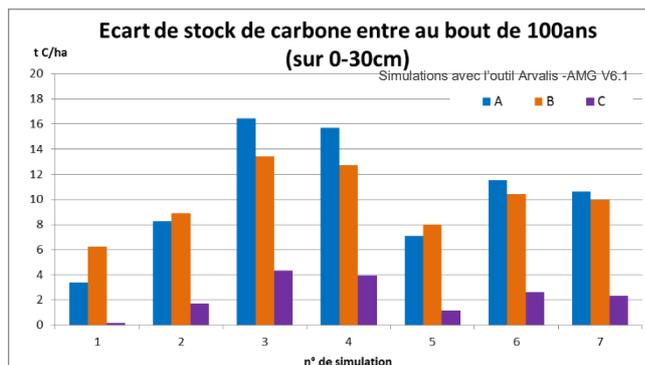


Figure 32 : Evolutions des stocks de carbone au bout de 100 ans pour les cas type OPTICIVE, Simulation AMG V2

Les classements de simulations sur le stockage du carbone sont les mêmes pour les 3 cas types (Figure 30, Figure 31, Figure 33), mais les niveaux de stockage sont différents. Les résultats sont donc à lire au regard du type de sol et de la rotation simulés.

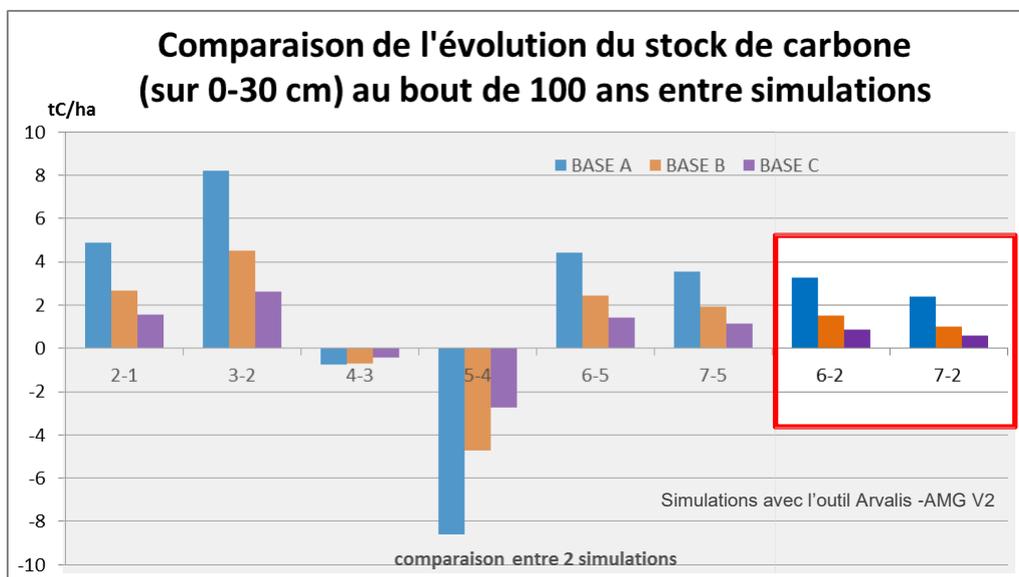


Figure 34 : Ecart entre 2 simulations de l'évolution du stock de carbone au bout de 100 ans, cas type OPTICIVE, Simulations avec l'outil Arvalis-AMG V6.1 ; Par exemple 2-1 représente la différence de stockage de carbone, au bout de 100ans, entre la simulation 2 et la simulation 1 pour chacun des 3 cas types.

Le Tableau 17 reprend les principales interprétations des changements de pratiques simulés.

La comparaison des pratiques sans CIVE (2) et avec CIVE (6 et 7) permettront d'évaluer l'effet réel de la présence d'une CIVE.

Tableau 17 : analyse comparative des simulations d'évolution des stocks de carbone organique avec CIVE ; modèle Arvalis-AMG V6.1 dans le cadre d'OPTICIVE

Simulations comparées	Question posée	Remarques
2-1	Rôle d'un couvert type CIPAN dans le stockage du carbone	La présence d'une CIPAN et le retour au sol des résidus permettent de stocker du carbone
3-2	Effet production d'une CIVE en comparaison de la CIPAN	Les CIVE enfouies, permettent de stocker plus de carbone que les CIPAN. En effet, leur production de biomasse est plus importante.
4-3	L'introduction d'une CIVE d'hiver pouvant impacter sur le rendement de la récolte suivante, on regarde l'effet éventuel sur le stockage du carbone	Si la CIVE entraîne une diminution de rendement de la culture suivante, le stockage du carbone en est légèrement impacté
5-4	Effet de l'exportation de la CIVE	Lorsque la CIVE est exportée, en comparaison au cas où elle est restituée, le potentiel de stockage du carbone diminue. Mais dans la pratique, les comparaisons se feront par rapport à une CIPAN enfouie.
6-5 et 7-5	Effet de l'intégration d'apports de digestats dans le système	Les digestats 1 et 2 donnent des résultats similaires. L'apport de digestat permet bien de stocker du carbone.
6-2 et 7-2	Comparaison entre l'état initial (CIPAN enfouie) et la rotation avec CIVE exportée et apport de digestats	Les tendances vont à l'augmentation des stocks quand on passe de l'état 2 à 6 (ou 7). L'exportation de la CIVE + apport du digestat n'entraîne pas une diminution du stockage du carbone par rapport à la pratique de restitution des CIPAN.

- ➔ La CIVE, bien qu'exportée, permet de stocker du carbone, du fait de la présence des racines et des chaumes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable., Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ;
- ➔ Sans apport de digestat, le stock de carbone après CIVE exportée est légèrement inférieur au stock avec une CIPAN enfouie (résultats intimement dépendants des rendements estimés pour les CIPAN et les CIVE) ;
- ➔ L'apport de digestat sur CIVE restitue du carbone au sol. Le système avec CIVE et digestat permet un stockage de carbone supérieur à la situation avec CIPAN enfouie (résultats intimement dépendants des rendements estimés pour les CIPAN et les CIVE).

4.3.3. Analyse dans des essais systèmes performants Syppre®

Les résultats de ces simulations montrent les mêmes tendances que ceux obtenus sur les essais systèmes Syppre® qui ont pu être étudiés dans le cadre du programme Solebiom (PIVERT). Ces essais système Syppre® ont pour objectif d'assurer une rentabilité équivalente ou supérieure aux systèmes témoin avec une amélioration de différents indicateurs de pression (IFT...) ou environnementaux (GES, efficacité énergétique...). Ces systèmes répondent à des problématiques de production, de qualité des productions dans une problématique environnementale majeure identifiée sur chacun des sites.

Dans le cas des coteaux argilo-calcaire du Sud-Ouest, un système témoin blé dur-tournesol est évalué face à un système sans labour, diversifié avec une rotation de 8 ans incluant 1 CIVE. L'objectif est de limiter les risques d'érosion en coteaux et d'améliorer la fertilité des sols via une couverture quasi permanente des sols et un travail du sol simplifié.

La diversification des productions, le retour de couverts et résidus de culture assurent un stockage supplémentaire de carbone qui reste toutefois inférieur à la minéralisation annuelle. L'ajout d'une CIVE permet alors de compenser cette minéralisation annuelle et de stocker plus de 0.8t de carbone en 30 ans (Figure 35).

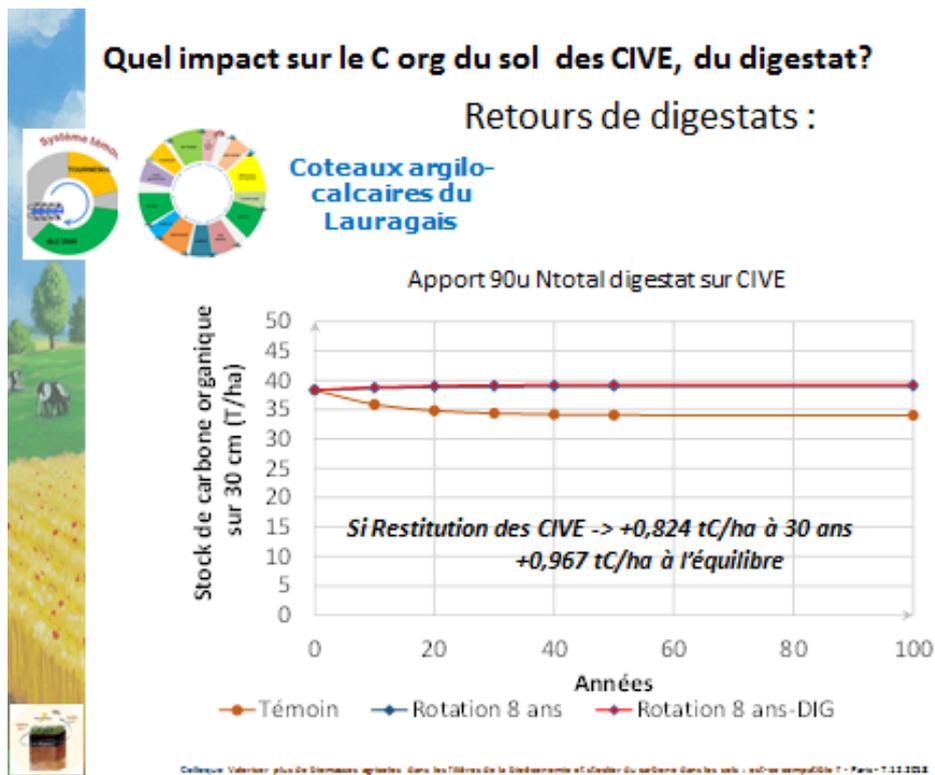


Figure 35 : Résultat des simulations d'évolution des stocks de carbone organique dans les systèmes étudiés sur la plateforme Syppre® coteaux argilo-calcaire du Lauragais, simulations réalisées sur la base des résultats OPTICIVE dans le cadre du programme Solebiom

Dans le Béarn, plusieurs alternatives sont étudiées en substitution à la monoculture de maïs face à des contraintes agronomiques et réglementaires.

Ce sont près de 10 t de stock de carbone supplémentaire en 30 ans permis par l'introduction de CIVE (Figure 36). D'autres successions de 3 ans diversifiées offrent des potentiels de stock quasi équivalents.

Le retour de digestat vient augmenter ces stocks à l'équilibre de 2 à 5 t de carbone selon les successions et stratégies d'apport (Colloque « Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bio économie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? 7/12/2018 Paris).

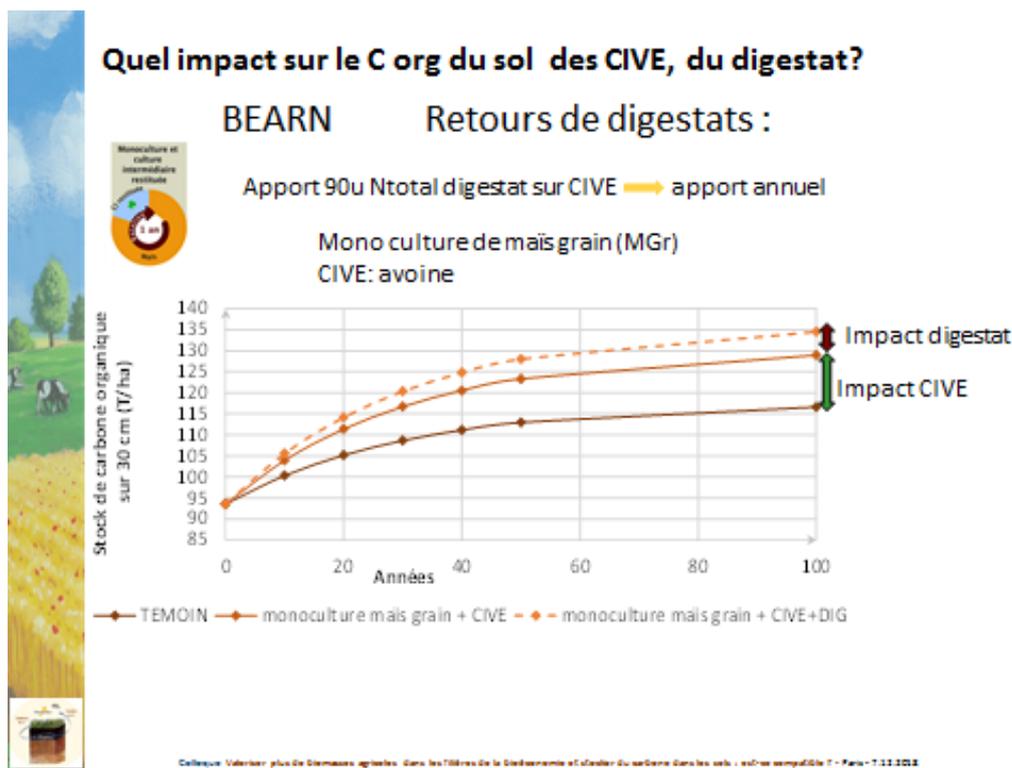


Figure 36 : Résultat des simulations d'évolution des stocks de carbone organique dans les systèmes étudiés sur la plateforme Syppre® Béarn, simulations réalisées sur la base des résultats OPTICIVE dans le cadre du programme Solebiom

4.4. Évaluation technique économique et environnementale des systèmes de culture et systèmes d'exploitation avec intégration de CIVE

4.4.1. Les méthodes

L'évaluation multicritère propose de caractériser les systèmes de culture testés et systèmes d'exploitation avec des indicateurs techniques (temps de travail, pression phytosanitaire, consommation de carburant...), économiques (produit brut, marges brute, nette, coûts de production...) et environnementaux (émissions GES, efficacité énergétique, stockage de carbone...).

Cette évaluation repose sur différentes hypothèses de conduite de culture, de matériels associés, de production. Elle peut être conduite à différentes étapes d'une chaîne de valeur : au champ, rendu site de valorisation et en sortie d'unité de méthanisation dans notre cas.

Une première étape de travail a permis de sélectionner quelques indicateurs d'intérêt pour chacune des catégories (Tableau 18).

Tableau 18 - Indicateurs technico-économiques et environnementaux retenus

Indicateurs de sortie SYSTERRE® retenus
Temps de travail (h/ha)
Coût de production(€/tMS)
Prix maximum d'achat pour un méthaniseur (€/tMS)
Prix d'intérêt (ou seuil minimum de vente) de CIVE (€/tMS)
Marge Nette hors aides (€/ha)
Energie brute produite (MJ/ha)
Gaz à Effet de Serre émis (kg éq CO ₂ /ha traduit en kg éq CO ₂ /kWh)

Ces indicateurs peuvent être calculés en sortie de parcelle ou rendu silo de stockage avec l'outil Systerre®.

Systerre® est un outil de calcul d'indicateurs conçu par ARVALIS - Institut du végétal, partagé avec d'autres instituts techniques. Il est destiné à évaluer les performances techniques, économiques et environnementales des productions végétales. L'évaluation se fait à l'échelle que souhaite l'utilisateur : parcelle, sol, système de culture ou exploitation. Les indicateurs restitués ne sont pas agrégés, permettant à l'utilisateur de gérer l'évaluation de ceux-ci. Le diagnostic réalisé ne prend pas en compte le stockage. Cet outil intègre de nombreuses bases de données de référence pour le calcul des différents indicateurs (poids des matériels, consommation unitaire d'énergie, produits phytosanitaires et doses homologuées...). Les méthodes de calcul sont référencées et conformes aux recommandations méthodologiques.

Le calcul du coût de production pose quelques interrogations méthodologiques. Le coût complet est l'indicateur qui traduit le coût d'une culture dans une logique de pérennité d'exploitation. D'autres coûts de type trésorerie incluront seulement les charges qui décaissent de la trésorerie, ne comptabilisant pas l'amortissement des matériels. Ces coûts traduisent plutôt des logiques de court terme. Le coût complet rémunère quant à lui l'ensemble des charges de production : intrants, mécanisation, main d'œuvre, autres charges d'exploitation dont une rémunération des capitaux et le foncier. La répartition des charges d'exploitation et de foncier peut être :

- Maintenu sur les cultures alimentaires historiques ;
- Ventilée sur chacune des cultures de la séquence : ventilation au nombre de cultures, à l'énergie potentielle ou au chiffre d'affaires.

Les deux coûts de production complet et hors charges fixes seront alors calculés. Ces coûts doivent toutefois intégrer les précédentes catégories de charges mais également les manques à gagner sur la culture suivante. La perte de rendement doit être affectée à la CIVE. D'autres économies de charges dues à des effets de changement de système pourraient également être comptabilisées à moyen terme.

Quant à la marge nette de la succession, elle doit être comparée à une succession de référence avec 2 cultures alimentaires. La somme des marges nettes des 2 cultures constitue cette référence. Ces marges nettes correspondent à :

$$\begin{aligned} \text{Marge nette } \left(\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right) \\ = \text{rendement} \left(t \text{ ou } \frac{tMS}{\text{ha}} \right) * \text{prix de vente} \left(\frac{\text{€}}{t} \text{ ou } \frac{\text{€}}{tMS} \right) - \text{intrants} - \text{mécanisation} \\ - \text{main d'oeuvre} - \text{foncier} - \text{autres charges d'exploitation} \end{aligned}$$

Dans le cas de séquences avec CIVE, 2 cas de figure sont envisageables :

- Vente de la CIVE à une unité de méthanisation ;
- Valorisation directe de la CIVE dans une unité à la ferme.

Dans le premier cas, la marge nette de la succession correspondra à la somme des marges nettes de chacune des 3 cultures. Dans le second cas, la vente d'énergie correspondant à la production de CIVE sera additionnée à la marge des 2 autres cultures alimentaires de la succession.

Les émissions de GES seront calculées pour chacune des opérations et exprimées au regard de l'énergie produite : g eq CO₂/kWh.

4.4.2. Les scénarii

Les systèmes de culture (Tableau 19) et scénarii de méthanisation (Tableau 20) retenus ont été discutés et co-construits en comité de pilotage élargi du programme avec agriculteurs, institutionnels, conseillers et constructeurs d'unités. A défaut de retour de constructeurs, les références de Méthasim® ont été utilisées. Ces références d'investissements ont été jugées un peu faibles. GrDF a alors transmis une seconde évaluation.

Tableau 19 : scénarii de contextes pédoclimatiques et de systèmes de culture retenus pour les simulations technico-économiques et environnementales OPTICIVE

Contexte	Succession	Culture Précédente	Culture Suivante
Béarn	BTH-CIVE hiver-Maïs	BTH : Aucune	Maïs : couvert hivernale + 1 labour + 2 vibroculteur → 1 Strip Till
	BTH-CIVE été-Maïs	BTH : Aucune	Maïs : Aucune
	OH-CIVE-BTH	OH : Soja dérobé remplacé par la CIVE	BTH : Aucune
	CIVE-Maïs-CIVE-Soja	Maïs : 1 labour + 3 passages vibroculteur → 1 Strip Till	Soja : 1 labour + 3 passages vibroculteur → 1 Strip Till
	CIVE-Maïs	Maïs : 2 passages vibroculteur + 1 labour → 1 Strip Till superficiel	
Vallée de Garonne	OH-Soja d-CIVE-Maïs	BTH remplacé par OH+Soja dérobé	Maïs : couvert hivernale + labour + vibroculteur → Strip Till
	CIVE-Soja-CIVE-Maïs	Soja : Labour + hersage → Strip Till	Maïs : couvert hivernale + labour + vibroculteur → Strip Till
	CIVE-Maïs	Maïs : labour + vibroculteur → Strip Till	
Lauragais	OH-CIVE-Sorgho	BDH remplacé par OH	Tournesol remplacé par Sorgho
	BDH-CIVE-Tournesol	BDH : Semis classique intégré → Semis Direct + 1 herbicide supplémentaire	Tournesol : 1 labour + 3 passages vibroculteur → 1 Strip Till

Tableau 20 : Cas type de méthanisation retenus de l'atelier de conception conduit dans le cadre d'OPTICIVE.

Cas méthanisation		Injection 1	Injection 2	Cogénération 1	Cogénération 2	Cogénération 3
Substrat (tMB)	CIVE	8 000	16 000	2 300	4 500	5 500
	Fumier bovin	4 000	4 000	2 000	2 000	11 000
	Biodéchets					1 833
Débits CH4 (Nm ³ .h ⁻¹)		69.8	134.9			
Puissance (kWe)		284	564	81	151	295
Coût investissement (k€)		2 064	3 777	777	1 184	2 166
MéthaSim, soit en €/kWe		7 268	6 697	9 593	7 841	7 342
Dépenses d'exploitation (hors épandage et CP) (k€)		291	406	58	86	151
Coût investissement (k€)		2 700	4 400	900	1 359	2 419
(source GrDF), soit en €/kWe		9 507	7 801	11 111	9 000	8 200

4.5. Résultats

4.5.1. Indicateurs économiques

4.5.1.1. Coût de production des ressources

Comme la productivité, les coûts de production complets des CIVE dans les contextes du Lauragais et du Béarn sont fortement variables : de 120 à 140 €/tMS pour des productions de 6 tMS/ha (

Tableau 21 ; Figure 37). L'impact de la productivité est bien sûr très fort avec des coûts de 70 à 110 €/tMS pour les productivités optimales de 7 à 12 tMS/ha selon les espèces et contextes et des coûts maximum de 160 €/tMS pour les productions minimales.

La prise en compte des charges fixes dans ce coût n'est également pas négligeable avec un enjeu de 30 à 50 €/tMS selon les contextes.

Tableau 21 : coûts de production complet et hors-charges fixes de différentes CIVE selon leur rendement et les contextes pédoclimatiques étudiés pour OPTICIVE

Contexte	Béarn						Lauragais						Béarn		
Succession	CIVE - Maïs						Blé dur - CIVE d'hiver - Tournesol						Blé Tendre d'hiver - CIVE d'été - Maïs		
Type de CIVE	Avoine			Avoine-Vesce			Avoine			Avoine-Vesce			Sorgho		
Rendement (t MS/ha)	6	7.5	9	5	7	8.5	5	6.5	7.5	5	6	7	6	9	12
Coût de production COMPLET (€/tMS)	139	112	93	156	112	92	160	123	107	150	125	107	144	96	72
Coût de production HORS CH FIXES (€/tMS)	87	69	58	93	66	55	105	80	70	94	78	67	94	63	47

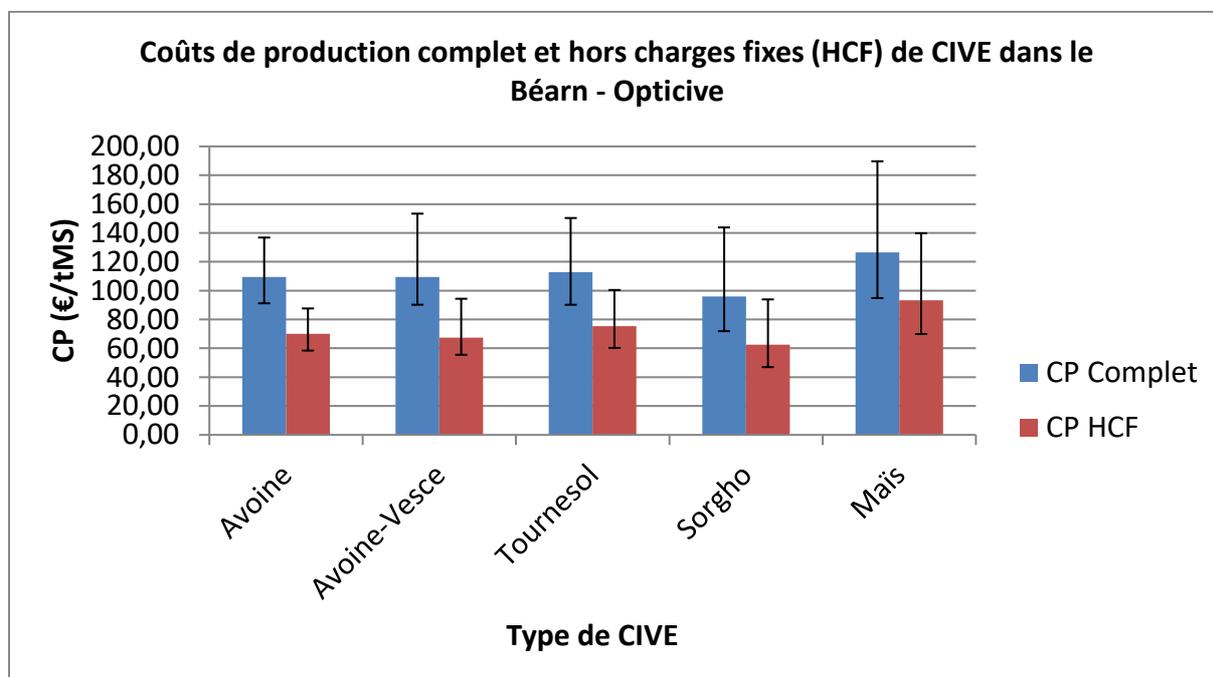


Figure 37 : coûts de production complet et hors-charges fixes de différentes CIVE dans le contexte d'une exploitation du Béarn, OPTICIVE

4.5.1.2. Coût de l'énergie produite

Le coût total de l'énergie produite, d'une unité de méthanisation (environ 15 000 t de substrat) qui injecte 135 Nm³.h⁻¹, atteint 118 €.MWh⁻¹ hors subvention à l'investissement (Figure 38), c'est le niveau de prix de rachat actuel de l'énergie fixé par l'Etat. Ce coût varie de 90 à 140 €.MWh⁻¹ en comptabilisant le coût complet de la ressource.

Ce coût est légèrement supérieur dans le cas d'une unité en injection avec un débit plus faible (de l'ordre de 70 Nm³.h⁻¹), cette variation s'expliquant par une économie d'échelle.

Dans les cas de cogénération, ce coût complet est supérieur au prix de rachat de l'énergie. Le complément de prix affecté aux CIVE en injection explique en partie ce résultat.

Ce coût est soumis à de nombreux autres facteurs de variation inhérents aux technologies. Ces coûts ont été évalués avec un rendement de 100% du BMP. Selon les technologies, la présence de post-digesteurs, ces rendements peuvent être de 80% seulement. Les rendements d'épuration du gaz ou de cogénération sont également très impactant sur ces coûts et la rentabilité des unités.

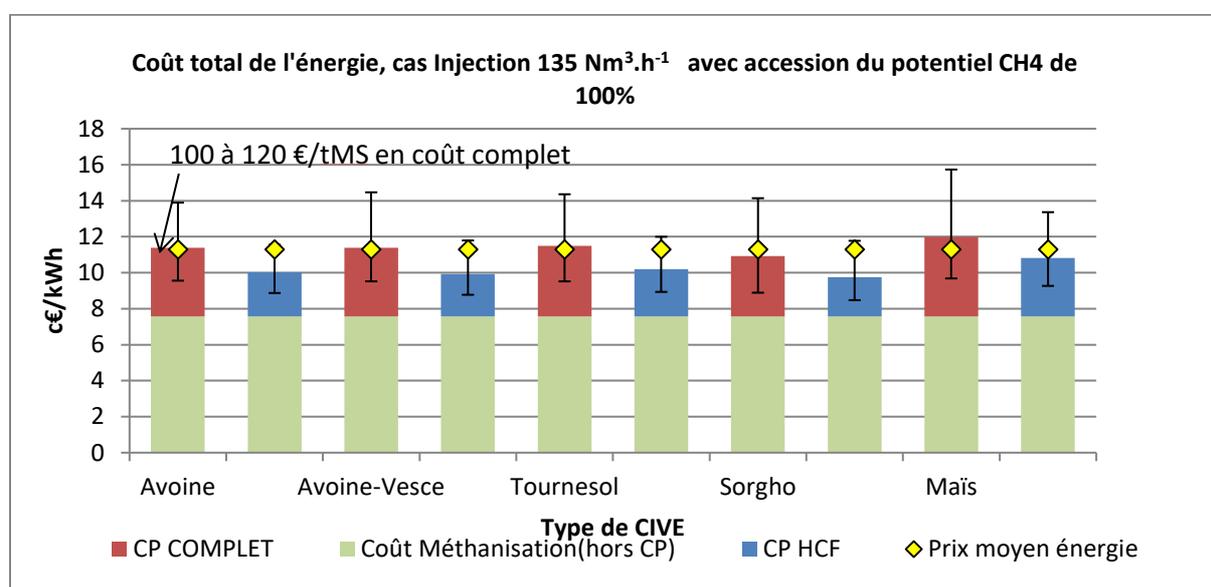


Figure 38 : Coût total de l'énergie produite, incluant coût de production de la CIVE et coût de fonctionnement d'une unité de méthanisation en injection (135 Nm³.h⁻¹)

4.5.1.3. Seuils de rentabilité

Trois indicateurs seuil peuvent être étudiés :

- Le prix maximum d'achat de la biomasse pour une unité de méthanisation ;
 - Le rendement seuil pour un agriculteur fournisseur d'une unité ;
- Le prix d'intérêt déterminé à partir du coût de production auquel sont retranchées une partie des aides.

Dans le premier cas, ce prix maximum d'achat est évalué pour atteindre l'équilibre entre les charges et les produits dont l'approvisionnement en CIVE de l'unité de méthanisation. Les charges liées à l'investissement (amortissements, frais financiers...) et une partie des charges de fonctionnement, énergie, main d'œuvre, réparations... sont déduites de la vente potentielle d'énergie. Un objectif de rentabilité interne de 8% a été pris en compte dans cet objectif de résultat. Le solde est alors ramené à la quantité de biomasse CIVE nécessaire pour atteindre l'énergie produite par le digesteur. Un rendement de 100% du BMP a été pris en compte pour cette simulation.

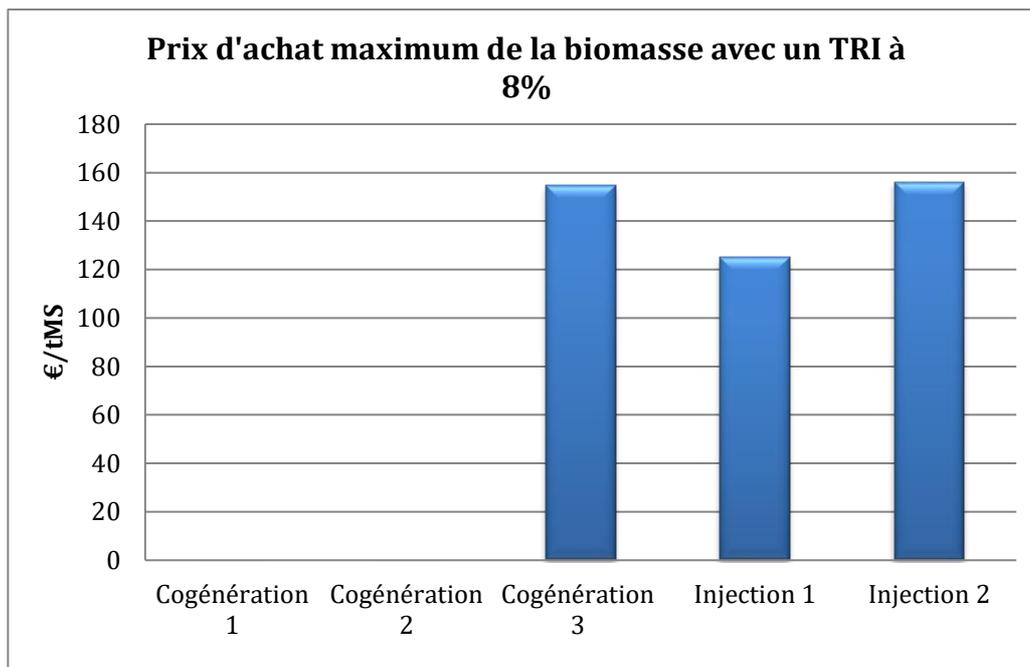


Figure 39 : Prix d'achat maximum de la biomasse pour les unités de méthanisation envisagées dans le programme OPTICIVE.

Ce prix maximum d'achat du point de vue d'un exploitant d'unité de méthanisation est extrêmement variable selon le type de valorisation du biogaz et les co-substrats. Pour les unités de cogénération 1 et 2, la capacité d'achat est nulle (Figure 39). La rémunération d'intrants extérieurs malgré leur potentiel méthanogène ne serait pas envisageable avec nos hypothèses.

Pour un cas de cogénération de moyenne puissance avec digestion de substrats entrants avec indemnisation, cette capacité d'achat est déplafonnée à près de 150 €/tMS avec les hypothèses prises en compte.

Enfin dans les 2 cas d'injection dans les réseaux de gaz, ce prix atteint les 120 à 160 €/tMS selon la puissance (Figure 39). Le complément de prix pour la valorisation de CIVE explique en grande partie ces différences d'opportunité de valorisation.

Pour le cas d'un agriculteur qui approvisionnerait un digesteur proche, le prix proposé par l'unité de méthanisation lui permettrait de déterminer un seuil de rendement pour équilibrer les charges de cette culture.

Pour un prix de 125 €/tMS ou 25 €/tMB environ (Figure 40), il est nécessaire de mobiliser 6 tMS/ha pour équilibrer l'intégralité des charges sur la CIVE, dont une partie des charges fixes. Si ces charges fixes restent rémunérées par les cultures alimentaires ce rendement seuil est réduit de 2 tMS/ha pour ce même niveau de prix. Pour des prix de biomasse inférieurs, ces rendements seuils seront forcément supérieurs, près de 8 tMS/ha pour un prix de 17 €/tMB.

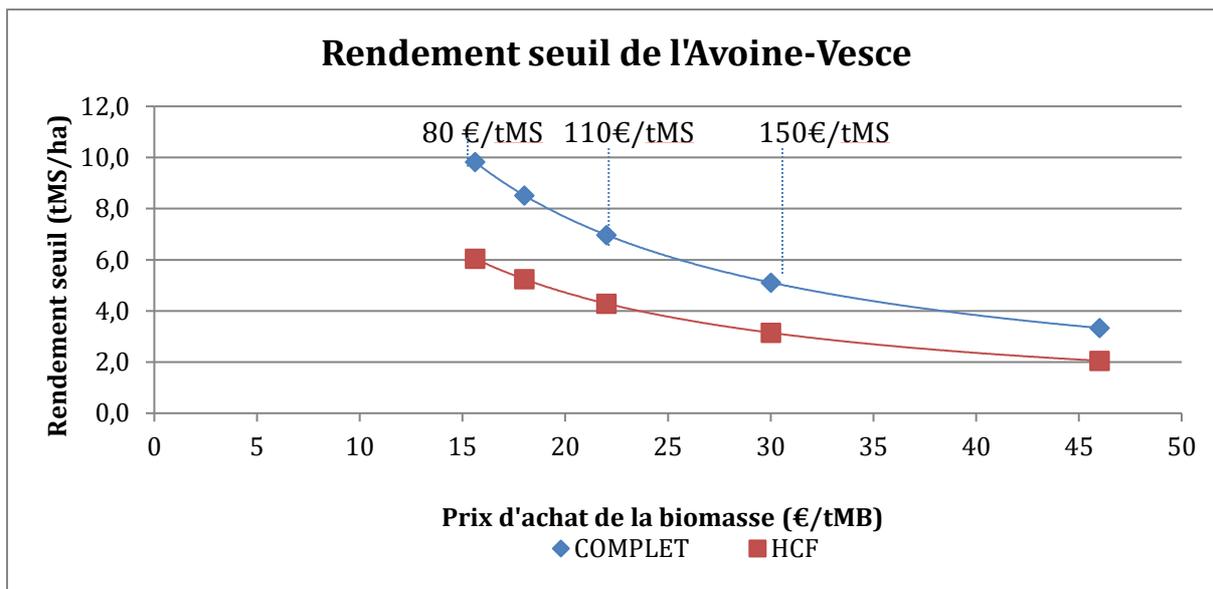


Figure 40 : seuils de rendement de CIVE selon le prix d'achat de ces ressources, OPTICIVE

4.5.1.4. Impact de l'adaptation de systèmes sur la rentabilité des systèmes d'exploitation

Amélioration du revenu des exploitations ?

4.5.2. Indicateurs techniques et environnementaux des successions de culture

Si les indicateurs économiques sont primordiaux dans la caractérisation d'un système de culture et/ou d'exploitation intégrant des CIVE, les indicateurs techniques et environnementaux présentent quant à eux autant d'enjeux de durabilité (temps de travail, besoin en main d'œuvre) et d'opportunités de rémunération d'externalités positives (émissions de GES, stockage de carbone, réduction de la pression phytosanitaire) à prendre en compte dans l'évaluation de ce système.

4.5.2.1. Impact de l'adaptation de systèmes de cultures sur le temps de travail à la parcelle

L'introduction de la CIVE dans un système de culture existant modifie nécessairement les interventions techniques effectuées et parfois même la succession culturale réalisée (adaptation du calendrier cultural, des espèces cultivées, etc.). De ce fait, elle modifie également le temps de travail passé à la parcelle, qu'il est possible de comparer avec une situation initiale sans CIVE.

En calculant le différentiel de temps de travail à la parcelle ($h \cdot ha^{-1}$) de différents systèmes de culture (Figure 41), le temps de travail global consacré à une parcelle peut être revu à la baisse ou à la hausse.

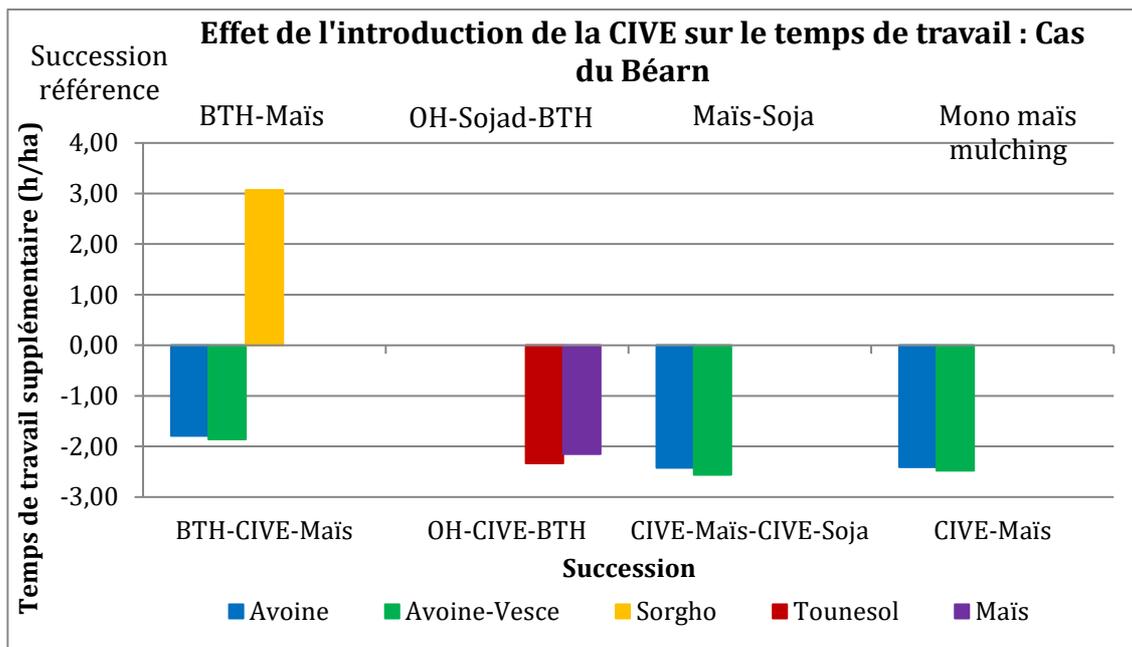


Figure 41 : Effet de l'introduction de la CIVE sur le temps de travail par comparaison avec une situation initiale sans CIVE

L'adaptation des systèmes de culture avec interculture valorisée peut être source de temps de travail supplémentaire. Toutefois, l'adaptation possible, voire essentielle, des techniques d'implantation est une voie d'économie de temps sur la parcelle, notamment via les techniques d'implantation simplifiées (au regard de systèmes sous labour), économisant de 2 à 4 h.ha⁻¹ sur l'ensemble de la séquence de cultures. La protection des plantes, de CIVE notamment, peut être un autre facteur de temps de travail supplémentaire. La protection de ces CIVE est souvent minime ou inexistante et vient traiter une problématique qui ne pourra plus être traitée sur les autres cultures de la succession. L'enjeu en termes de temps potentiel reste donc restreint pour ce poste. La récolte est en revanche chronophage en termes d'organisation. Mais le recours à l'entraide ou à une entreprise est fréquemment indispensable.

4.5.2.2. Impact de la mobilisation de biomasse sur le besoin en main d'œuvre d'une unité de méthanisation

L'impact de la mobilisation de CIVE dans une unité de méthanisation est également chiffré en termes de temps de travail et besoins en UTH (Figure 42) : elle générera un besoin en main d'œuvre de l'ordre de de 0.25 à 0.8 UTH selon la taille de l'unité.

A taille d'unité égale, des variations peuvent également être observées selon le type d'unité de méthanisation (cas de la Cogénération 3 et Injection 1), les volumes de digestat traités variant du fait des différences de mécanismes de traitement du substrat.

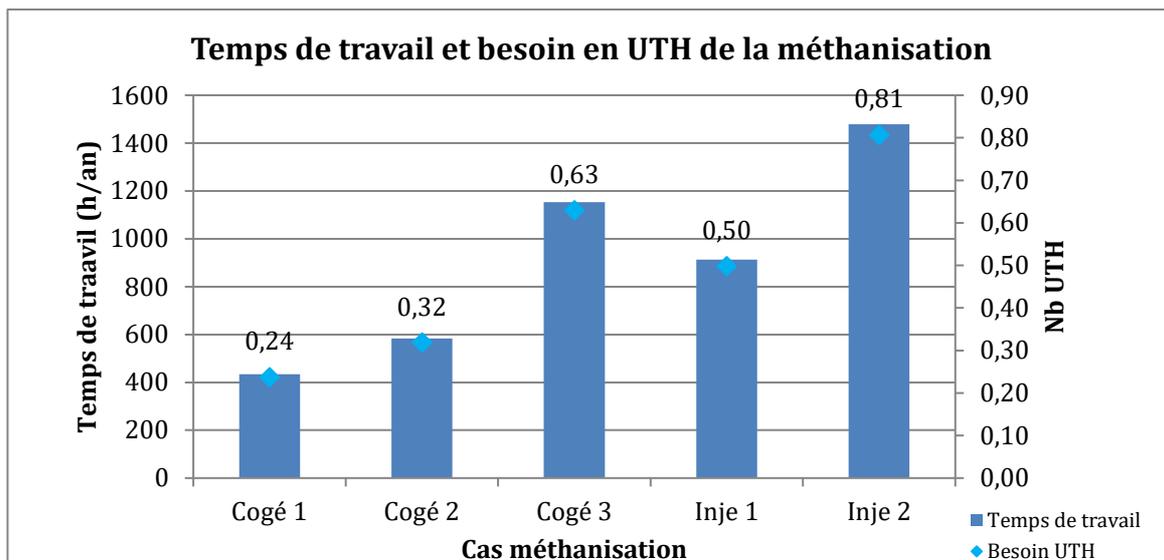


Figure 42 : Evaluation du temps de travail et besoin en UTH de la méthanisation selon les différents cas type de méthanisation

4.5.2.3. Bilan des gaz à effet de serre produits ou économisés à l'échelle du système de culture et/ou d'exploitation

L'efficacité énergétique des systèmes de culture intégrant des CIVE est systématiquement améliorée par rapport à des séquences de référence sans CIVE (Figure 43). La diminution globale des émissions de GES peut être expliquée par la réduction du nombre de passages mécaniques dans une parcelle à l'échelle de la succession de cultures.

La méthanisation permet également de compenser les émissions de la succession produisant la biomasse. L'acheminement des CIVE vers l'unité de méthanisation émet des GES, qui peuvent être compensés par l'énergie produite en sortie de méthaniseur, permettant d'économiser en moyenne 100 gCO₂.kWh⁻¹ pour des unités de méthanisation en cogénération.

La méthanisation est une voie d'économie d'émissions aussi par substitution d'énergie fossile. Le bilan global est toutefois dépendant des stratégies et des distances d'approvisionnement (Figure 43) qui peuvent pénaliser ce bilan (notamment sur les hypothèses de transport considérées en injection).

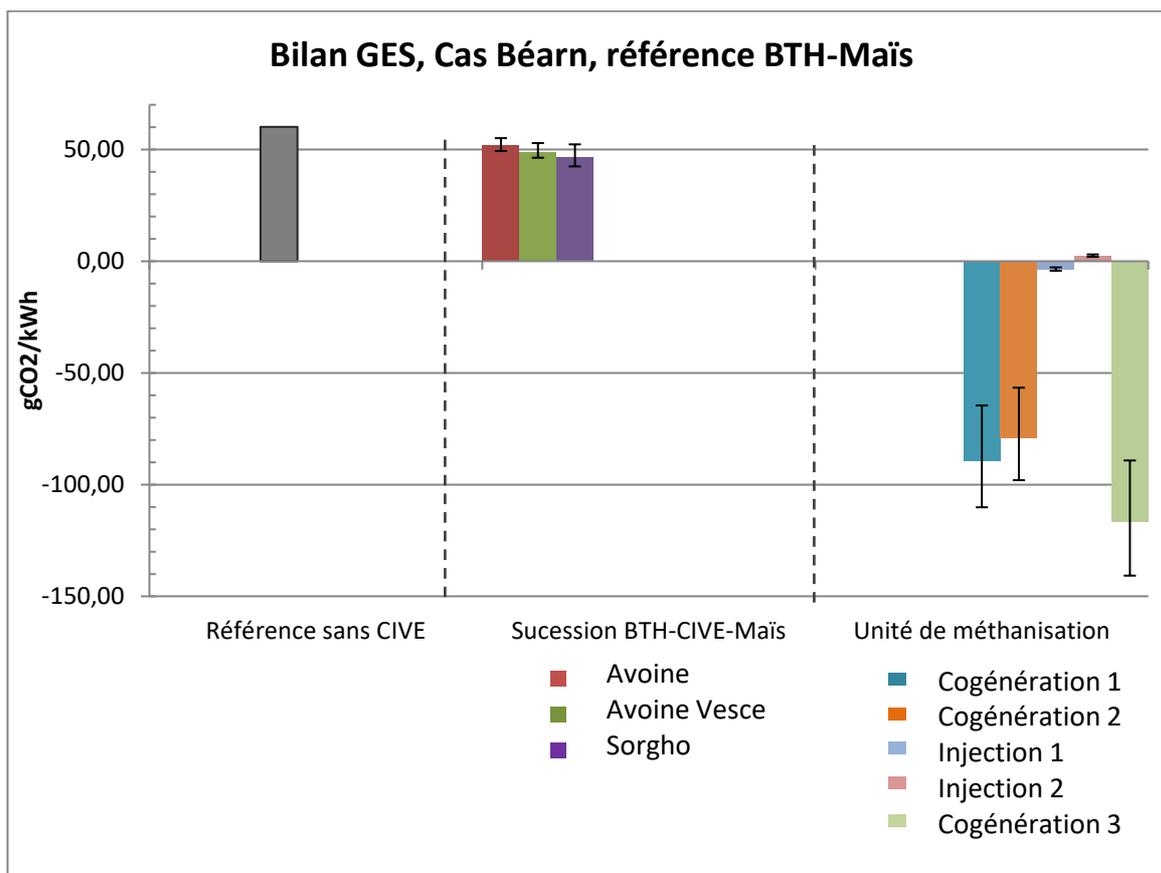


Figure 43 : Bilan des gaz à effet de serre produits ou économisés à l'échelle du système de culture et/ou d'exploitation

5. Transfert

5.1. Communication

La communication autour du projet a été structurée en différentes étapes.

Une première communication a été réalisée lors des Journées Recherche Industrie (JRI) Biogaz Méthanisation de 2016 sous format de poster. Cette communication avait pour objectif d'informer sur le contenu et les méthodes de travail.

La communication s'est ensuite élargie via les comités de pilotage élargis qui ont réuni dès décembre 2016 :

- le MAA ;
- l'AAMF ;
- Le Club Biogaz ;
- AILE ;
- GrDF
- Le RMT Biomasse et territoire.

Ces comités ont là encore permis de partager les travaux en cours et méthodes mises en œuvre voire même de compléter ou adapter les protocoles d'observation. Deux autres comités, les 23 Novembre 2017 et 15 Juin 2018 ont réuni ces acteurs afin de partager les résultats et de co-construire les hypothèses de travail pour les évaluations technico-économiques et environnementales. Ces acteurs ont ensuite pu assurer une partie du transfert d'information vers leurs structures, adhérents et partenaires.

A partir du second semestre 2018, les résultats ont alors été plus largement communiqués via :

- des conférences : deux présentations ont pu être assurées lors des JRI 2018. Une autre présentation orale ainsi qu'un article seront également présentés en mai 2019 lors de la Conférence Européenne sur la Biomasse.
- articles dans la presse spécialisée agricole : Perspectives agricoles, Cultivar, Réussir
- journées thématiques et interventions diverses. Les équipes du GIE GAO ont pu répondre à différentes demandes (ADEME, régions, organismes économiques...) en région pour des journées autour du changement climatique, des schémas régionaux biomasse, ou autour de la méthanisation : Bourgogne Franche Comté ; Nouvelle Aquitaine ; Occitanie ; Auvergne Rhône Alpes. D'autres interventions ont été également effectuées sur demande : Groupe GrDF – WWF, Club Biogaz...
- ateliers régionaux. Six journées ont été co-organisées avec GrDF entre novembre 2018 et avril 2019 avec l'objectif de diffuser les résultats, d'identifier les travaux et pratiques en cours en région et de capter les besoins supplémentaires en accompagnement. Ces journées ont rassemblé plus de 80 agriculteurs et de nombreux partenaires économiques et institutionnels.
- Réseau thématique européen PANACEA. Le réseau thématique H2020 PANACEA a pour objectif de capitaliser les expériences et références sur les ressources en biomasse non alimentaires, mais aussi de capter les attentes des producteurs et transformateurs en vue d'identifier les voies de développement de la bioéconomie. Les travaux OPTICIVE ont alors été portés à la connaissance des partenaires du réseau. Cette thématique de l'adaptation des systèmes de culture et de la mobilisation de bioressources est en effet émergente dans différents pays.

5.2. Formation

Plusieurs séquences de formation ont été construites puis proposées et dispensées au cours du projet.

Ces séquences de formation s'organisent autour de

- La définition des CIVE ;
- Les recommandations techniques ;
- La conception de séquences de cultures à partir des recommandations techniques
- L'évaluation des systèmes notamment avec les méthodologies d'évaluation des coûts.

Une première formation a pu être réalisée dans le Béarn dans le cadre du programme Méthaqion. Cette formation a ensuite été reproduite et adaptée sous forme de conception d'un programme expérimental régional avec Vienne AgriMétha.

Trois autres formations ont ensuite été réalisées à partir des propositions du catalogue ARVALIS.

Ces séquences ont également été introduites et adaptées dans la formation proposée en inter-instituts dans le cadre de Métha5 : ARVALIS, Terres Inovia, IFIP, IDELE, ITAVI. Trois séances ont alors pu être réalisées au cours du projet.

6. Extrapolation des résultats

Suite à la diffusion des premiers résultats de nombreuses questions sont remontées de la part des agriculteurs et conseillers sur l'utilisation des résultats OPTICIVE dans leur propre contexte pédoclimatique. L'extrapolation des résultats à d'autres régions que celles travaillées en expérimentation s'avérait essentielle pour les producteurs comme pour l'Ademe. Un travail préliminaire a alors été conduit en 2018.

6.1. Méthode

La modélisation est un processus particulièrement adapté pour cette extrapolation. Les modèles de culture exigent toutefois un paramétrage très fin de nombreux éléments physiologiques, météorologiques et pédologiques. Grâce à leur instrumentation, les essais conduits dans le cadre d'OPTICIVE, sur deux contextes pédoclimatiques très distincts, ont permis d'acquérir une partie de ces références sur la production, la consommation en eau et éléments minéraux.

Les modèles reproduisent le fonctionnement d'une culture et de ses facteurs de production. Différents modèles sont disponibles. Le RMT ERYTAGE a comparé différents modèles comme STICS® (Brisson et al. 1998), PERSYST® (Guichard, Bockstaller et al., 2010) et CHN (Soenen et al. 2018). CHN, développé par Arvalis a été retenu pour simuler ces potentiels en fréquentiel ce que ne permettait

pas PERSYST® sur nos zones d'étude. STICS® était quant à lui un modèle abouti avec un plus grand nombre de cultures paramétrées mais certainement trop complexe d'utilisation pour ces premiers travaux d'extrapolation.

CHN simule comme STICS® les flux de carbone, d'eau et d'azote entre la plante, son substrat et l'atmosphère. Il prend en compte le travail du sol, le précédent et la culture intermédiaire et il est également possible de modifier les caractéristiques phénotypiques de la culture simulée.

Aucune CIVE n'étant paramétrée dans l'outil CHN, une première étape de travail a permis de comparer les résultats mesurés en expérimentations sur des CIVE d'hiver (de type céréales) aux résultats simulés avec le modèle d'une culture proche comme le blé tendre. Il en a été de même pour des CIVE d'été avec la comparaison de mesures sur sorgho et maïs CIVE aux résultats simulés avec un modèle maïs.

Après validation de cette possibilité de simulation par des cultures proches, nous avons cherché à simuler des potentiels de CIVE dans 6 régions types (Tableau 22) pour des cultures d'hiver et d'été. Ces simulations ont été faites sur les 15 dernières années climatiques afin de simuler la variabilité potentielle de production.

Tableau 22 : Récapitulatif des conditions climatiques et pédologiques des simulations sur CHN pour quelques situations types OPTICIVE

Région	Code sol CHN	Description	Code météo CHN	Station météo
Champagne Ardenne	LO0036001	limon argileux profond.	5543	Septsangres
Bretagne	BR0063001	limons peu profonds peu hydromorphe	2220	Ploërmel
Poitou Charente	PC5533002	groie profonde	1756	Saintes
Lauragais	LO0036001	Terrefort moyen	3190	En Crambade
Aquitaine	AQ00665_0014	Touya	6402	Pau-Uzein
Centre	CE0036002	Sol limono-argileux profond sur calcaire dur	2863	Chateaudun

6.2. Premières pistes d'extrapolation

6.2.1. CIVE d'hiver

La comparaison des rendements simulés des CIVE d'hiver (espèces pures de graminées) et calculés avec le modèle blé tendre de CHN (Figure 44, Figure 45) confirme l'intérêt d'utiliser a minima ce modèle pour l'extrapolation des résultats de production. La corrélation est en effet satisfaisante particulièrement pour l'avoine. La caractérisation des sites d'essais est en effet très bonne pour les deux sites Syppre® alors que quelques incertitudes de profondeur de sol de réserve utile sont probables sur les autres sites. Pour d'autres indicateurs comme l'état hydrique et azoté du sol, ces comparaisons sont moins satisfaisantes. Un meilleur paramétrage des conditions pédoclimatiques et des cultures serait certainement nécessaire.

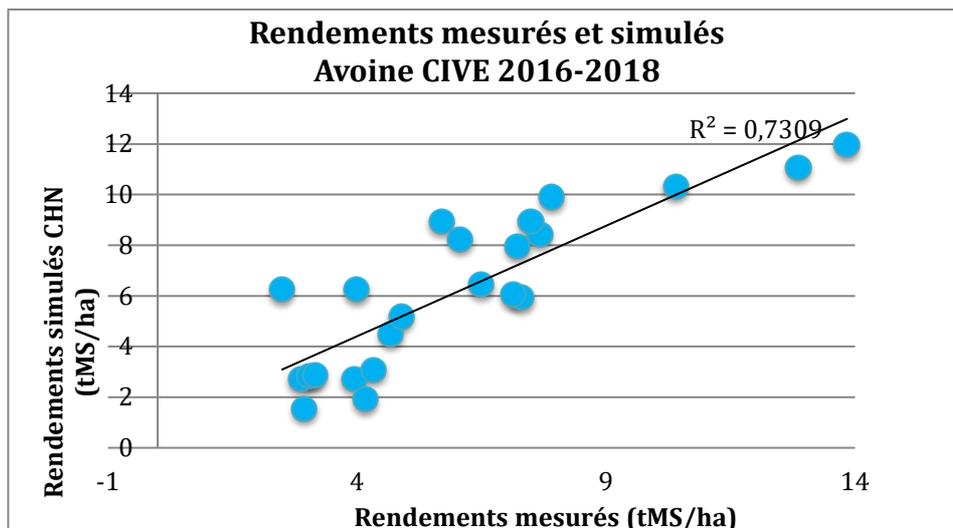


Figure 44 : comparaison des rendements mesurés et simulés par le modèle CHN Blé tendre d'avoine conduite en CIVE d'hiver en 2016, 2017 et 2018 dans le cadre d'OPTICIVE.

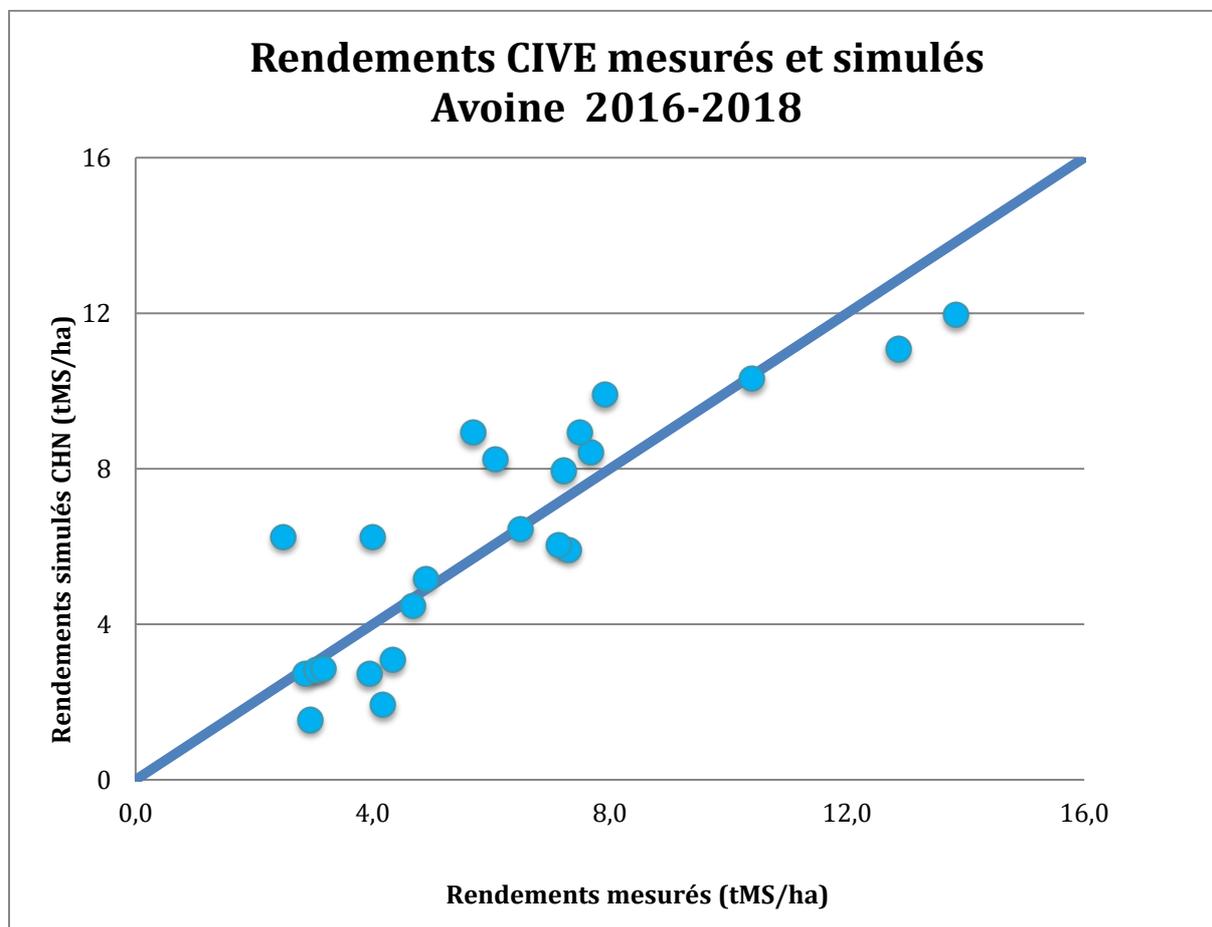


Figure 45 : comparaison des rendements mesurés de CIVE d'hiver et simulés par le modèle CHN Blé tendre en 2016, 2017 et 2018, CIVE hiver en espèces de graminées pures (avoine, orge, triticale, seigle) dans le cadre d'OPTICIVE

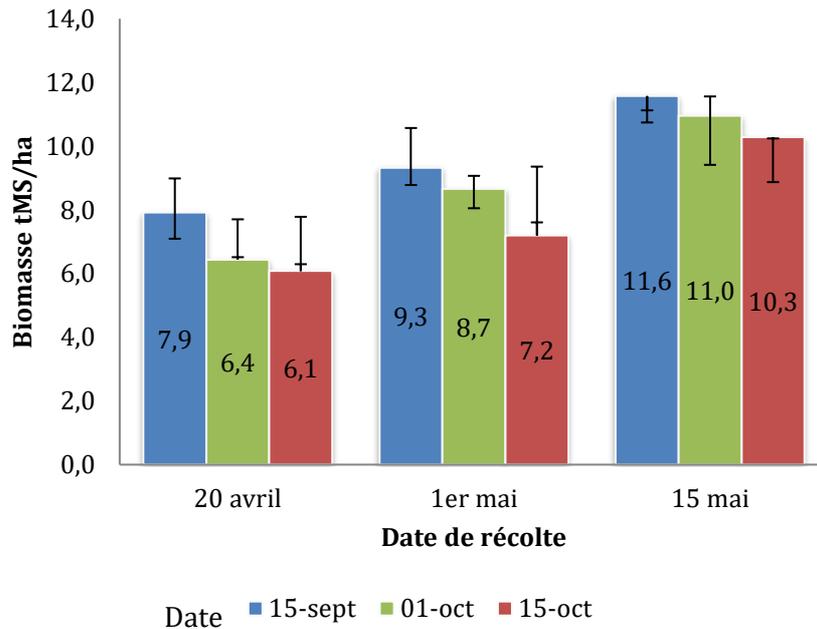


Figure 46 :Potentiels biomasse de CIVE d’hiver de type graminées pour différentes dates de semis et de récolte simulées dans le cadre d’OPTICIVE avec le modèle CHN blé tendre dans le contexte du Lauragais.

L’utilisation de ce modèle permet toutefois de conforter les premières recommandations techniques sur le semis des CIVE d’hiver. La Figure 46 illustre la perte de rendement pour des semis plus tardifs (différence entre le 15 septembre et le 15 octobre). Ces résultats traduisent aussi le besoin de compromis sur la date de récolte avec des potentiels biomasse plus intéressants en récolte tardive (1 ou 15 mai). Ce sont près de 2 tMS/ha cumulables en 15 jours sur ces créneaux de cycle.

Les simulations effectuées sur les autres bassins de production (Figure 47) montrent des potentiels de près de 8tMS/ha en année médiane mais il faut rappeler que ce modèle simule un potentiel de rendement dit biologique à raz de sol, non atteignable techniquement avec les matériels de récolte. La part de chaumes a un impact non négligeable sur le rendement récoltable (Cf. 4.1). Le rendement récoltable serait donc de près de 6tMS/ha dans une majorité de régions françaises avec des variabilités non négligeables : 2 tMS/ha environ.

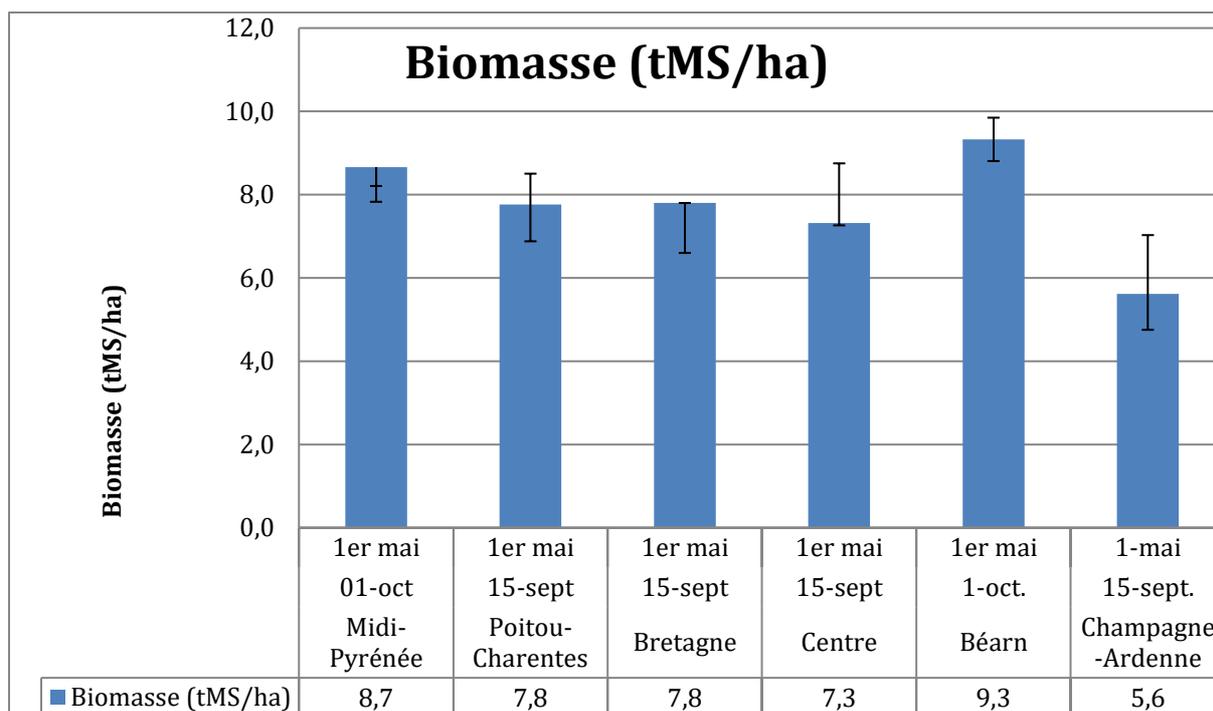


Figure 47 : Potentiels biomasse de CIVE d'hiver de type graminées par grand contexte pédo-climatique pour une date de semis et de récolte. Simulations réalisées dans le cadre d'OPTICIVE avec le modèle CHN blé tendre.

6.2.2. CIVE d'été

Le modèle CHN étant uniquement paramétré pour la culture de maïs en culture d'été, il n'est pas possible d'envisager de simulations sur toutes les espèces de CIVE d'été, notamment, tournesol, moha, millet...

D'autres critères de simulation sont également essentiels pour ces espèces. Il s'agit notamment de l'état hydrique du sol à l'implantation, et de l'alimentation hydrique estivale : conduite pluviale ou irriguée.

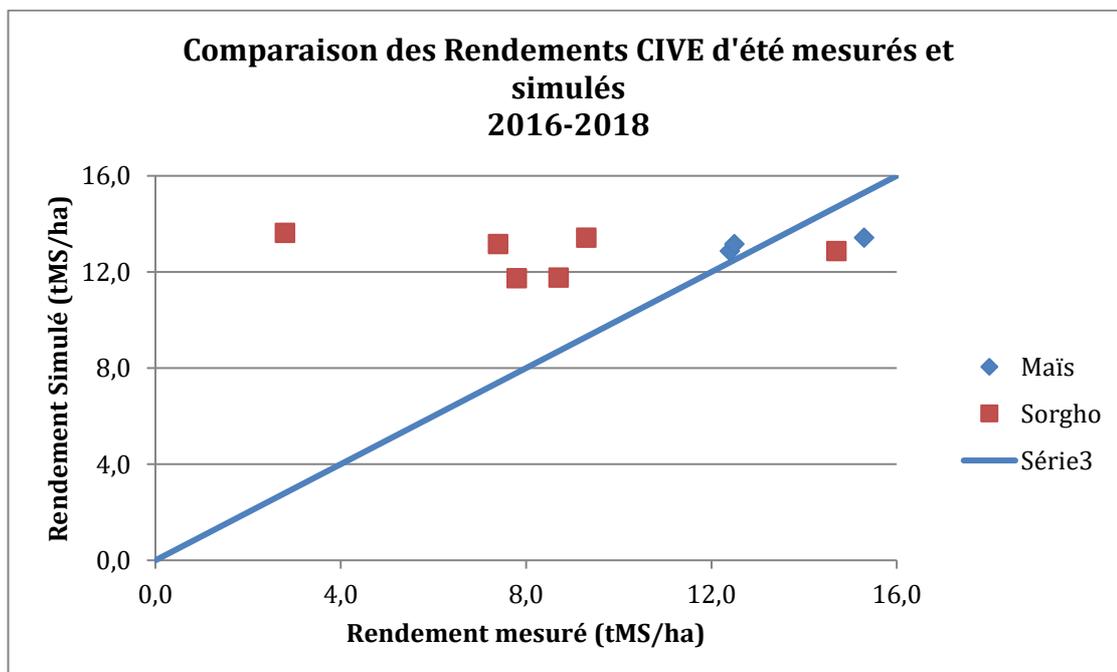


Figure 48 : comparaison des rendements mesurés de CIVE d'été et simulés par le modèle CHN maïs en 2016, 2017 et 2018, CIVE d'été de sorgho et maïs dans le cadre d'OPTICIVE

Pour du maïs conduit en CIVE d'été, les simulations réalisées semblent correctes (Figure 48) mais restent à relativiser avec le faible nombre de données utilisées. En revanche pour le sorgho, les simulations ont tendance à surévaluer le rendement des CIVE. Le mode de conduite de ce sorgho CIVE en termes de densité de plantes ou d'écartement entre rangs pourrait être une des justifications à cet écart. Un paramétrage et validation supplémentaire s'avèrent nécessaires pour utiliser ce type d'outil sur ces cultures.

En revanche, les simulations de dates de récolte d'un précédent CIVE d'été de type orge d'hiver (avec le modèle CHN Orge) ont permis de valider les dates de semis potentielles début juillet pour les grands contextes simulés.

7. Recommandations et perspectives

L'analyse pluriannuelle des résultats d'expérimentation marque l'intérêt de la modélisation pour mieux structurer l'assolement des exploitations et sécuriser l'approvisionnement en CIVE des méthaniseurs.

7.1. Limites

Mais les premières modélisations révèlent toutefois le besoin d'améliorer le paramétrage des modèles (CHN) notamment pour des espèces peu référencées et au cycle de développement différent du blé tendre pour les CIVE d'hiver : seigle, avoine avec des croissances hivernales plus ou moins prononcées et une montaison accélérée. De nombreuses autres espèces gagneraient à être modélisées dans l'objectif de mobiliser des couverts multiservices. C'est notamment le cas pour les CIVE d'été afin de mieux apprécier l'impact des stress hydrique ou divers oléoprotéagineux d'intérêt : cameline, lupin...

Cette modélisation s'appuie sur l'acquisition de références sur des séquences de culture pluriannuelles, soumises à de nombreuses contraintes matérielles et météorologiques. Le nombre de séquences potentiellement testées est vite restreint sur des programmes de recherche de 3 ans. Les références d'une séquence peuvent être rapidement perdues avec les risques météorologiques plus forts ces dernières années. Ces systèmes doivent ainsi être travaillés sur des dispositifs pluriannuels. Ce type d'essai permet également d'étudier l'effet à moyen terme de ces modifications de systèmes : impact sur la pression adventice, la portance des sols... C'est ce que proposent les plateformes Syppre®. Ces observations à moyen terme gagneront alors à être valorisées pour de futures recommandations et améliorations des évaluations.

Les indicateurs techniques, économiques et environnementaux qui ont pu être calculés sont intimement dépendants de ces hypothèses. Ces évaluations devront alors être précisées avec le retour des évolutions de systèmes à plus long terme. Mais cette analyse à l'échelle du système d'exploitation complet, incluant les autres ateliers d'une exploitation agricole et une unité de méthanisation sont également dépendants des hypothèses économiques considérées pour ces unités. Sans pouvoir bénéficier d'un chiffrage plus particulier par des constructeurs pour les unités type co-construites, les deux jeux d'hypothèses que nous avons pu considérer démontrent des différences notables qui impactent significativement les seuils de rentabilité présentés. Ces chiffrements gagneraient alors à être réalisés sur des unités de méthanisation réelles récemment mises en production.

Face à ces quelques facteurs d'incertitude et aux premiers retours des agriculteurs et conseillers après diffusion de résultats, trois grands types de recommandations peuvent être apportées :

- Poursuivre l'acquisition de références en vue de régionaliser les recommandations et s'adapter plus précisément aux contextes pédoclimatiques et spécificités des systèmes de culture ;
- Communiquer largement ces premières recommandations et résultats technico-économiques pour aider à structurer les changements de systèmes, à mieux évaluer la valeur de leurs ressources ;
- Structurer les travaux conduits à l'heure actuelle sur ces systèmes de 3 cultures en 2 ans pour capitaliser les expériences et partager les méthodologies d'évaluation.

Chacune de ces perspectives est plus largement détaillée ci-dessous.

7.2. Le besoin en références complémentaires

La forte variabilité interannuelle de production doit structurer les axes de recherche à venir. Cette variabilité impacte non seulement le coût des ressources mais également la logistique de stockage sur les unités de méthanisation comme la structuration des assolements et systèmes de culture. Même si les recommandations techniques délivrées avec OPTICIVE constituent des premiers éléments de maîtrise de cette variabilité, l'analyse des facteurs de variation et le retour d'agriculteurs rencontrés lors de la diffusion des résultats permettent de préciser quelques axes de travail ci-dessous.

Pour les CIVE d'hiver, les espèces de céréales potentiellement associées à des légumineuses constituent le compromis optimal en termes de production. Ces espèces de céréales présentent toutefois un potentiel de repousse dans la culture suivante difficilement contrôlable sans travail du sol ou pharmacopée réduite. D'autres espèces comme les brassicacées ou le lupin présentent un intérêt (CIBIOM - (Marsac et al. 2015) et sont travaillées ((Berti et al. 2017; Zanetti, Monti, et Berti 2013) pour leur intérêt en termes de réduction de la pression adventice et de leur effet d'allélopathie. Le panel d'espèces candidates mérite ainsi d'être ouvert afin de proposer une liste de cultures intermédiaires avec un large spectre de services selon les successions culturales. La diversification des espèces conduites en intercultures sera nécessaire à l'adaptation des systèmes et au développement de l'agroécologie.

Au-delà des espèces, les observations réalisées sur l'avoine dans les essais OPTICIVE ont montré les fortes différences de comportement entre variétés. La recherche d'un panel d'espèces devra alors s'accompagner d'un choix variétal pour les espèces qui bénéficient d'un plus large progrès génétique. Les besoins en semis et récolte précoces exigent en effet la mise en place de géotypes précoces et donc peu sensibles au froid pour des montaisons précoces. L'activité de création variétale adaptée à ces séquences de culture gagnerait également à être développée ou organisée. La physiologie de différentes espèces gagnerait aussi à être mieux caractérisée afin d'améliorer les préconisations selon les contextes pédoclimatiques. Par exemple, les différences de comportement entre seigles dits fourragers ou forestiers, entre avoine brésiliennes, diploïdes, rudes sont peu connues. Leur rythme de développement, tolérance climatique et effets allélopathiques parfois noté par les agriculteurs devra être approfondi.

Pour les CIVE d'hiver, comme pour les CIVE d'été, les dates de semis sont un facteur essentiel de production. Des premières pistes ont été travaillées dans OPTICIVE, mais les techniques de culture innovantes sont à développer comme le semis dans la culture précédente et semis sous couvert. Ces techniques ont pour objectif de profiter de pluviométries ou fraîcheur du sol pour les CIVE d'été et de garantir une implantation précoce de la CIVE d'hiver dans des cultures alimentaires récoltées tard à l'automne : maïs, soja, tournesol... Ces techniques sont aussi sources de réduction du travail du sol et d'économies potentielles de carburant.

Ces techniques de culture devront être travaillées en parallèle du choix des espèces de CIVE mentionné précédemment. La taille des graines et positionnement en surface du sol seront certainement des facteurs déterminants dans la réussite de ces techniques.

Avec l'objectif d'apporter des recommandations régionalisées aux agriculteurs et porteurs de projets de méthanisation, les références techniques devront couvrir une large gamme de successions de culture, de conditions de sol et de climat. Face à la complexité expérimentale de ces systèmes de culture, les approches de modélisation abordées dans le projet OPTICIVE avec le modèle CHN montrent tout leur intérêt. L'amélioration de ce type de modèle de production et d'évaluation des impacts sur l'état hydrique, azoté et organique des sols sera une voie à approfondir à partir des résultats d'expérimentations ou de suivi fins de cultures dans différentes régions.

La prise en compte de l'intérêt des associations d'espèces n'est à ce jour pas maîtrisée dans les modèles mais devra être approfondie a minima par approche différentielle avec des espèces pures.

Par ailleurs, les digestats sont perçus et intégrés aujourd'hui par les agriculteurs comme un coproduit qu'il est essentiel de valoriser au mieux. Au-delà des modes d'apports réduisant les risques de valorisation, un conseil sur les périodes d'épandage optimales sur l'ensemble des cultures de la succession est clairement attendu des producteurs. Les interrogations sont nombreuses par rapport aux contraintes logistiques (stockage de digestat) et réglementaires (périodes d'épandage autorisées). Dans les pratiques actuelles, avec un stockage limité dans le temps, les produits résiduels organiques sont épandus en fin d'été afin de libérer de la capacité de stockage sur l'automne-hiver. Les propriétés fertilisantes des digestats interrogent sur l'épandage dans ce calendrier. La poursuite du panel d'espèces candidates devra également intégrer cette problématique, même pour des apports modérés. Des espèces telles que les brassicacées présenteront certainement un intérêt supplémentaire.

La composition des CIVE et leur exportation en minéraux interroge les agriculteurs quant aux stratégies de fertilisation et à la gestion des digestats. Toujours dans cette logique de valorisation des digestats, des recommandations sont attendues sur les échanges substrat-digestats

Résilience des systèmes d'exploitation...

7.3. Structuration des travaux

Suite à la diffusion des premiers résultats OPTICIVE et à la réalisation d'ateliers régionaux, de nombreux travaux ont pu être identifiés sur les CIVE. Ces travaux sont conduits tant par les agriculteurs eux-mêmes, ou en groupe via des GIEE ou des CETA. Des organismes professionnels et économiques réalisent aussi quelques expérimentations majoritairement centrées sur la comparaison d'espèces. Ces résultats sont peu ou pas communiqués et les groupes d'échange sont peu nombreux.

Il apparaît par conséquent important de structurer ces travaux avec échange des connaissances en termes d'espèces et de pratiques. Une synthèse de ces connaissances permettrait alors de préciser ou réorienter ces comparaisons ou acquisitions de références.

7.4. Besoin en communication

La diffusion des résultats OPTICIVE via la réalisation d'ateliers régionaux a permis de mettre en avant un fort besoin de communication sur différents points :

- La réglementation sur les CIVE. De nombreuses interrogations ont été remontées par les agriculteurs face à la complexité des définitions et du manque de lien entre l'article du 7/07/2016 du code de l'environnement qui définit ces intercultures et les déclarations PAC.
- La connaissance des pouvoirs méthanogènes de ces CIVE. Même si les résultats OPTICIVE ne montrent pas de différence significative entre espèces, des analyses à disposition des agriculteurs interrogent fréquemment. Une communication sur les unités de mesure, leur interprétation et leur comparaison serait indispensable notamment en complément de travaux sur le stockage des CIVE.
- La dimension systémique et agro-écologique de la mobilisation des intercultures. En effet, les travaux actuels en région se concentrent sur les intercultures et leur potentiel de production. Mais l'adaptation de ces systèmes de culture doit passer par une diversification des ressources pour mieux gérer la variabilité interannuelle. Cette diversification des intercultures sera aussi garante d'une amélioration des systèmes de culture en termes techniques et environnementaux. La dimension multiservice des intercultures sera indispensable pour la durabilité des systèmes de demain.

8. Conclusion / Perspectives

Le projet OPTICIVE a permis de compléter les premières références et dégager les premières recommandations sur ces cultures intermédiaires à vocation énergétique. Cultures à part entière conduites dans des séquences de 3 cultures en 2 ans, ces cultures non alimentaires s'insèrent entre deux cultures alimentaires dites principales. L'ensemble de la séquence de culture doit être étudié afin d'optimiser les intérêts techniques, économiques et environnementaux.

La place des CIVE dans la succession est un premier facteur essentiel de réussite. Ces successions doivent parfois être adaptées pour laisser l'espace et le temps à la mise en œuvre de CIVE d'hiver ou d'été. Le choix des espèces ou des variétés des cultures alimentaires précédentes et suivantes devra être adapté afin d'assurer des récoltes plus précoces de céréales d'hiver avant CIVE d'été, ou des semis légèrement plus tardifs de cultures alimentaires après CIVE d'hiver.

Le choix des espèces et variétés de CIVE est un second facteur qui permettra de réduire la forte variabilité de production avec la bonne insertion dans les successions : de 4 à plus de 10 tMS/ha avec une moyenne de 6 tMS/ha. La fertilisation de ces cultures raisonnée dans l'ensemble de la succession est également nécessaire pour optimiser la production et rentabilité des CIVE.

Les CIVE confirment leur intérêt agro-environnemental notamment vis-à-vis de la baisse des risques d'érosion et de lixiviation. Le travail du sol et les techniques d'implantation gagneront à être adaptés afin de réduire les temps d'intervention entre cultures mais également les coûts d'implantation. Ces choix seront toutefois dépendants de la gestion des bioagresseurs dans la succession (pression adventices...). L'intérêt de ces cultures vis-à-vis du stockage de carbone est également confirmé. Leur cycle de développement plus long que des couverts de type CIPAN permet d'accumuler des quantités de biomasse racinaire importante mais également une forte biomasse aérienne restituée dans les chaumes. La gestion et le retour de digestat accentuent cet effet. L'insertion de CIVE et l'optimisation de la conduite des successions de culture permettent alors d'améliorer leur efficacité énergétique et de réduire les émissions de GES selon les voies de valorisation.

Malgré tous ces intérêts, la production de CIVE reste soumise à de fortes variabilités interannuelles. L'optimisation de la conduite permet de contenir leur coût de production qui reste élevé (125 €/tMS). La récolte constitue le premier facteur de coût (200 à 300 €/ha), suivi des semences selon les espèces (de 40 à 180 €/ha). Le raisonnement de ce poste de charge sera guidé par la gestion du risque au regard des opportunités pédoclimatiques. Avec un pouvoir méthanogène (280 l CH₄/kgMV) peu variable entre espèces, la recherche de la productivité sera prioritaire afin de réduire les coûts, de gérer la variabilité de production et assurer l'approvisionnement des unités de méthanisation.

La gestion de cette variabilité constitue un enjeu essentiel pour le développement de ces systèmes de demain. Cela passe notamment par l'identification des conditions pédoclimatiques optimales dans chacune des régions (besoins en température, pluviométrie, réserve utile, rayonnement) et la construction de recommandations régionalisées. L'adaptation des techniques de production, comme les semis sous couvert dans le précédent, est un autre enjeu fort pour s'adapter à ces contraintes pédoclimatiques. La recherche et l'adaptation génétique des espèces et variétés proposées sur toutes les cultures de la succession serait un autre axe de travail afin de proposer des plantes aux cycles plus courts adaptés à ces séquences de culture. Les CIVE permettent d'ajouter des services économiques et environnementaux aux couverts d'interculture. La recherche d'autres services écosystémiques sera un autre enjeu majeur pour les systèmes de culture de demain, notamment via l'identification et l'adaptation d'espèces dites multiservices : gestion des bioagresseurs, biodiversité... Agriculteurs et opérateurs économiques ont débuté de nombreux travaux qui gagneront à être structurés, analysés et synthétisés pour co-construire dans une démarche partenariale les recommandations technico-économiques et environnementales de ces systèmes agro-écologiques de demain.

Références bibliographiques

- ADEME. Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? Rapport d'étude disponible <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/france-independante-mix-gaz-renouvelable-010503a-rapport.pdf>
- Da Silva Perez D., Briand S., Laboubée C., Chabbert B., Leygue JP., Cadoux S., Labalette F., Comparison of agricultural and forest biomass with regards to biological processes for bioethanol production of second generation. Proceedings of the 18th European Biomass Conference & Exhibition, Lyon, France 3-7 May 2010.
- Labalette F., Marsac S., Jacquin C., Lumbreras-Castellano O., Chieze B., Briand S., Evaluation of the performance of triticale and carinata biomasses as biofuels in a french pilot combustion plant. Proceedings of the 18th European Biomass Conference & Exhibition, Lyon, France 3-7 May 2010.
- MAA – Le Plan Ebnergie méthanisation Autonomie Azote : <https://agriculture.gouv.fr/file/le-plan-energie-methanisation-autonomie-azote-ema>
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., 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), 418 p.
- Berti, Marisol, Russ Gesch, Burton Johnson, Yun Ji, Wayne Seames, et Alfredo Aponte. 2015. « Double-and relay-cropping of energy crops in the northern Great Plains, USA ». *Industrial Crops and Products*, Advances in Industrial Crops and Products Worldwide: AAIC 2014 international conference, 75 (novembre): 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.012>.
- Berti, Marisol, Dulan Samarappuli, Burton L. Johnson, et Russ W. Gesch. 2017. « Integrating winter camelina into maize and soybean cropping systems ». *Industrial Crops and Products* 107 (novembre): 595-601. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.014>.
- Brisson, Nadine, Bruno Mary, Dominique Ripoche, Marie Hélène Jeuffroy, Françoise Ruget, Bernard Nicoullaud, Philippe Gate, et al. 1998. « STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn ». *Agronomie* 18 (5-6): 311-46.
- Duparque, Annie, Hubert Boizard, Nathalie Damay, Jean-luc Julien, Christine Leclercq, et Bruno Mary. 2007. « Evolution de l'état organique du sol à l'échelle de la parcelle ». In *GEMAS-COMIFER Les 8èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre*, 1-16.
- Goff, Ben M., Kenneth J. Moore, Steven L. Fales, et Emily A. Heaton. 2010. « Double-Cropping Sorghum for Biomass ». *Agronomy Journal* 102 (6): 1586-92. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0209>.
- Graß, Rüdiger, Florian Heuser, Reinhold Stülpnagel, Hans-Peter Piepho, et Michael Wachendorf. 2013. « Energy crop production in double-cropping systems: Results from an experiment at seven sites ». *European Journal of Agronomy* 51 (novembre): 120-29. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.004>.
- Guichard, Laurence, Christian Bockstaller, Chantal Loyce, et David Makowski. 2010. « PERSYST, a Cropping System Model Based on Local Expert Knowledge ». *2010; Agro 2010 the XIth ESA Congress, Montpellier, FRA, 2010-08-29-2010-09-03*, 827-828. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=LV2016014102>.
- Justes, Eric, Nicolas Beaudoin, et Patrick [et al] Bertuzzi. 2012. « Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques ».
- Marsac, Sylvain, Françoise Labalette, Céline Laboubee, et Christophe Sausse. 2015. « Multicriteria Assessment of French Cropping Systems Including Energy Catch Crops ». In *ResearchGate*. Vienna. https://www.researchgate.net/publication/278022063_Multicriteria_assessment_of_French_cropping_systems_including_energy_catch_crops.
- Soenen, B, P Bessard Duparc, M Laberdesque, B Piquemal, JC Deswart, et X Le Bris. 2018. « Piloter conjointement la fertilisation azotée et l'irrigation par le couplage d'observations sol/plante avec le modèle de culture CHN ». *Phloeme*, 237.

- Szerencsits, Manfred, Christine Weinberger, Maximilian Kuderna, Franz Feichtinger, Eva Erhart, et Stephan Maier. 2015. « Biogas from Cover Crops and Field Residues: Effects on Soil, Water, Climate and Ecological Footprint » 9 (4): 4.
- Williams, Martin M. 2014. « A bioenergy feedstock/vegetable double-cropping system ». *Industrial Crops and Products* 59 (août): 223-27. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.05.025>.
- Zanetti, Federica, Andrea Monti, et Marisol T. Berti. 2013. « Challenges and opportunities for new industrial oilseed crops in EU-27: A review ». *Industrial Crops and Products* 50 (octobre): 580-95. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.030>.

Index des tableaux et figures

Tableaux ⁽ⁱ⁾

Tableau 1 : Caractéristiques des sites expérimentaux et facteurs étudiés dans les essais OPTICIVE .	9
Tableau 2 : modalités et conduites des essais CIVE d'hiver sur les sites Syppre ® Coteaux argilo-calcaire et Béarn.....	11
Tableau 3: modalités et conduites des essais CIVE d'été dans le Béarn	14
Tableau 4: résultats des coefficients apparents d'utilisation et d'équivalence engrais sur CIVE d'hiver en 2017, Buros dans la cadre d'OPTICIVE.....	19
Tableau 6 : Eau disponible à la récolte de CIVE d'hiver sur le site de Buros – OPTICIVE	23
Tableau 7 : Eau disponible à la récolte des la CIVE d'hiver sur les dispositifs Syppre ® Béarn et coteaux argilo-calcaire du Lauragais dans le cadre d'OPTICIVE.	23
Tableau 7 : Modalités testées en semis de CIVE à l'enjambeur sous couvert de maïs, OPTICIVE 2016	26
Tableau 9 : Résultats de biomasse de CIVE d'hiver implantées sous couvert de maïs à maturité physiologique.....	26
Tableau 10 : Tableau récapitulatif du comportement des espèces de CIVE en semis sous couvert de maïs, OPTICIVE	28
Tableau 11 : Composition et caractéristiques des assemblages de substrats testés en essais pilote de méthanisation pour OPTICIVE dans les réacteur pilote APESA.....	33
Tableau 12 : Cas type de simulation du stock de carbone organique avec AMG dans des successions avec CIVE.....	37
Tableau 13 : caractéristiques des simulations d'évolution des stocks de carbone du sol réalisées avec AMG V2 dans le cadre d'OPTICIVE.....	38
Tableau 14 : Rendements moyens des cultures des cas types construits pour les simulations AMG du programme OPTICIVE	39
Tableau 15 Composition chimique des digestats analysés essai OPTICIVE	39
Tableau 16 : Fractionnement biochimique et ISMO des digestats analysés essai OPTICIVE	39
Tableau 17 : Ecart de stock de carbone du sol simulés avec AMG V2 selon les scénarii A,B,C OPTICIVE	40
Tableau 18 : analyse comparative des simulations d'évolution des stocks de carbone organique avec CIVE ; modèle AMG V2 dans le cadre d'OPTICIVE	42
Tableau 19 - Indicateurs technico-économiques et environnementaux retenus.....	44
Tableau 20 : scénarii de contextes pédoclimatiques et de systèmes de culture retenus pour les simulations technico-économiques et environnementales OPTICIVE	46
Tableau 21 : Cas type de méthanisation retenus de l'atelier de conception conduit dans le cadre d'OPTICIVE.	46
Tableau 22 : coûts de production complet et hors-charges fixes de différentes CIVE selon leur rendement et les contextes pédoclimatiques étudiés pour OPTICIVE	47
Tableau 23 : Récapitulatif des conditions climatiques et pédologiques des simulations sur CHN pour quelques situations types OPTICIVE	55
Tableau 24 : liste des espèces et variétés étudiées.	71
Tableau 25: récapitulatif des mesures et observations à réaliser sur chaque couvert	74

Figures⁽ⁱ⁾

Figure 1 : Rendements biologiques moyens et variabilité interannuelle par espèces des CIVE Hiver 2016 - 2018.....	11
Figure 2 Rendements biologiques des CIVE Hiver 2016 - 2018 – Avoine	12
Figure 3 Rendements biologiques des CIVE Hiver 2016 - 2018 – Triticale	12
Figure 4 : Dynamique d'accumulation de biomasse pour quelques espèces expérimentées au cours d'OPTICIVE (moyenne des observations de chacune des espèces)	13
Figure 5 : Rendements CIVE d'hiver en association – 2017 et 2018 OPTICIVE (Castetis, 64 ; Euralis)	14
Figure 6 Rendements biologiques et machine CIVE Eté 2016, OPTICIVE- Burros (64) – Semis 27/06 sol nu	15

Figure 7 Rendements biologiques CIVE Eté 2016, OPTICIVE- Uzan (64) – Semis 27/06 après céréale	15
Figure 8 Rendements CIVE Eté – Sorgho 2016 - 2018	16
Figure 9 : Rendement CIVE d'hiver en fonction des dates de semis, OPTICIVE 2016, Lay Lamidou (64)	17
Figure 10 : Comparaison des biomasses de CIVE d'hiver selon la date de semis en contexte argilo-calcaire du Lauragais, OPTICIVE, 2017.	17
Figure 11 : Effet de la fertilisation sur le rendement en biomasse de CIVE d'hiver 2016 ; OPTICIVE (Castetis, 64), semis 23/10/2015-Récolte 12/04/16	18
Figure 12 : Effet de la fertilisation sur le rendement en biomasse de CIVE d'hiver 2017 ; OPTICIVE (Castetis, 64), semis 28/10/2016-Récolte 09/05/17	18
Figure 13 : Effet de la fertilisation sur le rendement de CIVE d'hiver (Avoine) 2017 ; OPTICIVE – Buros, 2017 – semis 2/11/2016, fertilisation 17/02/17, récolte 18/04/2017	19
Figure 14 : Précipitations observées sur le site de Buros (64) au cours de l'essai fertilisation et valorisation de digestat sur Avoine CIVE d'hiver - OPTICIVE	20
Figure 15 : Effet de la fertilisation et de la forme d'apport sur la biomasse de CIVE d'été ; OPTICIVE-Larreule 2017 ; Semis 17/07, Récolte 27 Octobre 2017	20
Figure 16 : Impact de la fertilisation azotée sur le rendement en biomasse de ray grass d'Italie conduit en CIVE d'hiver – OPTICIVE, 2016 – Semis 21/09/15, Récolte en 3 coupes dès avril 2016	21
Figure 17 : Reliquats azotés par espèce en entrée hiver et à la récolte sur les essais en coteaux argilo-calcaire du Lauragais, OPTICIVE.	22
Figure 18 : Reliquats azotés après CIVE d'été (Sorgho 2016-2017) sur le site Syppre® Béarn, OPTICIVE.....	22
Figure 19 : Impact des CIVE d'hiver sur le rendement de la culture suivante (maïs ensilage) OPTICIVE 2016, castetis.....	25
Figure 20 : Rendements biomasse de parcelles de CIVE semées sous couvert de maïs à l'hélicoptère au cours du programme OPTICIVE	28
Figure 21 : Rendements à l'hectare - Sorgho grain semé après CIVE	29
Figure 22 : Elaboration du rendement du sorgho grain en 2017 selon le mode de semis	30
Figure 23 : Pouvoir méthanogène de 23 échantillons de CIVE	31
Figure 24 : Pouvoir méthanogène unitaire et rendement méthanogène à l'hectare d'avoine et de triticale conduits en CIVE selon le stade de développement, OPTICIVE.	31
Figure 25 : Teneur en minéraux de la biomasse	34
Figure 26 : Potentiel éthanol des CIVE	35
Figure 27: Poids de la biomasse aérienne de CIVE d'hiver mesuré sur les dispositifs Syppre® et essais analytique OPTICIVE	36
Figure 28 : Production de biomasse aérienne et souterraine de CIVE d'hiver 2017	36
Figure 29 : Evolution du stock de carbone au cours du temps pour les simulations A2, B2 et C2.....	40
Figure 30 : Evolutions des stocks de carbone au bout de 100 ans pour les simulations du cas B (Terrefort Moyen), OPTICIVE, Simulation AMG V2	40
Figure 31 : Evolutions des stocks de carbone au bout de 100 ans pour les simulations du cas A (Terrefort Moyen), OPTICIVE, Simulation AMG V2	40
Figure 32 : Evolutions des stocks de carbone au bout de 100 ans pour les cas type OPTICIVE, Simulation AMG V2	41
Figure 33 : Evolutions des stocks de carbone au bout de 100 ans pour les simulations du cas C (Boulbènes), OPTICIVE, Simulation AMG V2.....	41
Figure 34 : Ecart entre 2 simulations de l'évolution du stock de carbone au bout de 100 ans, cas type OPTICIVE, Simulations AMG V2 ; Par exemple 2-1 représente la différence de stockage de carbone, au bout de 100ans, entre la simulation 2 et la simulation 1 pour les 3 cas types.	41
Figure 35 : Résultat des simulations d'évolution des stocks de carbone organique dans les systèmes étudiés sur la plateforme Syppre® coteaux argilo-calcaire du Lauragais, simulations réalisées sur la base des résultats OPTICIVE dans le cadre du programme Solebiom	43
Figure 36 : Résultat des simulations d'évolution des stocks de carbone organique dans les systèmes étudiés sur la plateforme Syppre® Béarn, simulations réalisées sur la base des résultats OPTICIVE dans le cadre du programme Solebiom	44
Figure 37 : coûts de production complet et hors-charges fixes de différentes CIVE dans le contexte d'une exploitation du Béarn, OPTICIVE	47
Figure 38 : Coût total de l'énergie produite, incluant coût de production de la CIVE et coût de fonctionnement d'une unité de méthanisation en injection (135 Nm ³ .h ⁻¹)	48

Figure 39 : Prix d'achat maximum de la biomasse pour les unités de méthanisation envisagées dans le programme OPTICIVE.....	49
Figure 40 : seuils de rendement de CIVE selon le prix d'achat de ces ressources, OPTICIVE	50
Figure 41 : Effet de l'introduction de la CIVE sur le temps de travail par comparaison avec une situation initiale sans CIVE	51
Figure 42 : Evaluation du temps de travail et besoin en UTH de la méthanisation selon les différents cas type de méthanisation	52
Figure 43 : Bilan des gaz à effet de serre produits ou économisés à l'échelle du système de culture et/ou d'exploitation.....	53
Figure 44 : comparaison des rendements mesurés et simulés par le modèle CHN Blé tendre d'avoine conduite en CIVE d'hiver en 2016, 2017 et 2018 dans le cadre d'OPTICIVE.....	56
Figure 45 : comparaison des rendements mesurés de CIVE d'hiver et simulés par le modèle CHN Blé tendre en 2016, 2017 et 2018, CIVE hiver en espèces de graminées pures (avoine, orge, triticale, seigle) dans le cadre d'OPTICIVE.....	56
Figure 46 :Potentiels biomasse de CIVE d'hiver de type graminées pour différentes dates de semis et de récolte simulées dans le cadre d'OPTICIVE avec le modèle CHN blé tendre dans le contexte du Lauragais.....	57
Figure 47 : Potentiels biomasse de CIVE d'hiver de type graminées par grand contexte pédoclimatique pour une date de semis et de récolte. Simulations réalisées dans le cadre d'OPTICIVE avec le modèle CHN blé tendre.....	58
Figure 48 : comparaison des rendements mesurés de CIVE d'été et simulés par le modèle CHN maïs en 2016, 2017 et 2018, CIVE d'été de sorgho et maïs dans le cadre d'OPTICIVE	58
Figure 49: Plan de l'essai	72

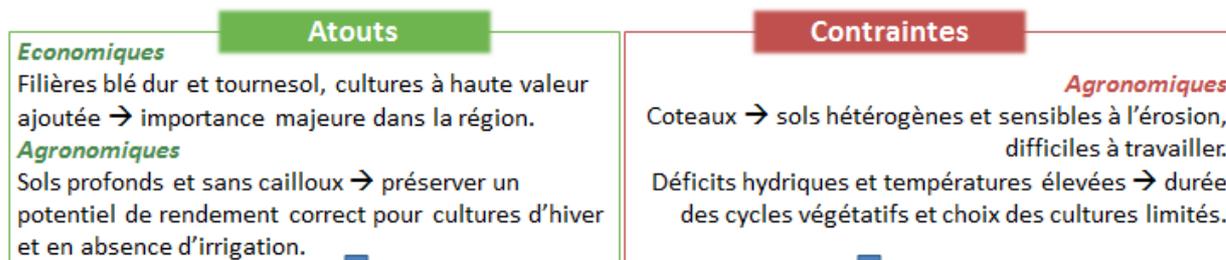
Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AAMF	Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France
AGV	Acide Gras Volatil
CIVE	Culture Intermédiaire à Vocation Energétique
GES	Gaz à Effet de Serre
CIPAN	Culture Intermédiaires Piège à Nitrates
Irstea	L'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
GAEC	Groupement agricole d'exploitation en commun
GIE	Groupement d'intérêt économique
GIEE	Groupement d'intérêt économique et environnemental
INRA	Institut National de recherche Agronomique
INSA	Institut National de Sciences Appliquées
ISMO	Indice de stabilité de matière organique

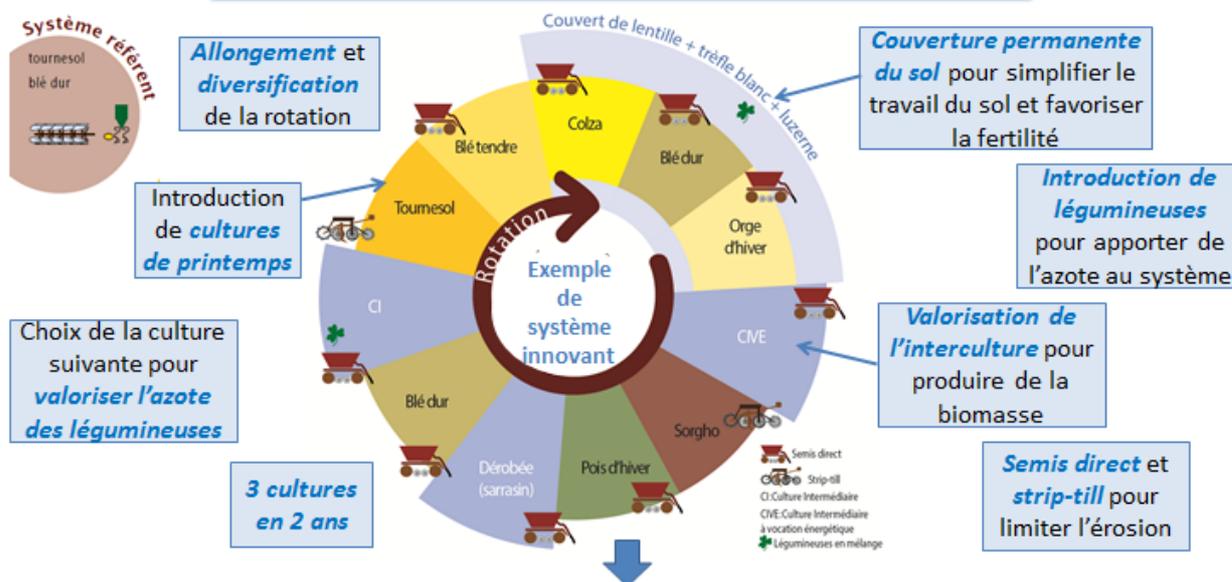
Annexes

Annexe I

Syppre Coteaux argilo-calcaires du Lauragais Innover sans irrigation



Des leviers clés à combiner pour atteindre ces objectifs



Evaluation a priori : un système prometteur, à mettre à l'épreuve du terrain

Système	↑Produit Brut (€/ha)	↑Production Energie Brute (MJ/ha)	↑Marge semi-nette (€/ha)	↓Emissions GES (kgeqCO ₂ /ha)	↓Conso. Energie Primaire (MJ/ha)	↓Quantité N (kg/ha)	↓50% IFT total régional	↓50% IFT herbicide régional	↑Stocks de MO	↓Risque adventices (%)
Référent	1130	167654	826	1969	11664	138	2,8	1,8	2,5	40
Innovant	+13%	+21%	+22%	-6%	-9%	-4%	+15%	-6%	+15%	-6%
Objectif atteint?	✓	✓	✓	✓	✓	≈	✗	✗	✓	✓

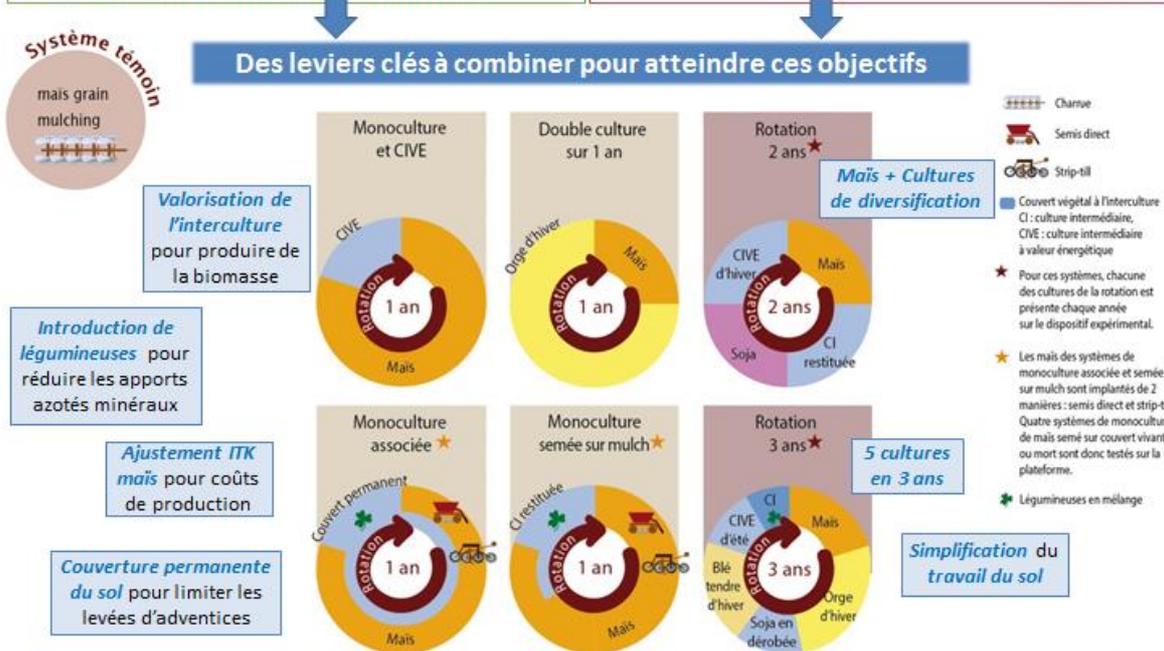
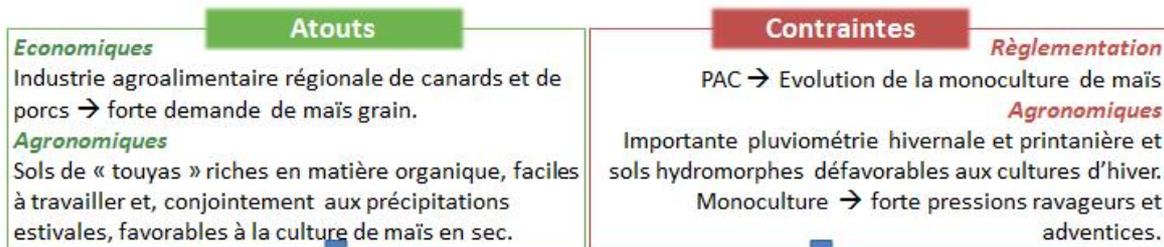
Organismes partenaires du projet

Chambre régionale d'agriculture Occitanie, Chambre d'agriculture de la Haute Garonne, Conseil général de la Haute Garonne, Agro d'Oc, Arterris, Val de Gascogne, École d'Ingénieurs de PURPAN, Lycée d'Enseignement Général et Technologique de Toulouse-Auzeville, ARVALIS - Institut du végétal, Institut Technique de la Betterave, Terres Inovia

Annexe I



Terres humifères du Béarn Innovier en système spécialisé en maïs



Evaluation a priori : un système prometteur, à mettre à l'épreuve du terrain

Système	↑Produit Brut (€/ha)	↑Production Energie Brute (MJ/ha)	↑Marge semi-nette (€/ha)	↓Emissions GES (kgeqCO2/ha)	↓Conso. Energie Primaire (MJ/ha)	↓Quantité N (kg/ha)	↓50% IFT total régional	↓50% IFT herbicide régional	↑Stocks de MO	↓Risque adventices (%)
Référent	1190	202821	524	2133	11598	157	4,9	2,9	3,9	52
Innovant	-6%	-14%	+7%	-32%	-26%	-35%	-38%	-35%	-7%	-44%
Objectif atteint?	✗	✗	✓	✓	✓	✓	≈	≈	≈	✓

Organismes partenaires du projet
Chambre d'agriculture des Pyrénées Atlantiques, Euralis, ARVALIS – Institut du végétal, Institut Technique de la Betterave, Terres Inovia

Annexe II

85 CIVE Hiver

Etude de couverts intermédiaires d'hiver à base de céréales, valorisés pour l'énergie

Responsable : S MARSAC,

Lieu : Vieillevigne (31)

Codification en DE5R85 et XP009

1. THEME DE L'ÉTUDE

Les besoins en biomasse à usage énergétique vont être de plus en plus forts avec un souhait de non concurrence d'allocation des surfaces entre cultures alimentaires et non alimentaires. La **valorisation énergétique de couverts intermédiaires adaptés, appelés CIVE**, apparaît comme une opportunité à étudier, leur valorisation permettant d'amortir leur coût. Dans les systèmes de culture comportant essentiellement des cultures de printemps, il est important de connaître le comportement de couverts d'hiver, semés en automne et récoltés au printemps suivant. La date de récolte de la CIVE au printemps a non seulement un impact sur la production de ce couvert, mais aussi sur l'état hydrique du sol qui aura un effet sur l'implantation de la culture suivante en cas d'assèchement trop prononcé de la couche arable.

2. OBJECTIFS DE L'ÉSSAI

- Comparer des cultures d'hiver, assimilées à des cultures intermédiaires, semées à l'automne (en semis direct) et récoltées immatures au printemps suivant (avant le semis de sorgho) :
 - Evaluer la croissance de ces couverts au cours du printemps, en mesurant la production à 3 dates de récolte.
 - Mesurer l'état hydrique du sol à ces 3 dates.
 - Mesurer l'impact de ces couverts sur le rendement de la culture suivante selon le type d'implantation.

3. FACTEURS ETUDIÉS

L'essai comporte trois facteurs étudiés (cf Tableau 23):

- ✓ Espèce : 3 espèces de couverts (triticale, avoine vesce et avoine rude)
- ✓ Travail du sol pour la culture suivante

Tableau 23 : liste des espèces et variétés étudiées.

Espèces	Variétés	Doses de semis
Triticale	BIKINI	224 grains/m ²
Avoine (60%)- Vesce (40%)		372 grains/m ²
Avoine rude	Timoko	217 grains/m ²

4. MATERIEL EXPERIMENTAL

L'essai est implanté à Vieillevigne (31) chez M. Jean et suivi par ARVALIS.

5. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif est conduit en bandes sans répétition (cf. plan de l'essai, Figure 49)

Chaque bande mesure 6 m de large (2 passages de semoir) sur 50 m de long, soit 300 m².

L'installation des cultures et les opérations d'entretien (désherbage, fertilisation, ...) sont réalisées par Yannick JEAN

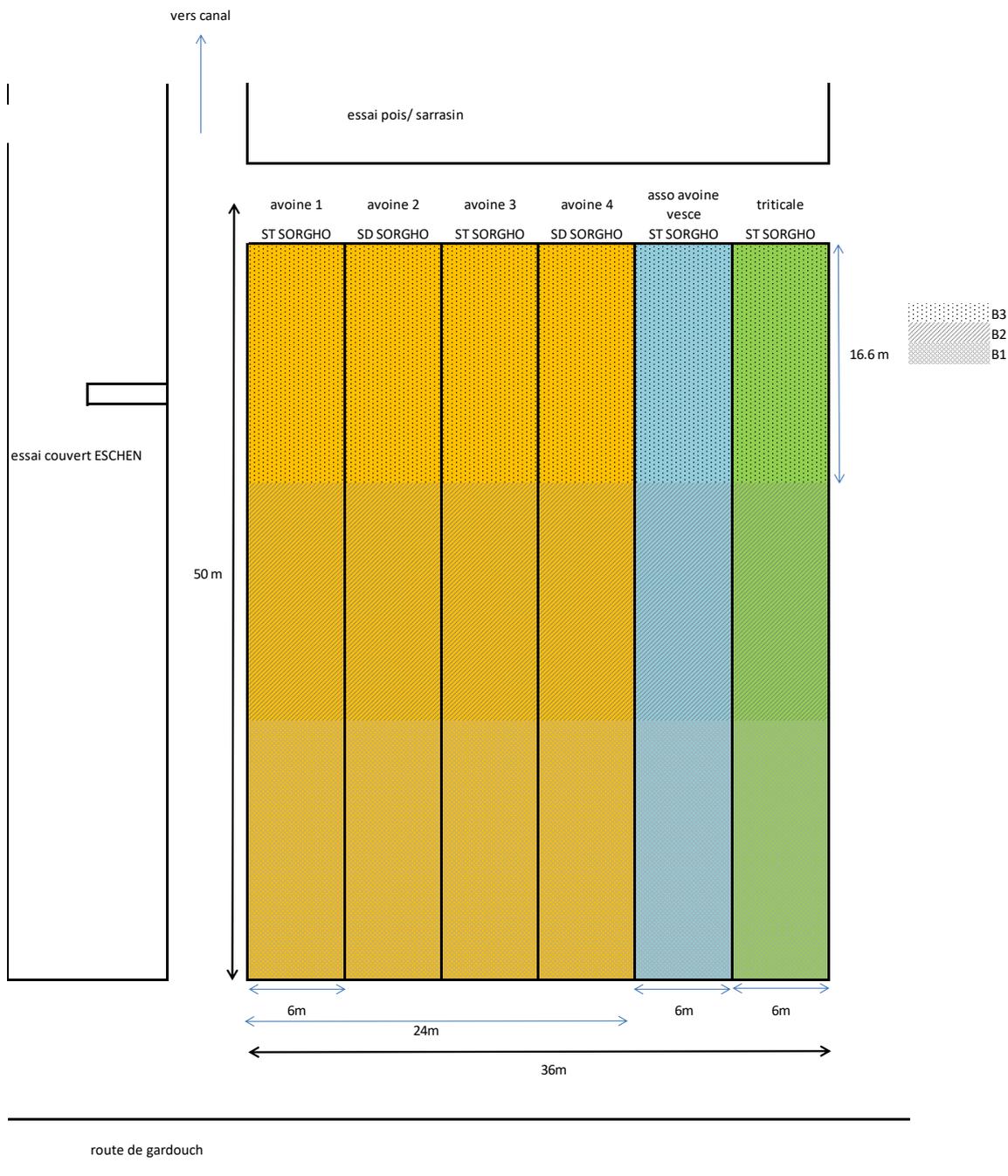


Figure 49: Plan de l'essai

La récolte de la CIVE aura lieu à partir du 20/04, avant le 1/05. Elle sera programmée en fonction des conditions météorologiques afin de bénéficier du temps disponible pour le semis du sorgho suivant. Les modalités de travail du sol seront installées dans le même sens que les premières bandes sans randomisation.

Les modalités suivantes seront appliquées uniquement sur les bandes d'avoine :

- Strip Till (le choix de la profondeur et des dents sera effectué le jour du passage selon l'état du sol)
- Semis Direct Orensan

Le strip till sera mis en œuvre le jour même de la récolte de la CIVE avec un semis dans la foulée. La réalisation de profils culturaux permettra d'adapter ces règles selon la pluviométrie observée. Les autres techniques de semis direct seront réalisées le plus rapidement possible après la récolte et ressuyage de la surface du sol (conditions humides dues à la condensation).

6 VARIABLES MESUREES

Chaque observation est reprise dans le Tableau 24 avec les modes opératoires associés.

Afin de déterminer la croissance de printemps de chaque couvert, il est prévu de réaliser des prélèvements de biomasse à 3 dates : **15 mars, 1^{er} avril et 20 avril. 3 prélèvements au cadre de 50x50 cm** sont à faire sur chaque bande de culture. Afin d'améliorer la connaissance de l'impact carbone de ces cultures sur la matière organique des sols, le poids des tronçons de 0/10 – 10/20 et 20/30 cm sera mesuré (Code DE4R85/AC012) après pesées de la biomasse totale sur :

- 2 prélèvements de chèque espèce pour triticale et avoine-vesce ;
- 1 prélèvement de chaque bande pour l'avoine rude soit 4 répétitions de mesure.

Ces échantillons seront séparés en 2 pour détermination de la matière sèche et du poids des chaumes. A chaque date, la teneur en N du couvert sera déterminée sur le regroupement des 3 échantillons réalisés pour la détermination de la MS. Afin de simplifier les étuvages les échantillons seront séchés à 65° C (maxi) pendant au moins 96 h (poids constant). **Un échantillon de 2.5kgMS** sera constitué pour les analyses et analyse de pouvoir méthanogène (BMP). **Un échantillon de 4kg MS sera constitué à la 3^{ème} date à partir de la récolte machine** pour les mêmes analyses complétées de d'une composition physico-chimique complète (PCS, Cendres, composition des cendres).... A chacune de ces dates un **profil hydrique du sol** sera réalisé sur 2 horizons (0-30 cm ; 30-60 cm).

Une mesure du reliquat azote du sol sera réalisée à l'entrée et à la sortie hiver (début et fin de drainage) sur 3 horizons (0-30 cm ; 30-60 et 60-90 cm) pour l'ensemble des cultures avec un échantillon moyen pour l'ensemble des modalités. Après la récolte à la 3^o date un reliquat sur 3 horizons (0-30 cm ; 30-60 et 60-90 cm) sera effectué sur chaque modalité.

Afin de mesurer l'effet des couverts sur le rendement du sorgho suivant et d'avoir une idée de la fourniture d'azote, il sera nécessaire de mesurer le rendement et la teneur en N sur chaque bande (3 répétitions de la mesure). L'itinéraire de culture sera enregistré.

Le Tableau 24 résume l'ensemble des mesures et observations à réaliser sur les CIVE d'hiver.

Pour le sorgho suivant, la densité de levée sera mesurée et les stades phénologiques relevés. Le rendement grain sera observé au final pour chaque modalité de travail du sol et précédent.

Tableau 24: récapitulatif des mesures et observations à réaliser sur chaque couvert

Cultures concernées	Période	Date/stade	Mesure	« Etendue »	Mode opératoire	Remarques
Triticale Orge, Avoine rude, Avoine - vesce	Semis à récolte	Semis/levée	Vigueur levée Densité levée	Bande	M.O. n° 0196 M.O. n°0184 (ou M.O. n°0172 ?)	
		Levée à récolte	Présence maladies/ravageurs/ adventices	Bande	M.O. n° 0145	
			Dégâts de froid	Bande	?	
		Entrée hiver ou Début drainage	Profil N minéral : 0-30 cm / 30-60 cm et 60-90 cm	12 carottages répartis sur l'ensemble des modalités	M.O. n°0008	
		Sortie hiver ou Fin drainage	Profil N minéral : 0-30 cm / 30-60 cm et 60-90 cm	12 carottages répartis sur l'ensemble des modalités	M.O. n°0008	Avant apport N
		15/03 et 1/04	Biomasse aérienne	3 répétitions de la mesure par bande au cadre 50x50 cm Mesure du poids de biomasse par tronçon sur 2 prélèvements	M.O. n°0035	2.5 kg MS par bande séchés 96h à 65°C
			Teneur N biomasse	1 échantillon moyen des 3 prélèvements		
			Profil hydrique : 0-30 cm / 30-60 cm et 60-90 cm	1 mesure par bande à partir de 6 carottages + 1 mesure dans parcelle Syppre en modalité labour à partir de 6 carottes	M.O. n°0059	
		20/04	Biomasse aérienne	3 répétitions de la mesure par bande au cadre 50x50 cm Mesure du poids de biomasse par tronçon sur 2 prélèvements	M.O. n°0035	manuel
			Profil hydrique : 0-30 cm / 30-60 cm et 60-90 cm	1 mesure par bande à partir de 8 carottages 1 mesure dans parcelle Syppre en modalité labour à partir de 6 carottes	M.O. n°0059	
			Profil N minéral : 0-30 cm / 30-60 cm et 60-90 cm	1 mesure par bande à partir des 8 carottages du profil hydrique précédent (séparer le total des échantillons)	M.O. n°0008	
			Détermination du rendement	3répétitions de la mesure par bande	M.O. n°05020	motofaucheuse
			Détermination du « rendement machine »	1 mesure par bande		Pesée remorque
			Analyse physico chimique	1 échantillon par bande	M.O. n°0035	Séchage maximal à 65°C durant 96h
Culture suivante sorgho	récolte	Rendement de la culture suivante	3 répétitions de la mesure par bande + 3 répétitions de la mesure parcelle agriculteur	M.O. n° ?	manuel	
		Teneur N ⁽¹⁾	1 mesure par bande	M.O. n°0035		

7. CONDUITE DE L'ESSAI

Les CIVE sont implantées au 1/10/17. Ces cultures seront conduites avec un optimum technico-économique lié à l'objectif de production de biomasse. La productivité est un objectif essentiel à rechercher tout en minimisant les coûts et les impacts environnementaux. Afin de limiter le salissement il est prévu un désherbage pour les modalités non associées. De même un apport de 80 kg N/ha sera réalisé au stade 1 nœud.

La récolte des couverts se fera à l'ensileuse, juste après le prélèvement de la troisième date. Chaque culture sera pesée en frais (pesons électroniques), un échantillon sera prélevé sur chaque remorque pour détermination de la teneur en M.S. et analyse physico-chimique

La conduite des cultures (intervention et date) sera notée et jointe au compte-rendu.

8. TRAITEMENT STATISTIQUE DES RESULTATS

Pas de traitement statistique

9. DIFFUSION

- ✓ *Le dossier d'essai remis par l'expérimentateur contiendra l'ensemble des observations et mesures réalisées.*

10. MOYENS MATERIELS

- ✓ Equipements : Cf. modes opératoires précisés au point 6.
- ✓ Récolte : ensileuse, pesons électroniques.

11. PERSONNEL NECESSAIRE

- ✓ 20 jours homme pour l'implantation, le suivi des cultures et les récoltes et les mesures

EN ANNEXE du Protocole:

Les modes opératoires précisés dans le point 6

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





OPTIMISATION DE LA MOBILISATION DE CIVE POUR LA METHANISATION DANS LES SYSTEMES D'EXPLOITATION

Essentiel à retenir

Les premières recommandations techniques ont pu être établies et diffusées, tant sur le choix des espèces que les dates de semis et la fertilisation mais la variabilité de production est très élevée. L'intérêt de ces intercultures se confirme également pour réduire les risques de lixiviation d'éléments minéraux mais elles peuvent engendrer des pertes de rendements pour la culture suivant les CIVE d'hiver essentiellement, en raison de retards d'implantation. L'intérêt des CIVE et du retour des digestats pour l'état organique des sols est aussi confirmé.



www.ademe.fr

