ExpéCIVE 2013 – 2014

ÉTUDE AU CHAMP DES POTENTIELS AGRONOMIQUES, MÉTHANOGÈNES ET ENVIRONNEMENTAUX DE CULTURES INTERMÉDIAIRES À VOCATION ÉNERGÉTIQUE

Décembre 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Emilie PISLOR - Méthaneva et Caussade semences

N° de contrat : 1306C0039

Coordination technique : Julien THUAL - ADEME Angers - DEP - Direction Economie Circulaire et Déchets - Service Mobilisation et Valorisation des Déchets

ADEME

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

RAPPORT D'ÉTUDE

En partenariat avec :

CAUSSADE semences

Source de génétique

méthaneva

REMERCIEMENTS

Caussade semences, Méthaneva, et l'ADEME souhaitent remercier les membres du Comité de Pilotage pour leur participation, leurs commentaires et leurs suggestions sur l'étude, ainsi que les agriculteurs qui ont réalisé les essais à titre gracieux.

Malgré la rigueur apportée au suivi des essais, des erreurs ou des omissions peuvent s'insérer dans cette étude. Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs. Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées aux membres du Comité de Pilotage.

Lynda AISSANI (IRSTEA)
Marc BARDINAL (ADEME)
Antoine BEDEL (Caussade semences)
Samuel CAUSSE (EVEA)
Vincent COLOMB (ADEME)
Mélissa CORNELUS (EVEA)
Bertrand DECOOPMAN (Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne)
Matthieu DESBLES (Méthaneva)
Simone HRUSCHKA (AILE)
Charles MAGUIN (TRAME)
Sylvain MARSAC (Arvalis)
Mélanie MAZET (Caussade semences)
Léa MOLINIE (MAAP)
Guy MONTET (Caussade semences)
Denis OLLIVIER (TRAME)
Emilie PISLOR (Méthaneva)
Julien THUAL (ADEME)
Romain VOLPOET (Caussade semences)

CITATION DE CE RAPPORT

Emilie PISLOR - Méthaneva et Caussade semences **- 2016 – Étude au champ des potentiels agronomiques, méthanogènes et environnementaux de cultures intermédiaires** – Rapport – 61 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 la 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.

SOMMAIRE

Résumé 5
1. Contexte du projet 6
2. Méthodologie 6
2.1. Sites d'implantation 6
2.2. Couverts étudiés 8
2.3. Protocole implantation 9
2.4. Protocole récolte 9
2.5. Analyse des échantillons 10
2.5.1. Mesure de matière sèche 10
2.5.2. Mesure de potentiel méthanogène 10
2.6. Calcul du coût de production des couverts 10
2.6.1. Coût d'intrants 10
2.6.2. Coût d'implantation 11
2.6.3. Coût de fertilisation 11
2.6.4. Coût de récolte 12
2.6.5. Coût de main d'œuvre 12
2.7. Méthodologie ACV 12
2.7.1. Unité fonctionnelle 12
2.7.2. Périmètre 12
2.7.3. Modèles d'émissions considérés 13
2.7.4. Indicateurs d'impacts retenus 14
3. Résultats 15
3.1. Potentiel agronomique des couverts 15
3.1.1. CIVE à cycle court 15
3.1.2. CIVE à cycle long 20
3.1.3. Conclusions 23
3.2. Potentiel énergétique des CIVE étudiées 23
3.3. Coût de production des cultures dérobées 25
3.3.1. Calcul des coûts intermédiaires 25
3.3.2. Résultat du coût de production des couverts 27
3.3.3. Conclusions 28

3.4. Analyse de Cycle de Vie des CIVE étudiées 28
3.4.1. CIVE à cycle court 29
3.4.2. CIVE à cycle long 32
3.4.3. Conclusions de l'étude 34
4. Recommandations 34
5. Conclusions / Perspectives 37
Références bibliographiques 41
Sigles et acronymes 42
Annexes 43

Résumé

Les Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) constituent une ressource essentielle au développement d'unité de méthanisation à la ferme. Insérées dans des rotations de trois cultures en deux ans, deux cultures alimentaires et une non alimentaire, elles assurent une couverture longue du sol et diminuent les risques environnementaux à l'interculture (lixiviation, …). Toutefois leur valorisation en méthanisation est conditionnée par la variabilité des rendements des CIVE et leur coût de production.

Suite aux résultats du projet sur les CIVE à cycle court mené en 2012 par l'ADEME, Caussade semences et Méthaneva, un nouvel essai a été mené sur l'été 2013 pour tester des CIVE à cycle court et l'hiver 2013-2014 pour tester des CIVE à cycle long. Il avait pour but d'évaluer les caractéristiques agronomique, énergétique, économique et environnementale de différents couverts lors d'essais en plein champ sur 24 sites répartis sur la France entière. L'influence de la fertilisation a également été étudiée puisque certains sites ont amendé la moitié des parcelles d'essai.

Ainsi, 9 CIVE à cycle court et 3 CIVE à cycle long ont été testées. Les récoltes ont été faites par pesée géométrique entre Octobre et début Novembre pour les premières et sur le mois d'Avril pour les secondes. Les rendements agronomiques ont été déterminés pour chaque espèce et chaque site. Le pouvoir méthanogène de chaque couvert a été déterminé afin de définir le rendement énergétique de chaque CIVE. Le coût de production en €/tMS a été calculé pour chaque couvert. L'impact environnemental de chaque CIVE a été déterminé par Analyse de Cycle de Vie (ACV).

Au final, 3 couverts à cycle court et 2 couverts à cycle long ont été mis en avant. De manière plus générale, quel que soit le type de CIVE implanté, cycle court ou cycle long, il est important d'implanter au bon moment et au bon endroit pour obtenir un maximum de biomasse, c'est-à-dire un maximum d'énergie pour le coût de production le plus faible possible.

Abstract

Intermediate Crops for Energy Supply (ICES) are essential for farming anaerobic digestion development. Catch crops into a three crops over two years sequence decrease environmental risks with a long soil cover. However, their use in anaerobic digestion process is conditionned by their cost and their yield variability.

Following the results of 2012 on short growth cycle ICES program conducted by ADEME, Caussade semences and Méthaneva, a new program have been done on summer 2013 to test short growth cycle ICES and winter 2013 – 2014 to test long growth cycle ICES. The aim of this project was to evaluate the agronomic, energetic, economic and environmental characteristics of some plant covers marketed by Caussade semences. Then field experiments have been conducted on 24 sites all over France. The impact of fertilization was studied too because some trial sites has fertilized the half part of experimental field.

9 short growth cycle ICES and 3 long growth cycle ICES have been tested. The harvesting have been done by geometric weighting between middle of October and beginning of November for the first one and in April for the second. The agronomic yields have been determined for each plant cover and for each trial site. The biochemical methane potentials (BMP) have been evaluated in order to determine the energetic yield of each ICES. The production cost in €/tDM was calculated for each plant cover and the environmental impact determined by Life Cycle Analysis (LCA).

Finally, 3 short growth cycle ICES and 2 long groth cycle ICES could be identified. More generally, no matter what type of ICES, short or long growth cycle, the more important is to plant at the right time and the right place to obtain the higher biomass, that is the more energy for the lowest production cost.

1. Contexte du projet

Les enjeux de la méthanisation agricole sont de :

- optimiser l'investissement et les charges d'exploitation,
- sécuriser au maximum le gisement, c'est-à-dire en produisant le plus de matière possible sur l'exploitation.

Les cultures dérobées sont des matières à fort pouvoir méthanogène qui peuvent être produites sur l'exploitation agricole. Elles sont également appelées Culture Intermédiaire à Vocation Energétique (CIVE).
Les cultures dérobées sont de deux types :

- Les cultures intermédiaires à cycle court c'est-à-dire des couverts implantés entre deux céréales soit au moins 120 jours entre début Juillet et mi-novembre,
- Les cultures intermédiaires à cycle long, c'est-à-dire des couverts implantés entre une céréale et un maïs, soit au moins 210 jours entre mi-septembre et mi-avril.

L'ADEME, Caussade semences et Méthaneva ont travaillé ensemble en 2013 sur un projet d'études sur les CIVE (projet ExpéCIVE 2012) (ADEME, 2013). Le but de ce projet était de sélectionner des couverts végétaux intéressants d'un point de vue agronomique, économique.
Ce sont 11 couverts à cycle court qui ont été testés. Parmi ces couverts, il y avait 5 espèces pures, comme des maïs ou des sorghos, et 6 mélanges d'espèces. Ces couverts ont été implantés sur 18 sites répartis sur toute la France. Cependant, les mauvaises conditions climatiques de l'été 2013 ont fait que seuls 11 sites ont été récoltés. Les rendements obtenus étaient très variables. Mais, l'une des principales conclusions de cette étude était qu'il fallait favoriser les mélanges, car ils présentent un bénéfice environnemental plus intéressant.

Suite à cet essai, il a été décidé qu'une deuxième année d'étude serait effectuée afin de confirmer les rendements obtenus au cours de la première année et de réaliser des essais sur les cultures intermédiaires à cycle long.

Ce nouveau projet a pour objectifs de :
- sélectionner des espèces et variétés de cultures adaptées à la codigestion,
- déterminer le potentiel méthanogène et le coût de production de ces couverts,
- faire une analyse de cycle de vie (ACV) de ces cultures pour évaluer leur impact environnemental.

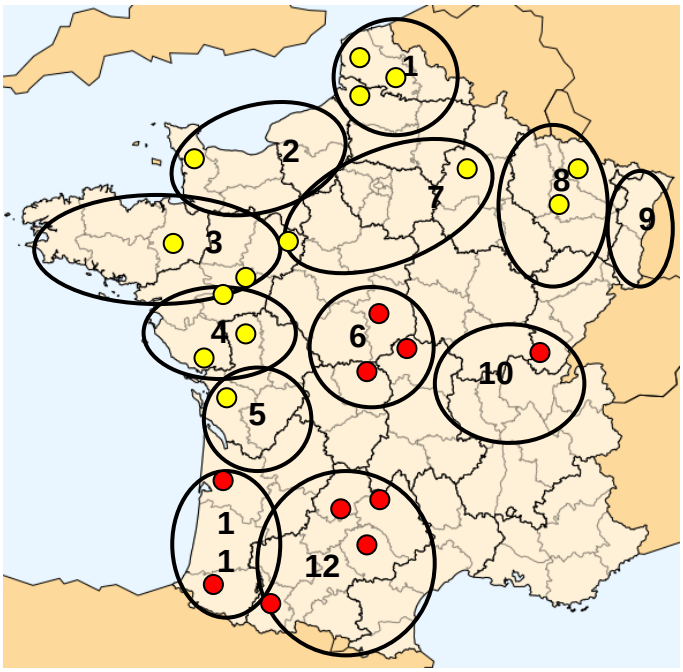
2. Méthodologie

2.1. Sites d'implantation

Tout d'abord, le territoire national a été découpé en deux zones (Nord et Sud), puis en 12 secteurs d'intérêt, en fonction des conditions climatiques estivales dans ces différentes régions (Figure 1).

Pour les CIVE à cycle court, 24 sites d'implantation ont été sélectionnés sur l'ensemble du territoire (Tableau 1). Aucun site n'a été trouvé pour la zone 9. Au final, 11 sites sont situés dans la zone Sud et 13 dans la zone Nord.

Pour les CIVE à cycle long, 11 sites d'implantation ont été retenus (Tableau 2).



12 Secteurs d'implantation :

- 1 : Nord-Pas-de-Calais
- 2 : Normandie
- 3 : Bretagne – Pays de Loire
- 4 : Vendée – Deux Sèvres
- 5 : Charente
- 6 : Centre – Nord Limousin
- 7 : Ile de France
- 8 : Lorraine
- 9 : Alsace
- 10 : Nord - Rhône
- 11 : Aquitaine
- 12 : Midi-Pyrénées

Site de la zone Nord

Site de la zone Sud

Figure 1 : Zonage territorial en secteurs d'intérêt et répartition des 24 sites d'essais

Secteur géographique	Département	Nom du site	Zone d'implantation
Secteur 1	59	Site 16	Nord
Secteur 1	59	Site 17	Nord
Secteur 1	80	Site 7	Nord
Secteur 2	50	Site 8	Nord
Secteur 3	35	Site 9	Nord
Secteur 3	49	Site 3	Nord
Secteur 3	49	Site 18	Nord
Secteur 4	79	Site 1	Nord
Secteur 4	85	Site 21	Nord
Secteur 5	17	Site 2	Sud
Secteur 6	03	Site 6	Sud
Secteur 6	18	Site 24	Sud
Secteur 6	23	Site 5	Sud
Secteur 7	72	Site 19	Nord
Secteur 7	10	Site 10	Nord
Secteur 8	57	Site 11	Nord
Secteur 8	54	Site 20	Nord
Secteur 10	01	Site 12	Sud
Secteur 11	33	Site 13	Sud
Secteur 11	64	Site 23	Sud
Secteur 12	65	Site 4	Sud
Secteur 12	81	Site 22	Sud
Secteur 12	82	Site 14	Sud
Secteur 12	12	Site 15	Sud

Tableau 1 : Liste des sites d'implantation des CIVE à cycle court en fonction des secteurs géographiques

Secteur géographique	Département	Nom du site	Zone d'implantation
Secteur 1	59	Site H	Nord
Secteur 3	49	Site B	Nord
Secteur 3	49	Site C	Nord
Secteur 6	18	Site E	Sud
Secteur 6	23	Site F	Sud
Secteur 8	57	Site I	Nord
Secteur 10	01	Site J	Sud
Secteur 11	33	Site K	Sud
Secteur 11	64	Site L	Sud
Secteur 12	65	Site D	Sud
Secteur 12	12	Site G	Sud

Tableau 2 : Liste des sites d'implantation des CIVE à cycle long en fonction des secteurs géographiques

2.2. Couverts étudiés

Selon le même principe que les essais menés en 2012, le but des essais de CIVE estivales est de comparer les rendements de cultures énergétiques (maïs, sorgho) à ceux de couverts dédiés à la culture intermédiaire. Pour les CIVE d'hiver, le choix s'est porté sur des couverts classiquement utilisés pour la production fourragère.

Ce sont 9 couverts à cycle court (Tableau 3) et 3 couverts à cycle long (Tableau 4) qui ont été étudiés. Les mélanges sont favorisés par rapport aux espèces seules, car ils ont un impact environnemental plus élevé [1]. Certains couverts à cycle court ont été implantés uniquement dans le Sud, comme ceux contenant du Millet, contrairement aux couverts à cycle long qui sont implantés aussi bien dans la zone Nord que dans le Sud. En effet, le Millet est une plante tropicale qui a besoin d'une forte somme de température. D'autre part, le Maïs a été implanté uniquement chez les agriculteurs intéressés par cette culture. Le Maïs implanté est une espèce « très précoce à précoce » quelque soit la région d'implantation.

La densité des couverts a été imposée afin d'avoir un développement et un rendement biomasse optimums.

Espèces	Nomenclature ACV	Densité (kg/ha)	Zone d'implantation
Maïs	Maïs	1 dose*	Nord/Sud
Sorgho fourrager BMR[1]	Sorgho+BMR	25	Nord/Sud
Sorgho fourrager	Sorgho	25	Nord/Sud
Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis	Mélange 1 ou M 1	20	Nord/Sud
Moha/Nyger/Tournesol/Vesce	Mélange 2 ou M 2	20	Nord/Sud
Moha/Trèfle	Mélange 3 ou M 3	30	Nord/Sud
Avoine/Vesce/Trèfle	Mélange 4 ou M 4	35	Nord/Sud
Millet/Trèfle	Mélange 5 ou M 5	30	Sud
Millet/Nyger/Lentille/Trèfle	Mélange 6 ou M 6	20	Sud

**1 dose = 100 000 grains/ha*

Tableau 3 : Liste des couverts à cycle court étudiés en fonction des zones d'implantation

Espèces	Nomenclature ACV	Densité (kg/ha)	Zone d'implantation
Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce	Mélange A ou CL A	150	Nord/Sud
Ray-grass/Trèfle	Mélange B ou CL B	35	Nord/Sud
Seigle/Vesce/Trèfle	Mélange C ou CL C	30	Nord/Sud

Tableau 4 : Liste des couverts à cycle long étudiés en fonction des zones d'implantation

Les caractéristiques des couverts implantés sont présentées en Annexe 1 et en Annexe 2.

[1] BMR : Brown Mid Rib, Nervure Centrale Marron, gène qui réduit de 40 à 60% de taux de lignine dans la plante.

2.3. Protocole implantation

Les couverts ont été implantés sur des parcelles d'environ 1 ha. Ces parcelles sont séparées en 7 ou 9 bandes de couverts pour les CIVE à cycle court, selon que le site d'implantation se situe dans la zone Sud ou dans le Nord (Figure 2), et 3 bandes pour les CIVE à cycle long.
Chaque bande fait 150 m de long et 6 à 8 m de large en fonction du semoir utilisé. La parcelle est entourée d'une bande d'environ 10 m de large pour limiter les effets de bord.

L'itinéraire technique d'implantation est laissé libre à l'agriculteur, car il dépend fortement du matériel disponible sur l'exploitation et des pratiques de l'exploitant. L'agriculteur doit également choisir la parcelle où va se dérouler l'essai. Cette parcelle doit obligatoirement avoir reçu une culture d'hiver, type céréale, et doit être le plus homogène possible. Par contre, la densité de semis des couverts a été imposée.

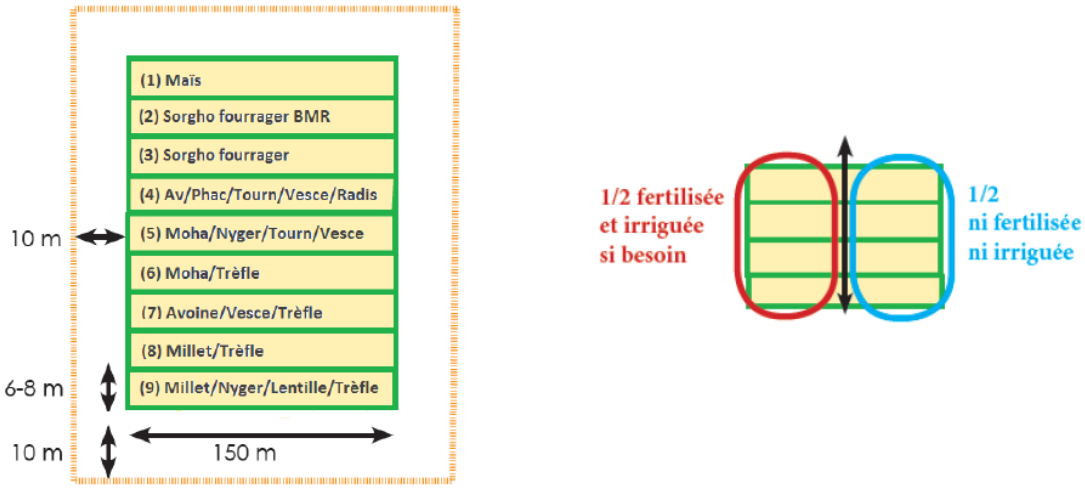


Figure 2 : Schéma d'un bloc d'essai dans la zone Sud et schéma de principe pour l'irrigation et/ou la fertilisation de la parcelle

La date d'implantation a été fixée entre début Juillet et mi-Août. Il est conseillé d'implanter le plus tôt possible après la récolte du précédent pour préserver au maximum la réserve en eau du sol.
Pour ce qui est de la fertilisation et de l'irrigation, elles étaient autorisées sous réserve que les agriculteurs ne traitent que la moitié de la parcelle.

2.4. Protocole récolte

La récolte est faite par pesée géométrique. Pour chaque bande de couvert, 3 échantillons sont prélevés selon le protocole suivant :

- 1 carré de 1 m^2 est délimité,
- le couvert contenu dans le carré est découpé, à la cisaille, à la hauteur d'une barre de coupe, c'est-à-dire environ 10 cm du sol,
- il est pesé (m_1) à l'aide d'un sac taré ($m_{1\ tare}$) pour calculer le rendement en matière brute (Équation 1),
- il est broyé pour que l'échantillon soit le plus homogène possible,
- un échantillon est prélevé (m_2), puis séché dans des sacs perforés tarés ($m_{2\ tare}$) prévus à cet effet,
- une fois sec, les sacs sont pesés (m_3).

Équation 1 : R_{MB} (tMB/ha) = $(m_1 - m_{1\ tare}) * 10\ 000$

R_{MB} : rendement en matière brute en tonne par hectare (tMB/ha)
m_1 : masse de la coupe récoltée sur 1 m^2 en tonne (t)
$m_{1\ tare}$: masse du sac de pesé en tonne (t)

Les 3 coupes de chaque bande sont mélangées, puis un échantillon d'un kilogramme est prélevé afin de faire l'analyse de potentiel méthanogène.

2.5. Analyse des échantillons

Les analyses, effectuées sur les échantillons récoltés sur chaque site sont :

- la mesure des matières sèches, réalisée par Caussade semence, afin de déterminer les rendements agronomiques de chaque couvert,
- la mesure de potentiel méthane, réalisée par l'INRA Transfert Environnement de Narbonne, afin de déterminer le rendement énergétique de chaque couvert en Nm^3 de méthane par hectare.

2.5.1. Mesure de matière sèche

Les sacs perforés, contenant les couverts végétaux humides, sont mis dans des caisses en métal alimentées avec un flux d'air chaud (environ 90°C). Au bout de 4 jours, les sacs sont pesés (m_3) afin de calculer le rendement en matière sèche de la coupe (Équation 2).

Équation 2 : R_{MS} (tMS/ha) = $\frac{m_3 - m_{2\,tare}}{m_2 - m_{2\,tare}} \times R_{MB}$

R_{MS} : rendement en matière sèche en tonne par hectare (tMS/ha)
R_{MB} : rendement en matière brute en tonne par hectare (tMB/ha)
m_2 : masse de la coupe prélevée pour la mesure de matière sèche en gramme (g)
m_3 : masse de la coupe après séchage en gramme (g)
$m_{2\,tare}$: masse du sac perforé en gramme (g)

2.5.2. Mesure de potentiel méthanogène

La mesure du potentiel méthanogène est réalisée dans des fioles de 500 ml, placées dans une étuve agitée, thermostatée à 35°C. Pour chaque mesure du potentiel méthane, l'essai est réalisé en double (2 essais en parallèle).

L'échantillon étudié est préalablement caractérisé selon les paramètres suivants : matière sèche (MS), matière volatile (MV) et les teneurs en azote total, en phosphore et en potassium.

Avant l'introduction des échantillons à étudier dans les fioles, celles-ci sont maintenues quelques jours sans alimentation afin d'épuiser la charge organique résiduelle contenue dans les boues anaérobies utilisées comme inoculum.

Une quantité connue d'échantillon est ensuite ajoutée dans les fioles. Les micro-organismes dégradent la matière organique apportée ce qui se traduit par la production de biogaz. A la fin de cette phase de réaction, la vitesse de production de biogaz chute, signe de la fin de la biodégradation de la matière organique.

La production de biogaz est mesurée au cours du temps et la composition du biogaz produit est analysée tout au long du suivi de l'essai par chromatographie en phase gazeuse. Le potentiel méthane de chaque échantillon est déterminé à partir de la quantité cumulée de méthane produit dans chaque fiole.

Pour chaque essai, un témoin ou blanc est réalisé afin de mesurer l'activité endogène des boues anaérobies. Pour cela, une fiole, ne contenant que de l'inoculum, est maintenue sans alimentation pendant toute la durée de l'expérimentation.

2.6. Calcul du coût de production des couverts

Le coût de production calculé dans le cadre de cette étude est la somme : du coût d'intrants, du coût d'implantation, du coût de fertilisation, du coût de récolte et du coût de main d'œuvre. Chacun de ces coûts est détaillé en suivant.

2.6.1. Coût d'intrants

Le coût d'intrants se limite au coût de semence. Il est calculé à partir :

- des prix de semences fournis par Caussade semences
- de la densité de semis de chaque couvert (Tableau 3 et Tableau 4).

La formule de calcul est présentée en Équation 3.

Équation 3 : Cs (€/ha) = p x d

Cs : coût d'intrants en euro par hectare (€/ha)
p : prix de la semence en euro par kilogramme (€/kg)
d : densité de semis du couvert en kilogramme par hectare (kg/ha)

2.6.2. Coût d'implantation

Le coût d'implantation est relatif aux coûts de mécanisation nécessaires à l'implantation des couverts étudiés, à savoir les outils employés et le ou les tracteurs utilisés. Ces coûts ont été calculés à l'aide du Barème Entraide 2012/2013 [2] et ils intègrent le coût de carburant.

Dans un premier temps, les itinéraires techniques d'implantation de chaque site ont été répertoriés. La surface de la parcelle, le nombre d'actions pour l'implantation et le matériel utilisé ont été recensés.

Pour les outils, nous avons pris, dans le barème Entraide 2012/2013, le coût d'utilisation par hectare du matériel utilisé par l'agriculteur responsable du site d'essai. Lorsque celui-ci ne correspondait pas au matériel référencé dans le barème, nous avons alors choisi celui qui s'en rapprochait le plus. La surface annuelle d'utilisation a été choisie en fonction des indications données par les agriculteurs, souvent elle correspondait à la surface moyenne.

Pour le coût de tracteur, les hypothèses de calcul étaient les suivantes : le tracteur utilisé avait 4 roues motrices et il était utilisé 700 heures par an. Ensuite, nous avons déterminé le coût d'utilisation par heure en tenant compte de la puissance du tracteur, qui variait selon le site. Finalement, le coût d'utilisation par heure est divisé par la performance de chaque outil (Équation 4).

Équation 4 : Ct (€/ha) = Cth x P

Ct : coût d'utilisation du tracteur, carburant inclus, en euro par hectare (€/ha)
Cth : coût d'utilisation horaire du tracteur, carburant inclus, en euro par heure (€/h)
P : performance du l'outil attelé au tracteur en hectare par heure (ha/h)

Le coût d'implantation est la somme des coûts de matériel et d'utilisation du tracteur pour chaque action (Équation 5).

Équation 5 : Ci (€/ha) = $\sum_{1}^{n}(Cm + Ct)$

Ci : coût d'implantation des couverts, carburant inclus, en euro par hectare (€/ha)
n : nombre d'actions de l'itinéraire technique d'implantation
Cm : coût d'utilisation du matériel, carburant inclus, en euro par hectare (€/ha)
Ct : coût d'utilisation du tracteur, carburant inclus, en euro par hectare (€/ha)

2.6.3. Coût de fertilisation

Sur les sites qui ont fertilisé la moitié de la parcelle d'essai, nous avons relevé : le type d'engrais utilisé (fumier, lisier, digestat ou urée), le type de matériel utilisé, la quantité d'engrais épandu et la puissance du tracteur utilisé.

Selon la même méthode que celle citée ci-dessus, nous avons choisi, dans le barème Entraide 2012/2013, le matériel le plus proche de celui utilisé par l'agriculteur. Lorsque le coût d'utilisation du barème était exprimé en euro par voyage, nous avons calculé ce coût en suivant la formule présentée Équation 6.

Équation 6 : Cmf (€/ha) = Cmfv x (V/S)

Cmf : coût du matériel utilisé pour la fertilisation dont carburant en euro par hectare (€/ha)
Cmfv : coût du matériel utilisé pour la fertilisation, carburant inclus, en euro par voyage
V : nombre de voyage pour épandre l'engrais
S : surface de la parcelle d'étude qui a été fertilisée (ha)

En parallèle, le coût d'utilisation du tracteur a été calculé : soit en utilisant l'Équation 4 quand la performance était en heure par hectare, soit avec l'Équation 7 quand la performance était en voyage par heure.

Équation 7 : Ctf (€/ha) = Ctfh/(Pv x V x S)

Ctf : coût du tracteur utilisé pour la fertilisation dont carburant en euro par hectare (€/ha)
Ctfv : coût d'utilisation du tracteur pour fertiliser, carburant inclus, en euro par heure (€/h)
Pv : performance de l'outil utilisé pour épandre l'engrais en voyage par heure (voyage/h)
V : nombre de voyage pour épandre l'engrais
S : surface de la parcelle d'étude qui a été fertilisée (ha)

Finalement, le coût de fertilisation a été établi en sommant le coût d'utilisation du matériel de fertilisation et celui du tracteur (Équation 8).

Équation 8 : Cf (€/ha) = Cmf +Ctf

Cmf : coût du matériel utilisé pour la fertilisation dont carburant en euro par hectare (€/ha)
Ctf : coût du tracteur utilisé pour la fertilisation dont carburant en euro par hectare (€/ha)

2.6.4. Coût de récolte

La récolte ayant été faite manuellement pour chaque site, nous n'avons pu évaluer le coût de récolte réel pour chaque site. Par conséquent, nous avons pris le coût affiché dans le barème Entraide 2012/2013 en se basant sur les hypothèses suivantes :

- récolte à l'ensileuse automotrice herbe-maïs,
- puissance de l'ensileuse 290 à 310 chevaux,
- volume de travail de 200 hectares par an,
- amortissement sur 7 ans à 15%.

2.6.5. Coût de main d'œuvre

Le coût de main d'œuvre est basé sur le coût horaire d'un salarié et le temps passé pour chaque action. Il est calculé selon la formule présentée Équation 9.

Équation 9 : Cmo (€/ha) = S_1 x (Tw + Tm) + S_2 x Tr

Cmo : coût de main d'œuvre en euro par hectare (€/ha)
S_1 : coût horaire d'un salarié agricole non qualifié en euro par heure (€/h)
Tw : temps passé pour implanter et fertiliser les couverts en heure par hectare (h/ha)
Tm : temps de manipulation du matériel en heure par hectare (h/ha)
S_2 : coût horaire d'un salarié agricole qualifié en euro par heure (€/h)
Tr : temps de récolte en heure par hectare (h/ha)

Le coût horaire d'un salarié non qualifié a été fixé à 15€/h selon le barème Entraide 2012/213 et 17€/h pour le salarié qualifié.

2.7. Méthodologie ACV

2.7.1. Unité fonctionnelle

L'étude compare les impacts environnementaux de plusieurs scénarios pour la culture des CIVE courtes et longues.
Les résultats d'impacts sont comparés sur la base d'une unité fonctionnelle permettant une comparaison pertinente: **1 normo mètre cube de méthane (Nm^3 de CH_4).**

2.7.2. Périmètre

L'ACV considère l'ensemble des flux de matière et d'énergie entrants et sortants. La Figure 3 présente le périmètre de l'étude ACV sur l'exemple de la production du mélange 1 sur le site S_i avec une fertilisation.

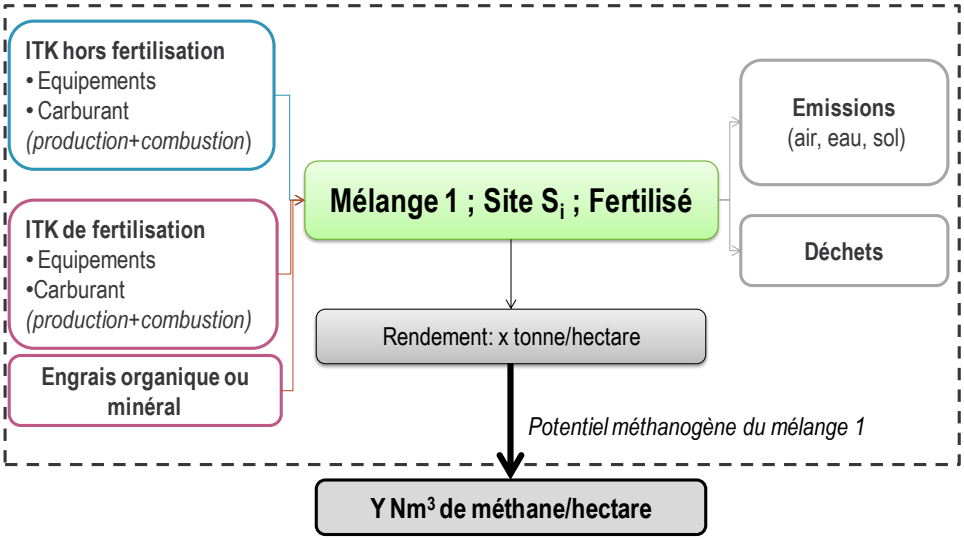


Figure 3 : Périmètre de l'ACV des cultures intermédiaires à vocation énergétique

La conversion du rendement massique en Nm^3 de méthane est réalisée sur la base du potentiel méthanogène. L'étape de méthanisation n'est pas comprise dans le périmètre de l'étude car elle n'est pas différenciante entre les systèmes étudiés.

2.7.3. Modèles d'émissions considérés

Pour le calcul des émissions vers l'eau, l'air et le sol, l'ensemble des modèles retenus dans le cadre du programme AGRIBALYSE®[2] a été conservé excepté pour la lixiviation des nitrates car le modèle proposé dans AGRIBALYSE® est trop dépendant des conditions locales du site étudié et n'est donc pas pertinent pour les objectifs de l'étude.

Compartiment	Emissions	Modèle retenu par Agribalyse
Air	**N_2O direct et indirect**	GIEC 2006b, Niveau 1
	NH_3	EMEP/EEA 2009 Niveau 2 (organique) et EMEP/CORINAIR 2006 (minéral)
	NOx	EMEP/EEA 2009, Niveau 1
	CO_2	GIEC 2006b Niveau 1 (Si apports d'urée)
Eau	**Nitrates**	*Modèle du GIEC ré-adapté*
	Phosphore lixiviés	SALCA-P
	ETM lixiviés	SALCA-SM -F
	Phosphore ruisselé	Non pris en compte (Hypothèse Agribalyse : pente <2%)
	& ETM ruisselés	Non pris en compte (Hypothèse Agribalyse : pente <2%)
Sol	**ETM**	SALCA-SM –F
	Pesticides	Aucune utilisation sur site

Tableau 5 : Modèles utilisés pour la prise en compte des émissions

Pour la lixiviation des nitrates, le modèle du GIEC n'est pas non plus directement pertinent par rapport aux objectifs de l'étude car il n'intègre pas la sensibilité de ce flux face :

- au temps d'inter-culture: longue ou courte,
- à l'absence ou non d'un couvert végétal,
- aux fertilisations apportées.

En effet, le modèle du GIEC pour la lixiviation des nitrates ne prend en compte que la dose d'engrais minéral (N_{synth}) ou organique (N_{org}) apportée. Il a donc été proposé d'ajouter une émission de base ($N_{baseline}$) afin

[2] Koch P. and Salou T., 2013. AGRIBALYSE®: Rapport Méthodologique – Version 1.1. Mars 2014. Ed ADEME, Angers, France. 386 p.

d'introduire le temps d'inter-culture (longue ou courte) ainsi que la présence ou l'absence d'un couvert végétal dans le calcul.
Ainsi, le modèle présenté Équation 10 a été utilisé pour le calcul de la lixiviation des nitrates ($N_{lixivié}$) dans le cadre de ce projet :

Équation 10 : $N_{lixivié} = N_{baseline} + 30\% \, (N_{interculture\ longue} + N_{interculture\ courte})$

Le premier terme est adapté de la grille COMIFER (Arvalis) en considérant un risque milieu moyen[3] (Tableau 6). Le second terme est le calcul de la lixiviation des nitrates selon le modèle du GIEC 2006.

Quantité de nitrates (kg N-NO_3^- /ha par interculture)	**Interculture longue**	**Interculture courte**
Sol nu (Risque culture=5)	= 50[3] x 100%[4]= **50**	= 50 x 20%[3] = **10**
Couvert végétal (CIVE ou CIPAN)	= 50 x 0,5[5]= **25**	= 10 x 0,5[4] = **5**

Tableau 6 : Calcul du terme $N_{baseline}$

2.7.4. Indicateurs d'impacts retenus

Afin de garantir une clarté de présentation, les catégories d'impacts pertinentes par rapport au contexte de l'étude qui ont été retenues, sont les suivantes :

Indicateurs	**Unité**	**Méthode de l'indicateur d'impact**	**Méthode de l'indicateur de flux**
Changement climatique	kg CO_2 eq	ILCD	
Eutrophisation marine	kg N eq	ILCD	
Eutrophisation eau douce	kg P eq	ILCD	
Acidification	molc H^+ eq	ILCD	
Epuisement des ressources naturelles	kg Sb eq	ILCD	
Ecotoxicité aquatique en eau douce	CTU eq	ILCD	
Occupation de l'espace agricole	m^2		Recipe
Consommation d'eau[6]	m^3		Recipe
CED ou NER[7] = Energie valorisable / CED (renouvelable[8] et non renouvelable)	MJ ou sans dimension		CED

Tableau 7 : Indicateurs d'impacts environnementaux retenus pour l'étude

[3] 50 kg N-NO_3^- /ha par campagne culturale (Modèle COMIFER pour Risque milieu moyen x Risque culture fort)
[4] Lixiviation nitrates → 100% pendant l'inter-culture longue ; **20%** si inter-culture courte (Echanges avec M. Cohan-Arvalis)
[5] La présence d'un couvert végétal réduit de **50%** les émissions []
[6] V2.2 Ecoinvent (version utilisée par BDD Agribalyse) ne permettant pas de calculer une empreinte eau de manière pertinente tel que préconisé par ILCD, seul un indicateur de flux de consommation d'eau a été calculé
[7] NER = Net Energie Ratio = quantité d'énergie produite par unité d'énergie investie
[8] Hors énergie solaire prélevée par la plante

3. Résultats

Nous avons réalisé des essais en plein champ sur la période estivale et hivernale afin de sélectionner des couverts végétaux adaptés à la co-digestion dans différentes régions françaises. Après avoir découpé la France en 12 secteurs, nous avons sélectionné 24 sites d'essais pour les CIVE à cycle court et 11 sites pour les CIVE à cycle long.

Comme dit précédemment, l'itinéraire technique d'implantation est laissé libre aux agriculteurs responsables des sites, car il dépend fortement du matériel disponible sur l'exploitation et des pratiques de l'exploitant. Les techniques culturales simplifiées et le semis direct est conseillé afin de diminuer les coûts de production mais également réduire les émissions de CO_2 et améliorer la qualité des sols. La fertilisation et/ou l'irrigation de l'essai sont autorisées à condition que ce traitement ne soit fait que sur la moitié de la parcelle. Contrairement à l'année précédente, aucune répétition n'a été demandée car l'implantation était trop fastidieuse. Ainsi, nous avons fait des bandes de couverts plus grandes (d'environ 1 000 m^2).

3.1. Potentiel agronomique des couverts

3.1.1. CIVE à cycle court

a. Bilan des récoltes

Seuls 18 sites ont été récoltés sur les 24 implantés (Tableau 8). Le printemps 2013 ayant été humide, les récoltes des précédents ont eu lieu assez tardivement repoussant d'autant l'implantation des couverts. Finalement, les sites non récoltés sont situés dans les mêmes zones qu'en 2013, comme dans le Cher ou la Meurthe-et-Moselle.

Les dates d'implantation ont été respectées (entre début Juillet et le 15 Août 2013) à part pour les sites 22, 23 et 24 qui ont implanté les couverts trop tard. Ces sites n'ont pas été retenus pour le calcul de rendement.

Les agriculteurs ont implanté les couverts en 2 actions (déchaumage et semis) ou 3 actions (déchaumage, semis et roulage). Certains ont décidé de ne pas implanter de Maïs, car ce couvert ne les intéressait pas comme culture intermédiaire. Certains ont fertilisé les parcelles et un seul (site 4) a été fertilisé et irrigué. Comme demandé, ces traitements ont été faits sur la moitié de la parcelle. Le site 1 ayant fertilisé la totalité de l'essai, il n'a pas été retenu dans la suite de l'étude.

Le temps d'implantation a été calculé avec les dates d'implantation et de récolte. Globalement, il est compris entre 80 et 100 jours.

Site	Dépt	Zone	Maïs	Date semis	Nb actions ITK	Traitement	Date récolte	Temps d'implantation	Site retenu
Site 1	79	N	Non	04/07	3	Fertilisation	09/10	105 jours	Non
Site 2	17	N	Oui	01/08	3	Fertilisation	13/11	104 jours	Oui
Site 3	49	N	Oui	14/08	2	x	12/11	90 jours	Oui
Site 4	65	S	Non	30/07	3	Ferti et Irrigation	25/10	87 jours	Oui
Site 5	23	S	Oui	11/08	2	Fertilisation	06/11	87 jours	Oui
Site 6	03	S	Non	02/08	3	x	24/10	83 jours	Oui
Site 7	80	N	Oui	23/07	3	x	17/10	86 jours	Oui
Site 8	50	N	Oui	04/08	3	Fertilisation	23/10	80 jours	Oui
Site 9	35	N	Oui	05/08	3	x	23/10	79 jours	Oui
Site 10	10	N	Oui	31/07	3	x	15/10	76 jours	Oui
Site 11	57	N	Oui	15/08	3	x	15/10	61 jours	Oui
Site 12	01	S	Oui	02/08	3	x	21/10	80 jours	Oui
Site 13	33	S	Oui	09/08	3	Fertilisation	07/11	90 jours	Oui
Site 14	82	S	Oui	15/08	3	x	18/11	95 jours	Oui
Site 15	12	S	Oui	30/07	3	Fertilisation	23/10	85 jours	Oui
Site 16	59	N	Oui	30/07	3	x	16/10	78 jours	Oui
Site 17	59	N	Non	25/07	3	x	16/10	83 jours	Oui

Site 18	49	N	Non	13/08	3	Fertilisation	12/11	91 jours	Oui
Site 19	72	N	Oui	01/08	2	x	-	-	Oui
Site 20	54	N	Non	15/08	3	x	-	-	Oui
Site 21	85	N	Non	12/08	2	x	-	-	Oui
Site 22	81	S	Oui	23/08	3	x	-	-	Non
Site 23	64	S	Non	23/08	3	x	-	-	Non
Site 24	18	S	Non	10/09	2	Fertilisation	-	-	Non

x : Aucun traitement ; - : Pas de récolte

Tableau 8 : Liste des sites d'implantation et leurs données spécifiques pour l'essai CIVE à cycle court

b. Rendements agronomiques des CIVE à cycle court

L'un des points essentiels dans le choix d'une CIVE est son potentiel agronomique. Le Tableau 9 présente les résultats de rendement obtenus pour chaque couvert sur l'ensemble des sites. Le rendement moyen présenté ici tient compte des rendements obtenus sur la partie non fertilisée des 17 sites récoltés plus les 3 sites non récoltés, car ils représentent le risque pris par l'agriculteur que le couvert implanté ne pousse pas.
Les rendements varient beaucoup quelle que soit la culture étudiée, comme le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce dont les rendements sont compris entre 0 et 10 tMS/ha. **Nous pouvons noter que les rendements minimum sont tous nuls, car l'ensemble de ces couverts n'a pas poussé sur au moins un site voire plusieurs.**

Certains mélanges ont des rendements supérieurs au Maïs et aux Sorghos, qui sont pourtant des références biomasse. A partir du mois de Juillet la photopériode est décroissante alors que ces espèces sont à photopériode croissante, nous pouvons donc nous demander si ces espèces sont de bonnes références. Cependant, les sorghos fourragers sont plus sensibles à la chaleur qu'à la lumière [3] et le maïs a donné de très bons rendements dans certains départements, comme dans l'Ain et le Nord.

Espèces	**Rdt minimum (tMS/ha)**	**Rdt maximum (tMS/ha)**	**Rdt moyen (tMS/ha)**
Maïs	0,0	7,0	2,5
Sorgho fourrager BMR	0,0	5,2	2,1
Sorgho fourrager	0,0	6,7	2,0
Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis	0,0	8,9	2,8
Moha/Nyger/Tournesol/Vesce	0,0	10,0	4,1
Moha/Trèfle	0,0	6,0	2,3
Avoine/Vesce/Trèfle	0,0	6,2	2,1
Millet/Trèfle	0,0	6,8	3,6
Millet/Nyger/Lentille	0,0	7,9	3,7

Tableau 9 : Rendements minimum, maximum et moyens obtenus pour les CIVE à cycle court en tonnes de matière sèche par hectare

Sur cet essai, c'est le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce qui a donné les meilleurs rendements quelle que soit la zone d'implantation. Se pose ici la question de l'influence du type de culture et du site d'implantation sur les rendements agronomiques.
Nous avons également pu observer que la durée d'implantation a peu d'influence sur le rendement des couverts contrairement à la date d'implantation (Annexe 3). En effet, les sites ayant implanté les couverts avant la fin Juillet ont de meilleurs rendements que ceux ayant implanté les couverts avant le 08 Août, qui eux même ont de meilleurs rendements que ceux dont les couverts ont été implantés juste avant le 15 Août. Malheureusement pour valider cette hypothèse il aurait fallu réaliser les implantations à des dates différentes sur un même site.

Globalement, les rendements obtenus en 2013 sont meilleurs qu'en 2012 à part pour le Sorgho fourrager et le Maïs (Figure 4). Cet écart est sans doute dû aux implantations tardives de l'été 2013.

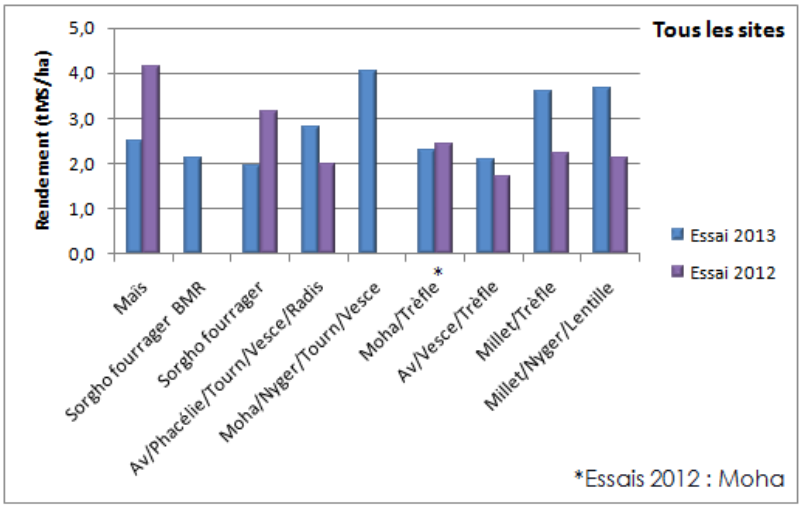


Figure 4 : Comparaison des rendements agronomiques de certains couverts obtenus en 2012 et 2013

Sur l'ensemble des deux années d'essai aucune maladie, ni parasite n'ont touché les cultures. Nous avons pu noter que certaines parcelles présentaient :

- des repousses de cultures précédentes, surtout quand c'était de l'orge ou du colza,
- des adventices, surtout lorsque les couverts ne sont pas sortis rapidement après le semis. Pourtant, les cultures intermédiaires peuvent diminuer le salissement des parcelles si la biomasse est assez dense [4].

La fertilisation semble améliorer de 30 à 70% le rendement des couverts (Figure 5). Pour cette comparaison, nous avons pris uniquement les 6 sites récoltés qui avaient fertilisé la moitié de la parcelle d'essai. Dans la partie suivante, nous essaierons d'évaluer si l'impact de la fertilisation est significatif ou pas.
Les agriculteurs ont fertilisé soit avec un engrais organique (digestat, lisier porcin, fumier bovin), soit avec un engrais minéral (urée). Par contre, la quantité à appliquer était limitée à 50 unités d'azote par hectare.

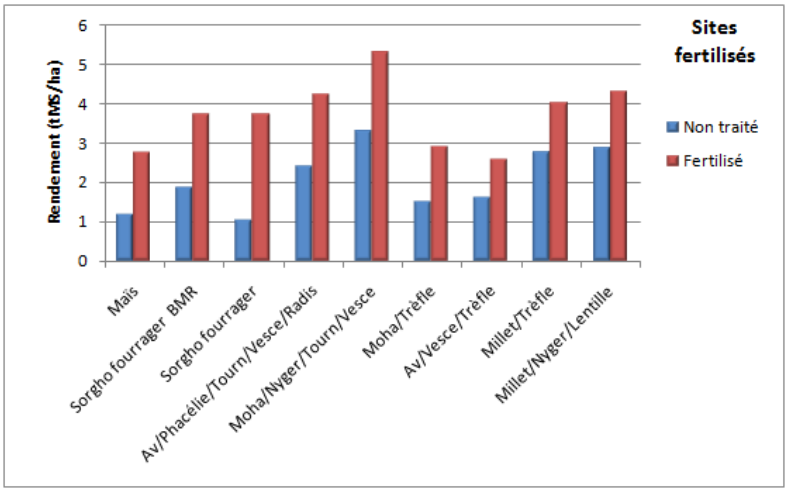


Figure 5 : Comparaison des rendements agronomiques des couverts fertilisés et non fertilisés

Certains couverts ont été implantés dans la zone Nord et dans la zone Sud. Il apparaît que les Sorghos, le Maïs et le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce ont de meilleurs rendements dans la zone Sud (Annexe 4). De même, le mélange Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis a des meilleurs rendements dans la zone Nord.

Afin de vérifier, si le type de culture, le traitement appliqué aux couverts et la région d'implantation ont une influence sur le rendement des cultures nous avons décidé de traiter statistiquement les données que nous avons obtenues.

c. Influences de différents facteurs sur le rendement des couverts

Dans un premier temps, nous avons étudié la dispersion des données à l'aide de boîtes à dispersion. Ces boîtes ont l'avantage de présenter visuellement les paramètres d'une série statistique, mais elles ne permettent pas de valider statistiquement les données obtenues lors de l'essai. Ainsi, nous avons décidé de réaliser une analyse de variance ou ANOVA (Annexe 5).

Le premier facteur étudié était le type de culture. Ensuite, ce sont : le site d'implantation, la zone d'implantation et la fertilisation qui ont été étudiés.

Le résultat des boîtes de dispersion pour le facteur type de culture est présenté Figure 6. Les rectangles qui forment ces boîtes représentent 50% des données. La moyenne des rendements est représentée par le trait noir épais contenu dans ces rectangles.
Nous pouvons ici voir que les données sont assez dispersées, donc les rendements ont une grande variabilité. Le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce ressort avec le rendement moyen le plus élevé. Une étude similaire sur les rendements moyens des couverts en fonction des sites d'implantation a montré que les sites ayant réalisé les implantations avant le 1er Août se démarquent positivement (sites 4, 7, 10, 16,17) (Annexe 6). Les sites 12 et 14 n'ont pas été pris en compte dans l'analyse de données, car ces sites n'avaient pas implanté tous les couverts.

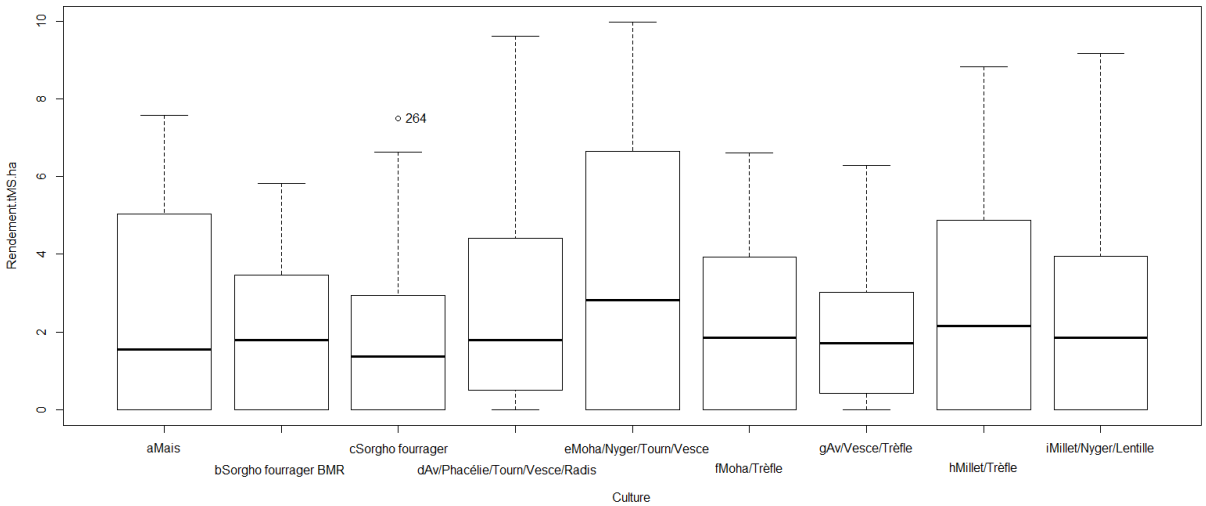


Figure 6 : Boîte de dispersion du rendement moyen des couverts en fonction du type de culture pour les CIVE à cycle court

L'analyse statistique des données a été faite par analyse de variances (ANOVA) à deux facteurs. Dans un premier temps, les deux facteurs étudiés étaient : le site d'implantation et le type de culture.
Dans cet exemple, l'hypothèse nulle est que : toutes les cultures et les sites ont le même effet sur le rendement agronomique.

Afin d'étudier l'interaction entre les deux facteurs nous avons tout d'abord étudié :
- tous les sites ayant implanté les couverts communs aux zones Sud et Nord sauf le Maïs,
- tous les sites ayant implanté les couverts communs aux zones Sud et Nord et du Maïs,
- tous les sites ayant implanté les couverts communs dans la zone Sud sauf le Maïs,
- tous les sites ayant implanté les couverts communs dans la zone Sud et du Maïs.

Facteurs	**ddl**	**SCE**	**SCE/ddl**	**F**	**Pr (>F)**
Culture	5	102,11	20,42	75,59	$<2,26.\ 10^{-16}$
Site	17	952,24	56,01	207,32	$<2,26.\ 10^{-16}$
Culture : Site	85	215,68	2,54	9,39	$<2,26.\ 10^{-16}$
Résidu	138	37,28	0,27		

ddl : degré de liberté ; SCE : somme des carrés des écarts ; F : test de Fisher ; Pr : probabilité d'obtenir l'hypothèse nulle
Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA à 2 facteurs pour le site d'implantation et le type de culture dans le cas des sites ayant implanté les couverts communs des zones Nord et Sud sauf le Maïs

Les résultats de ces ANOVA sont présentés en Tableau 10 et Annexe 7. Dans tous les cas, le modèle utilisé pour l'analyse statistique est un modèle avec interactions. L'hypothèse nulle est fausse quelle que soit la modalité étudiée, car la probabilité Pr est toujours inférieure à la variable de Fisher. Donc, l'ensemble des tests montre qu'au moins un des couverts et un des sites ont une influence sur le rendement.

L'analyse approfondie des données nous montre que pour l'ensemble des sites, avec ou sans Maïs, les mélanges Moha/Nyger/Trèfle/Vesce et Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis ont des rendements significativement supérieurs aux rendements des autres couverts (Annexe 8). Au contraire, le sorgho fourrager a des rendements significativement inférieurs aux rendements des autres CIVE. Les sites, qui ont des rendements significativement supérieurs aux rendements des autres couverts, sont les sites qui ont implanté les couverts avant le 1er Août, le site de la Manche (site 8) et le site situé en Gironde (site 13).
Nous avons décidé de faire une analyse statistique uniquement sur les sites de la zone Sud pour étudier l'influence des mélanges contenant du Millet. Les résultats mettent en avant que, sans prendre en compte le Maïs, le mélange Moha/Nyger/Trèfle/Vesce a des rendements supérieurs aux rendements des autres couverts et que le sorgho fourrager a des rendements inférieurs à eux. De même pour les sites, c'est le site (site 4) qui a implanté les couverts avant le 1er Août qui a des rendements supérieurs à la moyenne ainsi que le site situé en Gironde (site 13). Si l'étude statistique prend en compte le Maïs, alors c'est ce couvert qui a un rendement supérieur à la moyenne. Le mélange Avoine/Vesce/trèfle et les mélanges contenant le Millet ont des rendements significativement inférieurs à la moyenne. Cette analyse se basant uniquement sur 2 sites (sites 5 et 15), donc ces résultats devront être confirmés.

Dans le deuxième cas, les facteurs étudiés sont : la région et le type de culture. Le modèle statistique établi est un modèle sans interaction avec ou sans Maïs (Tableau 11).

Facteurs	**ddl**	**SCE**	**SCE/ddl**	**F**	**Pr (>F)**
Culture	5	107,85	18,82	21,57	$8,77.\ 10^{-4}$
Région	1	12,52	12,52	18,76	$1,15.\ 10^{-1}$
Résidu	239	1192,68	4,99		

ddl : degré de liberté ; SCE : somme des carrés des écarts ; F : test de Fisher ; Pr : probabilité d'obtenir l'hypothèse nulle

Tableau 11 : Résultats de l'ANOVA à 2 facteurs pour la région et le type de culture dans le cas des sites ayant implanté les couverts communs des zones Nord et Sud sauf le Maïs

Un test de comparaison, pour toutes les cultures sauf le maïs, nous permet de mettre en avant les mêmes tendances que précédemment pour le type de culture, à savoir que : le mélange Moha/Nyger/Trèfle/Vesce a encore un rendement supérieur aux rendements des autres couverts tandis que le sorgho fourrager a un rendement significativement inférieur. Par contre la zone ne semble pas avoir d'impact sur le rendement (Annexe 9).
Si nous nous intéressons maintenant au test de comparaison de toutes les cultures y compris le maïs, nous pouvons voir que les mélanges Moha/Nyger/Trèfle/Vesce et Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis ont des rendements supérieurs aux rendements des autres couverts. Par contre, c'est la zone Nord qui a des rendements significativement supérieurs aux rendements de la zone Sud (Annexe 9).

En ce qui concerne la fertilisation, nous avons réalisé une ANOVA à 3 facteurs, car la culture et le site peuvent également avoir un impact sur le rendement au même titre que la fertilisation. Nous avons suivi la même logique que celle utilisée précédemment, à savoir faire une étude sur : les couverts communs sans le maïs sur les sites de la zone Nord et Sud, les couverts communs ainsi que le maïs sur les sites de la zone Nord et Sud, les couverts communs sans maïs sur les sites de la zone Sud et les couverts communs avec maïs sur les sites de la zone Sud (Annexe 10).
Dans tous les cas, le modèle utilisé est un modèle avec interactions. L'hypothèse nulle est toujours fausse donc au moins une culture, un site et la fertilisation ont un effet sur le rendement des couverts. La fertilisation donne toujours des rendements significativement supérieurs aux rendements des autres couverts.

3.1.2. CIVE à cycle long

a. Bilan des récoltes

Pour les CIVE à cycle long, 6 sites sur 11 ont été récoltés (Tableau 12). En effet, les récoltes sur certains sites n'ont pu être faites, car les agriculteurs, souhaitant préparer leurs terres en vue de l'implantation de la culture de maïs suivante, ont retourné les couverts. A priori, les 5 sites non récoltés auraient dû l'être, nous n'avons donc pas pris en compte ces sites dans l'analyse des résultats.

Site	Dépt	Zone	Date semis	Nb actions ITK	Traitement	Date récolte	Temps d'implantation	Site retenu
Site A	64	S	02/09	3	x	-	-	Non
Site B	49	N	20/09	3	x	01/04	191 jours	Oui
Site C	49	N	30/09	2	Fertilisation	01/04	181 jours	Oui
Site D	65	S	09/10	3	Fertilisation	22/04	193 jours	Oui
Site E	18	S	10/09	2	Fertilisation	02/04	202 jours	Oui
Site F	23	S	15/09	3	Fertilisation	28/04	223 jours	Oui
Site G	12	S	15/09	3	Fertilisation	31/03	196 jours	Oui
Site H	33	S	14/09	3	x	-	-	Non
Site I	01	S	05/09	3	x	-	-	Non
Site J	57	N	22/09	3	Fertilisation	-	-	Non
Site K	59	N	30/09	3	Fertilisation	-	-	Non

x : Aucun traitement ; - : Pas de récolte

Tableau 12 : Liste des sites d'implantation et leurs données spécifiques pour l'essai CIVE à cycle long

Les dates de semis se situent toutes en Septembre 2013 à part pour le site D, situé dans les Hautes Pyrénées, qui a implanté début Octobre. Les agriculteurs ont implanté les couverts en 2 ou 3 actions. La majorité agriculteurs ont décidé de fertiliser les couverts. Cette fertilisation a été effectuée sur la moitié de la parcelle, comme demandé dans le protocole, avec des engrais organiques (fumier, lisier et digestat) ou minéraux (urée). La quantité appliquée était limitée à 70 unités d'azote par hectare.

Les récoltes ont été faites en 2 temps, une partie début Avril et une autre fin Avril 2014. Ces récoltes ont été faites en fonction de la date à laquelle les agriculteurs voulaient implanter leur maïs. Cependant, il est important de noter ici que plus les récoltes sont effectuées tardivement meilleurs sont les rendements, car certaines des espèces implantées, comme le seigle multicaule, expriment leur potentiel biomasse quand les températures printanières deviennent plus clémentes.
Le temps d'implantation des couverts était compris entre 180 et 220 jours.

b. Rendements agronomiques des CIVE à cycle long

Parmi les 3 couverts à cycle long implantés, c'est le couvert contenant du Ray-grass et du Trèfle qui a les meilleurs rendements (Tableau 13), puis le mélange de céréales immatures (Avoine/Triticale/Seigle/Pois/ Vesce). Le mélange Seigle/Vesce/Trèfle a donné des résultats plus décevants, car le seigle multicaule est une céréale qui commence à reprendre en végétation à partir de la fin Mars. Donc, lors de récoltes début Avril le mélange n'avait pas encore une biomasse suffisante. Cependant, même pour les récoltes après le 20 avril les rendements ne sont pas exceptionnels avec un rendement maximum faible (3,7 tMS/ha).

Espèces	Rdt minimum (tMS/ha)	Rdt maximum (tMS/ha)	Rdt moyen (tMS/ha)
Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce	1,4	5,2	3,2
Seigle/Vesce/Trèfle	0,0	3,7	0,9
Ray-grass/Trèfle	1,0	7,4	4,1

Tableau 13 : Rendements minimum, maximum et moyens obtenus pour les CIVE à cycle court en tonnes de matière sèche par hectare

Nous avons voulu évaluer l'impact de la date de la récolte sur les rendements des couverts. Les couverts récoltés précocement ont des rendements inférieurs à ceux des couverts récoltés tardivement (Figure 7).

D'où l'intérêt d'attendre le plus possible la fin du mois d'Avril pour que les couverts profitent au maximum des beaux jours du printemps pour produire de la biomasse. Par contre, il sera nécessaire d'adapter la précocité du maïs suivant, ce qui peut avoir pour conséquence de diminuer le rendement de ce dernier.

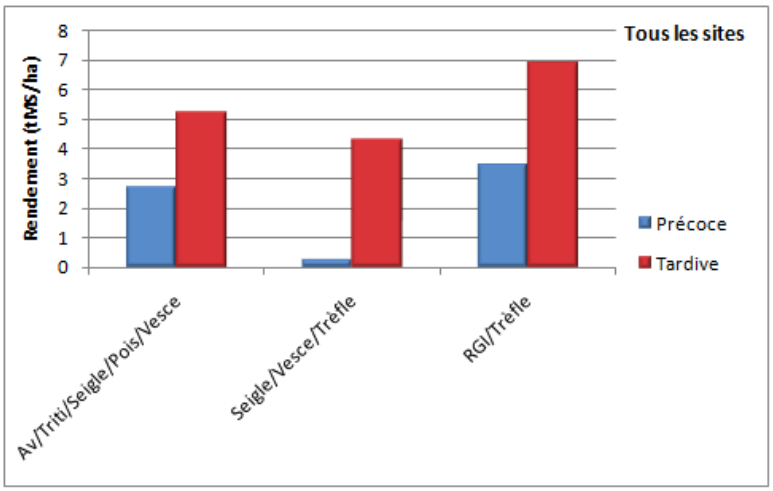


Figure 7 : Comparaison des rendements agronomiques des couverts à cycle long récoltés début Avril (précoce) et fin Avril (tardive)

Comme pour les CIVE à cycle court, nous nous sommes posé la question de savoir si la fertilisation avait un impact sur les rendements des CIVE à cycle long. A priori, il n'y a pas d'impact pour les mélanges Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce et Ray-grass/Trèfle (Figure 8). Par contre, pour le mélange Seigle/Vesce/Trèfle le rendement semble être augmenté de près d'une tonne de matière sèche par hectare.

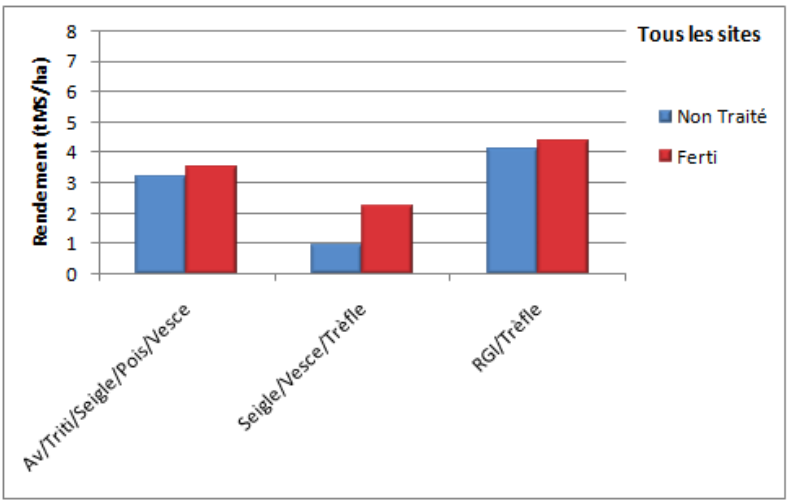


Figure 8 : Comparaison des rendements agronomiques des couverts à cycle long fertilisés et non fertilisés

Suite à l'analyse de ces résultats, nous nous sommes demandé quels étaient les impacts du type de culture, du site d'implantation, de la région et de la fertilisation sur les rendements des couverts. Nous avons donc réalisé une analyse statistique pour répondre à ces questions. L'impact de la date de récolte sur le rendement n'a pu être étudié, car pour cela il aurait fallu faire deux récoltes à des dates différentes sur un même site ce qui n'est pas le cas dans notre essai.

c. Influence de différents facteurs sur le rendement des couverts

Dans un premier temps, nous nous sommes d'abord intéressés aux facteurs : type de culture et site d'implantation.

Les boîtes de dispersion nous permettent de voir que les données de rendements sur les cultures sont dispersées. Le mélange Seigle/Vesce/Trèfle a le rendement moyen le plus faible (Figure 9). Pour les sites, ce sont les sites B, D et E qui ont les rendements moyens les plus élevés (Annexe 11).

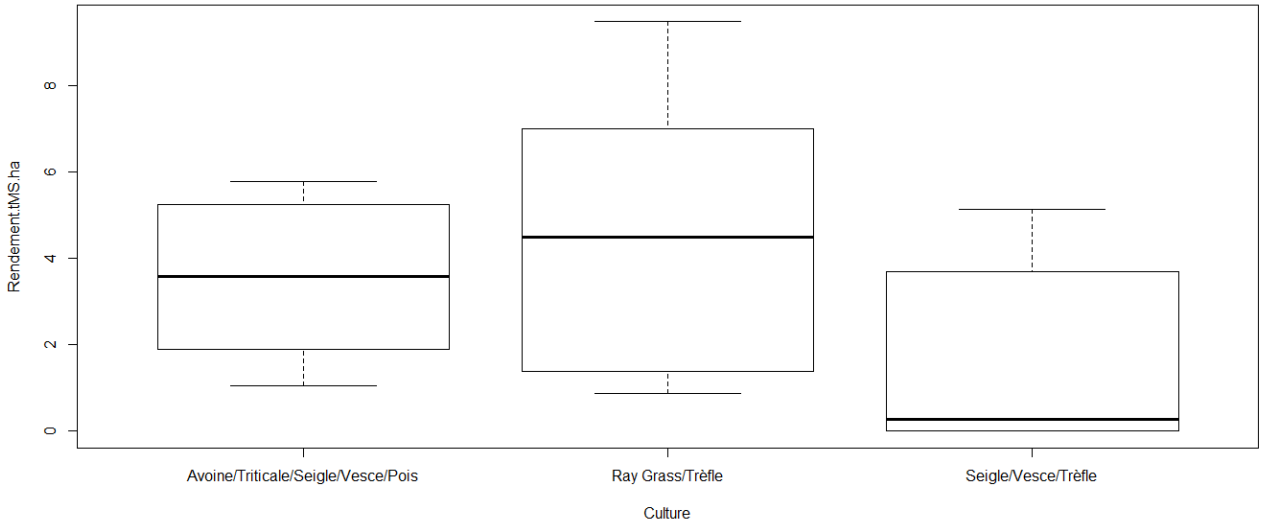


Figure 9 : Boîte de dispersion du rendement moyen des couverts en fonction du type de culture pour les CIVE à cycle long

Pour valider statistiquement ces tendances, nous avons réalisé une ANOVA à 2 facteurs. Le modèle utilisé est un modèle avec interactions (Tableau 14). L'hypothèse nulle est fausse étant donné que les probabilités Pr, pour ces 2 facteurs, sont inférieures à 5%, donc au moins une culture et un site d'implantation ont une influence sur le rendement des couverts à cycle long.

Facteurs	ddl	SCE	SCE/ddl	F	Pr (>F)
Culture	2	81,21	40,61	77,14	$8,65.\ 10^{-14}$
Site	5	187,66	37,53	71,30	$<2,2.\ 10^{-16}$
Culture : Site	10	54,06	5,41	10,27	$6,79.\ 10^{-8}$
Résidu	36	18,95	0,53		

ddl : degré de liberté ; SCE : somme des carrés des écarts ; F : test de Fisher ; Pr : probabilité d'obtenir l'hypothèse nulle

Tableau 14 : Résultats de l'ANOVA à 2 facteurs pour le site d'implantation et le type de culture pour les couverts à cycle long

Dans le cas de la culture, le mélange Ray-grass/Trèfle a des rendements significativement supérieurs aux rendements des autres couverts tandis que le mélange Seigle/Vesce/Trèfle a des rendements significativement inférieurs (Annexe 12). Ce résultat est en accord avec ce que nous avons pu voir dans le paragraphe précédent. Le ray-grass est une espèce qui se développe bien dès les premiers beaux jours, tandis que le seigle multicaule est une espèce qui a besoin d'une somme de température suffisamment importante pour se développer.
Pour les sites d'implantation, les sites ayant été récoltés fin Avril ont des rendements significativement supérieurs aux rendements des autres sites, comme le site des Hautes-Pyrénées et de la Creuse.

Dans un deuxième temps nous nous sommes intéressés aux facteurs : région et type de culture.
Le modèle utilisé dans ce cas est un modèle sans interaction. Seul le facteur type de culture est significatif et les résultats obtenus pourr les couverts sont identiques à ceux cités précédemment (Annexe 13).

Facteurs	ddl	SCE	SCE/ddl	F	Pr (>F)
Culture	2	81,21	40,61	8,15	$8,63.\ 10^{-4}$
Région	1	11,59	11,59	2,33	$1,33.\ 10^{-1}$
Résidu	50	249,08	4,98		

ddl : degré de liberté ; SCE : somme des carrés des écarts ; F : test de Fisher ; Pr : probabilité d'obtenir l'hypothèse nulle

Tableau 15 : Résultats de l'ANOVA à 2 facteurs pour la région et le type de culture pour les CIVE à cycle long

Finalement, nous nous sommes intéressés à l'influence de la fertilisation sur les facteurs type de culture et site d'implantation.

Pour cela, nous avons réalisé une ANOVA à 3 facteurs. Le modèle utilisé est un modèle avec interactions (Annexe 14). Seule l'interaction type de culture et site d'implantation est significative, donc la fertilisation n'a pas d'effet significatif sur le rendement que cela soit pour le site d'implantation ou le type de culture. Ainsi, pour les CIVE à cycle long, il n'est pas essentiel de fertiliser les couverts. Cependant, ces résultats doivent être confirmés, car les engrais utilisés sont de différentes natures (organiques et minérales) ce qui peut biaiser l'analyse statistique des résultats.

3.1.3. Conclusions

a. CIVE à cycle court

Pour les CIVE à cycle court, l'implantation a bien été faite entre début Juillet et le 15 Août. Les couverts sont restés sur champs entre 80 et 100 jours. Trois sites n'ont pas été récoltés, car les couverts n'avaient pas poussé. De même, sur certains sites nous n'avons pas pu récolter l'ensemble des couverts faute de biomasse. **Les mélanges Moha/Nyger/Tournesol/Vesce et Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis ont des rendements significativement supérieurs aux rendements des autres couverts pour l'ensemble des sites.** A l'inverse, le sorgho fourrager a des rendements significativement inférieurs. En ce qui concerne les sites situés dans la zone Sud, le Maïs a également des rendements supérieurs à ceux des autres couverts en plus des deux autres couverts cités ci-dessus. Les mélanges contenant du millet et le mélange Avoine/Vesce/trèfle ont des rendements inférieurs à ceux des autres couverts en plus du sorgho fourrager.
De manière générale, les sites qui ont implanté les couverts avant le 1er août ont des rendements supérieurs à ceux des autres sites. Ici, nous pouvons souligner la difficulté de cultiver des couverts sur des intercultures estivales, car la période est peu clémente avec des températures élevées et peu de pluie.
La zone d'implantation ne semble pas avoir d'impact pour les CIVE à cycle court communes aux deux zones (Nord et Sud). Par contre, quand nous prenons en compte le Maïs dans cette analyse, les rendements sont significativement supérieurs dans la zone Nord.
En ce qui concerne la fertilisation, les rendements sont supérieurs quand elle est pratiquée. Cependant, ces résultats sont à confirmer car, même si les quantités appliquées sont identiques, les engrais utilisés sont de nature différente.

b. CIVE à cycle long

Pour les CIVE à cycle long, les implantations ont été faites à la fin du mois de septembre pour une durée de 180 à 220 jours. Seulement 6 sites ont été récoltés sur les 11 implantés, car les couverts ont été retournés avant récolte.
Les mélanges Ray-grass/Trèfle et Avoine/triticale/Seigle/Vesce/Pois sont ceux qui produisent le plus de biomasse, ce qui a été validé lors de l'analyse statistique. Le mélange Seigle/Vesce/Trèfle a des rendements significativement inférieurs à la moyenne, car le Seigle multicaule est une espèce qui reprend en végétation vers la fin du mois de Mars voire le début du mois d'Avril. Par conséquent, ce mélange a besoin d'être récolté tardivement fin Avril – début Mai pour donner de bons rendements.
Côté sites d'implantation, **ce sont les sites qui ont fait des récoltes tardives, c'est-à-dire après mi-Avril qui ont les rendements les plus élevés**. Quant à la zone d'implantation et la fertilisation, ces deux facteurs ne semblent pas avoir d'impact sur le rendement des couverts à cycle long.
Nous pouvons noter ici que l'un des principaux atouts des CIVE à cycle long est de pouvoir implanter sur une période propice à la production de biomasse (temps clément, pluies régulières, …). Cependant, il est important de les laisser en place jusqu'à la fin du mois d'avril pour que les couverts expriment leur potentiel.

La quantité de biomasse produite par une CIVE est un paramètre essentiel pour choisir d'incorporer ou non cette matière dans la ration d'un digesteur, mais le coût de production va aussi fortement orienter le choix de l'espèce choisie.

3.2. Potentiel énergétique des CIVE étudiées

L'étude du potentiel méthanogène des couverts permet de compléter l'analyse des coûts de production pour évaluer leur intérêt comme couvert énergétique.

Le potentiel méthanogène de chaque couvert a été réalisé à partir d'échantillons récoltés sur différents sites (Figure 10).

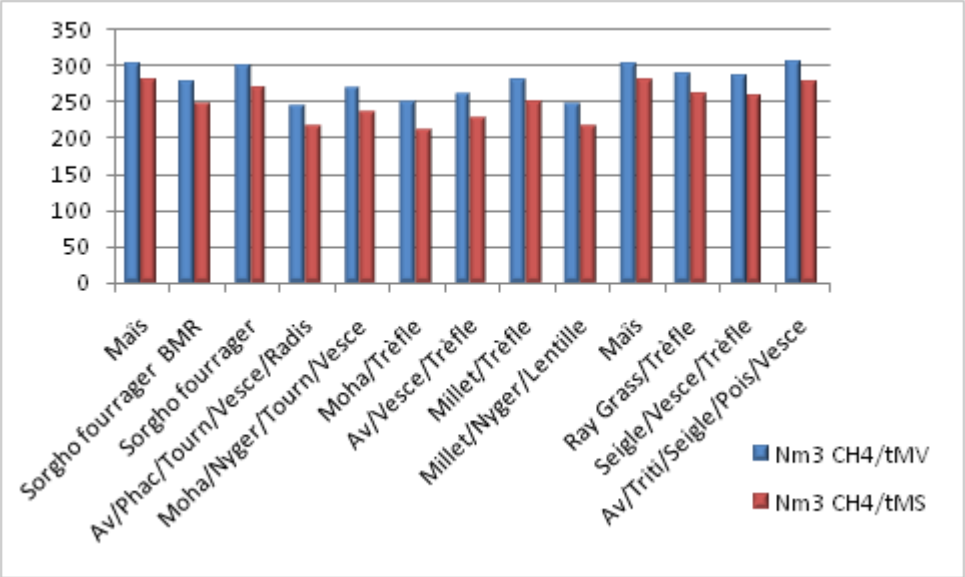


Figure 10 : Potentiel méthanogène des différents couverts à cycle court et à cycle long étudiés en Nm^3 de méthane par tonne de matière volatile (MV) ou par tonne de matière sèche (MS)

Les potentiels méthanogènes des couverts sont compris entre 210 et 280 Nm^3 CH_4/tMS. Les couverts avec les meilleurs potentiels sont : les Sorghos, le Maïs et tous les couverts à cycle long. Ces valeurs sont obtenues dans des conditions de production très favorables en laboratoire. Ainsi, le potentiel des couverts pourra varier en fonction : de la technologie de méthanisation utilisée, du mode de récolte et de conservation des couverts employés, du temps de stockage de la matière, ….

Pour évaluer la production réelle de chaque couvert, il faut calculer le rendement énergétique de chaque couvert à l'hectare (Figure 11).

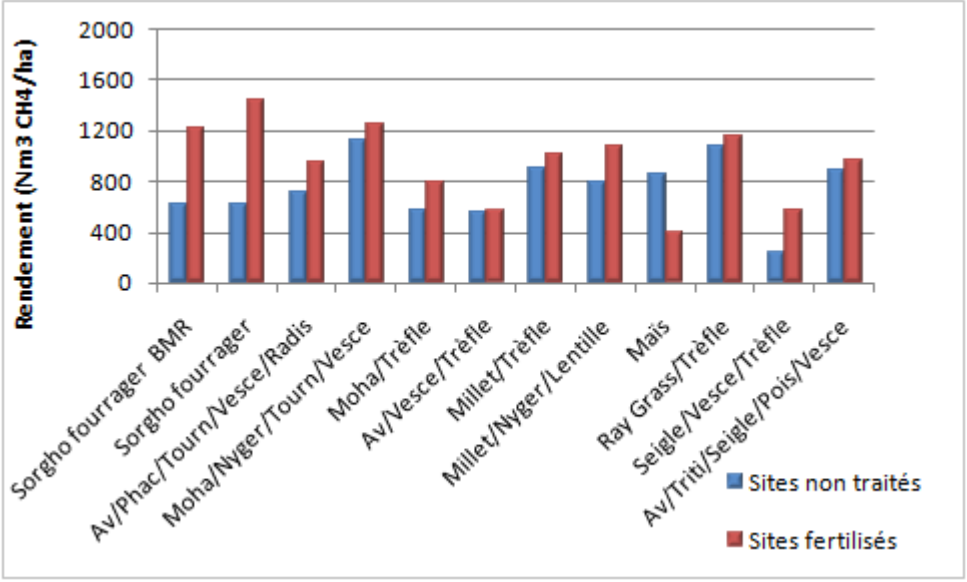


Figure 11 : Potentiel méthanogène des différents couverts à cycle court et à cycle long étudiés en Nm^3 de méthane par hectare

Sans prendre en compte l'impact environnemental, la fertilisation semble influencer positivement les rendements énergétiques des couverts, surtout pour les sorghos fourragers et le mélange Seigle/Vesce/Trèfle. **Pour les CIVE à cycle court, le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce a un rendement proche des 1 200 Nm^3 de CH_4/ha. Pour les CIVE à cycle long, c'est le mélange Ray-grass/Trèfle** qui a les meilleurs rendements énergétiques.

3.3. Coût de production des cultures dérobées

Le coût de production présenté ici intègre le coût des intrants et le coût de mécanisation, qui comprend l'implantation du couvert, la fertilisation, la récolte et la main d'œuvre. Les charges d'irrigation n'ont pas été étudiées, tout comme les charges liées au transport de la biomasse du champ à l'unité de méthanisation.
Nous avons utilisé le barème Entraide 2012/2013 [2] pour évaluer les charges de mécanisation, car cet outil, élaboré à partir des coûts indicatifs des matériels agricoles édité par le Bureau de Coordination du Machinisme Agricole (BCMA), est très complet.

3.3.1. Calcul des coûts intermédiaires

a. Coût d'intrants

Le coût d'intrants se limite au coût des semences (Figure 12).

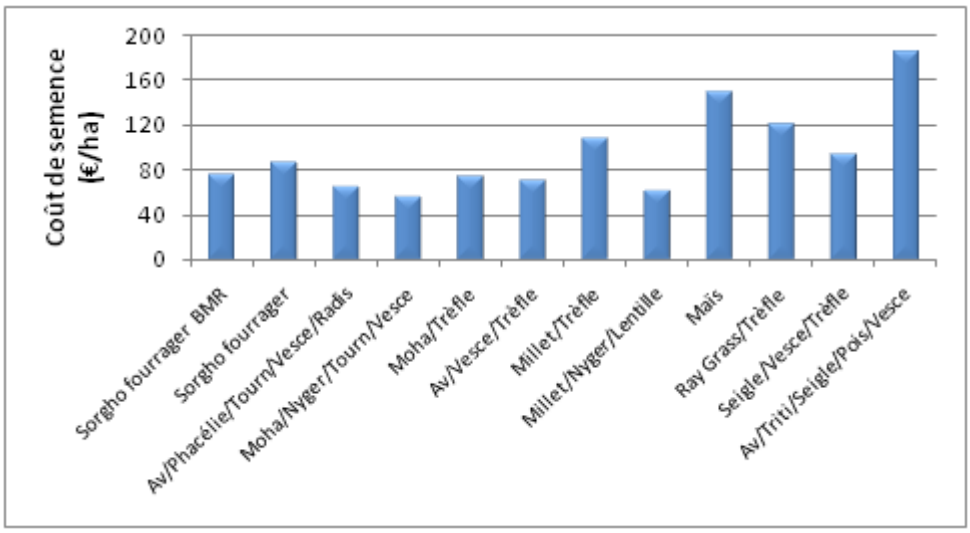


Figure 12 : Coût de semence en €/ha des couverts à cycle court et long étudiés

Le coût moyen de semence est de 83 €/ha pour les CIVE à cycle court et 134 €/ha pour les CIVE à cycle long.

Les semences les plus coûteuse sont : le Maïs, les mélanges Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce et Ray-grass/Trèfle. Ceci s'explique par le fait que :

- le maïs est issu d'une production avec un grand nombre d'étapes (sélection génétique, semis, fertilisation, castration, irrigation, …)
- les deux mélanges contiennent des légumineuses, elles même onéreuses.

A l'inverse, le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce est peu cher (57 €/ha), car les espèces le composant sont peu onéreuses et sa densité de semis est faible (20 kg/ha).

b. Coût d'implantation

Un recensement des itinéraires techniques a été fait sur chacun des sites. Le coût d'implantation par site a été calculé (Tableau 16).

Les itinéraires techniques pratiqués comportaient 2 ou 3 actions. Les grandes variations de coût sont essentiellement dues au fait que la puissance des tracteurs utilisées pour les implantations était comprise entre 90 et 320 chevaux.
Le coût moyen d'implantation, pour déchaumer, semer et rouler, est de 64 €/ha.

Nombre d'actions	Itinéraires techniques	Sites	Coût moyen d'implantation (€/ha)	Moyenne coût d'implantation (€/ha)
2 actions	Déchaumage + Semis combiné	3	62	61
	Déchaumage + Semis direct	5	73	
	Déchaumage + Semis combiné	19	46	
	Déchaumage + Semis combiné	21	62	
	Déchaumage + Semis combiné	24	61	
3 actions	Labour + Déchaumage + Semis combiné	1	106	68
	Déchaumage + Semis combiné + Roulage	2	72	
	Déchaumage + Semis combiné + Roulage	4	51	
	Déchaumage + Semis combiné + Roulage	6	42	
	Déchaumage + Semis direct + Roulage	9	64	
	Déchaumage + Semis combiné + Roulage	14	68	
	Déchaumage + Semis à la volé + Roulage	17	79	
	Déchaumage + Semis combiné + Roulage	18	55	
	Déchaumage + Semis direct + Roulage	22	61	

Tableau 16 : Coût moyen d'implantation des couverts, carburant inclus, en fonction de l'itinéraire technique pratiqué sur les différents sites

c. Coût de fertilisation

Les engrais utilisés pour fertiliser étaient de différents types : du fumier bovin, du lisier porcin, du digestat liquide ou de l'urée. Ainsi, en fonction des différents types de matériel utilisé (épandeur à fumier, tonne à lisier, épandeur d'engrais bidisques), nous avons pu établir le coût de fertilisation pour chaque engrais :

- pour le fumier : 23 €/ha,
- pour le lisier : 67 €/ha
- pour le digestat liquide : 69 €/ha,
- pour l'urée : 53 €/ha.

Les coûts d'amendement du lisier et du digestat liquide sont les plus élevés à cause d'un important coût matériel de la tonne à lisier de 12 m^3 équipée d'une rampe de 12 m. Dans le cas de l'amendement avec de l'urée, c'est surtout le prix du produit qui impacte beaucoup le coût de fertilisation (420 €/t).

Le coût moyen d'épandage est de 53 €/ha.

d. Coût de récolte

Le coût de récolte est de 164 €/ha, carburant inclus.

e. Coût de main d'œuvre

Les différents coûts de main d'œuvre relatifs aux itinéraires techniques utilisés lors de l'implantation des CIVE à cycle court et à cycle long sont référencés Tableau 17. Un temps de manipulation du matériel a été compté pour évaluer au mieux le temps réellement passé.

Action	Déchaumage	Labour	Semis	Roulage	Fertilisation	Récolte	Montage
Temps (h/ha)	0,36	1,25	0,58	0,28	0,50	0,91	0,50

Tableau 17 : Temps de travail pour les différentes actions de la production de CIVE

Le coût moyen de main d'œuvre a été évalué pour les différents itinéraires techniques (Tableau 18).

Coût de main d'œuvre (€/ha)	Sans fertilisation	Avec fertilisation
2 actions	37	45
3 actions	41	49

Tableau 18 : Coût moyen de main d'œuvre en euro par hectare (€/ha), avec ou sans fertilisation, pour des itinéraires techniques à 2 ou 3 actions avec récolte

3.3.2. Résultat du coût de production des couverts

La somme des coûts intermédiaires a permis d'obtenir le coût de production des couverts (Figure 13). Ce coût suit les mêmes tendances que le coût de semence, c'est-à-dire que le Maïs, le mélange Millet/Trèfle et les CIVE longues sont les CIVE plus coûteuses.

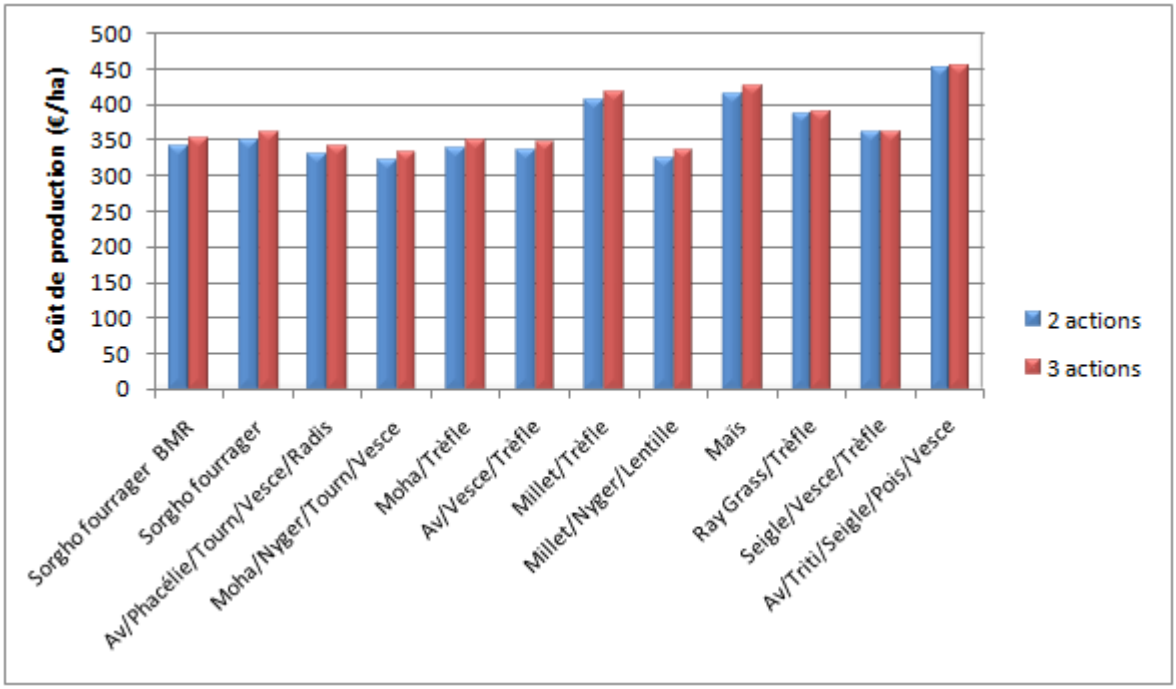


Figure 13 : Coût de production des différents couverts étudiés en fonction de l'itinéraire technique en euro par hectare (€/ha)

Les rendements des couverts étant variables (Tableau 9 – paragraphe 3.1.1 et Tableau 13 – paragraphe 3.1.2), nous avons établi un coût de production en fonction de la tonne de matière sèche (Figure 14).

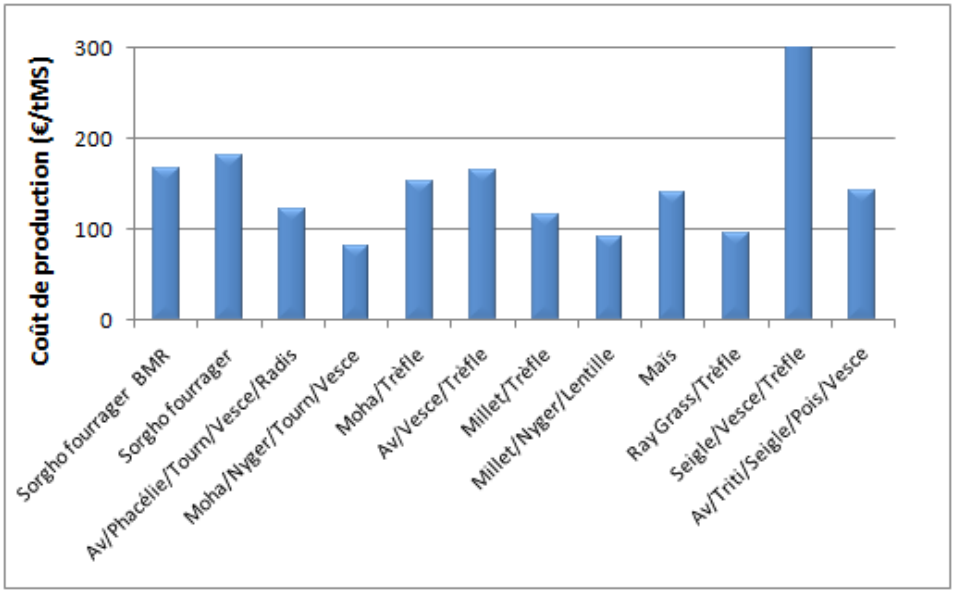


Figure 14 : Coût de production des différents couverts étudiés en fonction de l'itinéraire technique en euro par tonne de matière sèche (€/tMS)

Les coûts de production des couverts en fonction de leurs rendements sont inférieurs à 200 €/tMS, à part le mélange Seigle/Vesce/Trèfle qui a un rendement moyen inférieur à 1 tMS/ha donc un coût de production très élevé (402 €/tMS). Pour les CIVE à cycle court, les mélanges Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis, Moha/Nyger/Tournesol/Vesce et les mélanges contenant du Millet sont les couverts économiquement les plus intéressants. Pour les CIVE à cycle long, c'est le mélange Ray-grass/Trèfle qui est le plus avantageux.

Nous pouvons également comparer les rendements des couverts sur les 6 sites qui ont fertilisé (Figure 15).

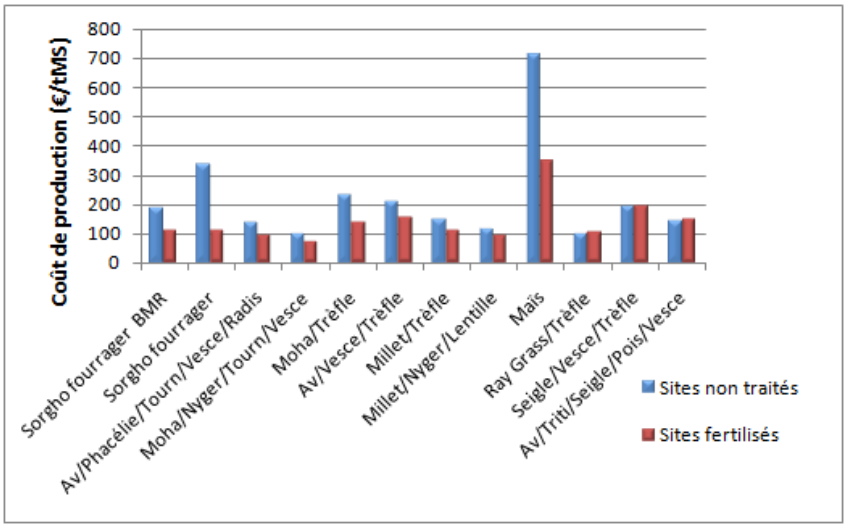


Figure 15 : Coût de production des différents couverts étudiés en fonction de l'itinéraire technique en euro par tonne de matière sèche (€/tMS) pour les sites qui ont fertilisés la moitié de la parcelle d'essai

Le coût de production du Maïs est très élevé du fait des rendements très faibles que la parcelle soit fertilisée ou non. De même, le sorgho fourrager non fertilisé avait un rendement moyen très faible (1,1 tMS/ha) d'où son coût de production supérieur à 300 €/tMS. Malgré tout, il apparaît que les sorghos ont un coût de production bas lorsqu'ils sont fertilisés.

3.3.3. Conclusions

Dans cette étude, le coût de production ne tient compte que des charges de mécanisation et des intrants. Pour être plus complet, ce coût aurait pu également intégrer :

- les charges propres des exploitations sur lesquelles se sont déroulés les essais, comme les charges foncières ou les assurances [5],
- Les charges de l'unité de méthanisation, comme l'amortissement du matériel.

Le calcul du coût de production en euro par tonne de matière sèche nous a permis de mettre en évidence certains couverts à cycle court, **comme les mélanges Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis, Moha/Nyger/Tournesol/Vesce et les mélanges contenant du Millet**. **Les sorghos ont des coûts de production intéressants lorsque la parcelle est fertilisée**. Par contre, les rendements obtenus pour le Maïs fertilisé ou non sont trop faibles pour rentre ce couvert intéressant comme CIVE estivale.
Dans le cas des couverts à cycle long, **c'est le mélange Ray-grass/Trèfle qui semble être le plus pertinent d'un point de vue économique**. Par contre, le Ray-grass est une plante qui a tendance à appauvrir la réserve hydrique des sols et elle peut faire diminuer le rendement de la culture suivante. Cette possible perte de rendement est un des points critiques des cultures intermédiaires.

Pour évaluer, l'impact économique de cette perte, il faudrait quantifier cette perte et déterminer si elle est compensée par la vente de biogaz ou d'électricité produite à partir de la CIVE.

3.4. Analyse de Cycle de Vie des CIVE étudiées

L'unité fonctionnelle choisie est 1 Nm^3 de méthane.

Les sites dont le rendement est inférieur à 3 tonnes de matière sèche par hectare ont été écartés pour se placer dans un contexte de déploiement des CIVE à l'échelle de la France et donc sur des sites présentant des conditions favorables à leur implantation et croissance.

La fertilisation est soit minérale (MIN : urée) soit organique (ORG : fumier de bovin, lisier ou digestats de méthanisation). Les résultats sont présentés par culture ou mélange (Mi) en fonction de leur fertilisation.
Le chiffre entre parenthèse à la suite du titre est le nombre de sites ayant contribué à la moyenne.

Exemple de notation : *M1 Ferti MIN (2)* signifie mélange 1 fertilisé de façon minérale (moyenne sur 2 sites).

Echelle de couleurs représentant la gravité des impacts sur l'environnement : de l'impact le plus fort à l'impact le plus faible.

3.4.1. CIVE à cycle court

a. Impacts environnementaux des cultures et mélanges non fertilisés

Pour les mélanges non fertilisés, le mélange 2 et le Maïs semblent les plus intéressants d'un point de vue environnemental pour produire 1 Nm^3 de méthane, car les impacts environnementaux engendrés sont parmi les plus bas (Tableau 19). Les performances environnementales de ces cultures sont talonnées de près par celles du mélange 5 et du Sorgho sans gène BMR.

Catégorie d'impact	Unité	M1-NF moy (8)	M2-NF moy (11)	M3-NF moy (6)	M4-NF moy (6)	M5-NF moy (4)	M6-NF moy (4)	Sorgho+BMR -NF moy (9)	Sorgho-NF moy (5)	Maïs-NF moy (8)
Changement climatique	kg CO2 eq	1,9E-01	1,4E-01	2,3E-01	2,4E-01	1,7E-01	1,9E-01	2,3E-01	1,7E-01	1,5E-01
Acidification	molc H+ eq	1,7E-03	1,3E-03	2,2E-03	2,2E-03	1,5E-03	1,7E-03	2,1E-03	1,6E-03	1,4E-03
Eutrophisation eau douce	kg P eq	3,3E-05	2,5E-05	4,1E-05	4,3E-05	2,9E-05	3,3E-05	4,1E-05	3,0E-05	2,7E-05
Eutrophisation marine	kg N eq	4,4E-03	3,3E-03	5,3E-03	5,6E-03	3,8E-03	4,4E-03	5,4E-03	3,9E-03	3,6E-03
Ecotoxicité eau douce	CTUe	7,3E-01	5,5E-01	9,0E-01	9,5E-01	6,4E-01	7,3E-01	9,1E-01	6,6E-01	5,9E-01
Consommation des ressources	kg Sb eq	6,7E-06	5,1E-06	8,4E-06	8,8E-06	5,9E-06	6,8E-06	8,4E-06	6,1E-06	5,4E-06
Net Energy Ratio		1,3E+01	1,7E+01	1,0E+01	9,8E+00	1,4E+01	1,3E+01	1,0E+01	1,4E+01	1,6E+01
Occupation sol agricole	m2a	1,9E+00	1,5E+00	2,4E+00	2,5E+00	1,7E+00	1,9E+00	2,4E+00	1,8E+00	1,6E+00
Consommation d'eau	m3	2,1E-01	1,6E-01	2,6E-01	2,7E-01	1,8E-01	2,1E-01	2,6E-01	1,9E-01	1,7E-01

Tableau 19 : Impacts environnementaux des CIVE courtes non fertilisées

Echelle de couleurs représentant la gravité des impacts sur l'environnement : de l'impact le plus fort à l'impact le plus faible.

b. Impacts environnementaux des cultures et mélanges fertilisés

D'une manière générale, pour un même mélange ou culture, il semble que pour produire 1 Nm^3 de méthane, les sites fertilisés de façon minérale présentent des impacts plus élevés que ceux qui le sont de façon organique (Tableau 20).
Produire 1 Nm^3 de CH_4 à partir des mélanges 3, 4, 6 et de la culture Maïs présente les impacts environnementaux les plus importants sur l'ensemble des indicateurs.
Produire 1 Nm^3 de CH_4 à partir des mélanges 1, 2, 5 et les sorghos fertilisés de façon organique semble présenter des impacts environnementaux moindres.

De façon générale, les CIVE à cycle court fertilisées ont impact plus fort que celles non fertilisées pour produire 1 Nm^3 de CH_4 (Tableau 21). Cela s'explique par le fait que l'augmentation de rendement liée à la fertilisation n'est pas suffisante pour « absorber » le surplus d'impact environnemental lié à celle-ci.

Catégorie d'impact	Unité	M1 Fert MIN (2)	M1 Fert MIN (2)	M1 Fert ORG (2)	M2 Fert MIN (3)	M2 Fert ORG (2)	M3 Fert MIN (2)	M3 Fert ORG (3)	M4 Fert MIN (2)	M5 Fert MIN (2)	M6 Fert MIN (2)	Soigho+BRM Fert MIN (3)	Soigho+BRM Fert ORG (2)	Soigho Fert MIN (3)	Soigho Fert ORG (2)	Maïs Fert MIN (1)
Changement climatique	kg CO2 eq	4,6E-01	4,1E-01	4,5E-01	3,9E-01	8,4E-01	5,6E-01	7,4E-01	4,3E-01	5,9E-01	5,1E-01	2,7E-01	4,8E-01	1,9E-01	3,0E-02	5,9E-01
Acidification	molc H+ eq	2,2E-02	1,6E-02	2,2E-02	1,5E-02	4,1E-02	2,1E-02	3,6E-02	2,1E-02	2,9E-02	2,5E-02	1,1E-02	2,3E-02	7,2E-03	3,0E-02	3,0E-02
Eutrophisation eau douce	kg P eq	4,0E-05	2,7E-05	3,9E-05	2,6E-05	7,3E-05	3,7E-05	6,4E-05	3,7E-05	5,2E-05	4,5E-05	1,8E-05	4,2E-05	1,2E-05	5,4E-05	5,4E-05
Eutrophisation marine	kg N eq	1,2E-02	1,8E-02	1,2E-02	1,7E-02	2,3E-02	2,5E-02	2,0E-02	1,1E-02	1,6E-02	1,4E-02	1,2E-02	1,3E-02	8,3E-03	1,8E-02	1,8E-02
Ecotoxicité eau douce	CTUe	8,3E-01	5,9E-01	8,2E-01	5,6E-01	1,5E+00	8,1E-01	1,3E+00	7,7E-01	1,1E+00	9,3E-01	3,9E-01	8,2E-01	2,7E-01	1,1E+00	1,1E+00
Consommation des ressources	kg Sb eq	5,4E-06	6,1E-06	5,3E-06	5,8E-06	9,8E-06	8,5E-06	8,6E-06	5,0E-06	6,9E-06	6,0E-06	4,1E-06	5,7E-06	2,8E-06	7,4E-06	7,4E-06
Net Energy Ratio		8,8E+00	1,5E+01	9,2E+00	1,6E+01	4,8E+00	1,1E+01	5,5E+00	9,5E+00	6,9E+00	8,1E+00	2,3E+01	8,6E+00	3,3E+01	7,2E+00	7,2E+00
Occupation sol agricole	m2a	1,2E+00	1,5E+00	1,2E+00	1,4E+00	2,1E+00	2,0E+00	1,9E+00	1,1E+00	1,5E+00	1,4E+00	9,7E-01	1,3E+00	6,6E-01	2,0E+00	2,0E+00
Consommation d'eau	m3	2,7E-01	1,8E-01	2,6E-01	1,7E-01	4,9E-01	2,5E-01	4,3E-01	2,5E-01	3,5E-01	3,0E-01	1,2E-01	2,8E-01	8,1E-02	3,4E-01	3,4E-01

Echelle de couleurs représentant la gravité des impacts sur l'environnement : de l'impact le plus fort à l'impact le plus faible.

Tableau 20 : Impacts des CIVE à cycle court fertilisées

Catégorie d'impact	Unité	Moyenne sites fertilisés (rdt >3tMS/ha)										Moyenne sites non fertilisés (rdt >3tMS/ha)									
		M6 (2)	M5 (2)	M4 (2)	M3 (5)	M2 (5)	M1 (4)	Maïs (1)	Sorgho+BMR (5)	Sorgho (5)	M6 (4)	M5 (4)	M4 (6)	M3 (6)	M2 (11)	M1 (8)	Maïs(8)	Sorgho+BMR (9)	Sorgho (5)
Changement climatique	kg CO2 eq	5,9E-01	4,3E-01	7,4E-01	6,7E-01	4,3E-01	4,4E-01	5,9E-01	3,9E-01	3,1E-01	1,9E-01	1,7E-01	2,4E-01	2,3E-01	1,4E-01	1,9E-01	1,5E-01	2,3E-01	1,7E-01
Acidification	molc H+ eq	2,9E-02	2,1E-02	3,6E-02	2,8E-02	1,9E-02	1,9E-02	3,0E-02	1,8E-02	1,4E-02	1,7E-03	1,5E-03	2,2E-03	2,2E-03	1,3E-03	1,7E-03	1,4E-03	2,1E-03	1,6E-03
Eutrophisation eau douce	kg P eq	5,2E-05	3,7E-05	6,4E-05	5,1E-05	3,4E-05	3,4E-05	5,4E-05	3,2E-05	2,5E-05	3,3E-05	2,9E-05	4,3E-05	4,1E-05	2,5E-05	3,3E-05	2,7E-05	4,1E-05	3,0E-05
Eutrophisation	kg N eq	1,6E-02	1,1E-02	2,0E-02	2,4E-02	1,4E-02	1,5E-02	1,8E-02	1,3E-02	1,0E-02	4,4E-03	3,8E-03	5,6E-03	5,3E-03	3,3E-03	4,4E-03	3,6E-03	5,4E-03	3,9E-03
Ecotoxicité eau	CTUe	1,1E+00	7,7E-01	1,3E+00	1,1E+00	7,2E-01	7,2E-01	1,1E+00	6,7E-01	5,0E-01	7,3E-01	6,4E-01	9,5E-01	9,0E-01	5,5E-01	7,3E-01	5,9E-01	9,1E-01	6,6E-01
Consommation des ressources	kg Sb eq	6,9E-06	5,0E-06	8,6E-06	9,0E-06	5,5E-06	5,7E-06	7,4E-06	5,1E-06	4,0E-06	6,8E-06	5,9E-06	8,8E-06	8,4E-06	5,1E-06	6,7E-06	5,4E-06	8,4E-06	6,1E-06
Net Energy Ratio		6,9E+00	9,5E+00	5,5E+00	7,4E+00	1,1E+01	1,1E+01	7,2E+00	3,0E+00	2,4E+00	1,3E+01	1,4E+01	9,8E+00	1,0E+01	1,7E+01	1,3E+01	1,6E+01	1,0E+01	1,4E+01
Occupation sol	m2a	1,5E+00	1,1E+00	1,9E+00	2,0E+00	1,3E+00	1,3E+00	2,0E+00	1,2E+00	9,4E-01	1,9E+00	1,7E+00	2,5E+00	2,4E+00	1,5E+00	1,9E+00	1,6E+00	2,4E+00	1,8E+00
Consommation	m3	3,5E-01	2,5E-01	4,3E-01	3,4E-01	2,3E-01	2,3E-01	3,4E-01	2,1E-01	1,7E-01	2,1E-01	1,8E-01	2,7E-01	2,6E-01	1,6E-01	2,1E-01	1,7E-01	2,6E-01	1,9E-01

Echelle de couleurs représentant la gravité des impacts sur l'environnement : de l'impact le plus fort à l'impact le plus faible.

Tableau 21 : Comparaison des impacts des CIVE à cycle court

Au final, nous pouvons conclure que :

- **Les CIVE à cycle court intéressantes sont :**
  - Sorgho sans BMR (fertilisé ou non fertilisé)
  - Moha/Nyger/Tournesol/Vesce non fertilisé
  - Millet/Trèfle non fertilisé
  - Maïs non fertilisé

- **Certaines CIVES courtes, qu'elles soient fertilisées ou non, présentent des impacts forts comme :**
  - Moha/Trèfle
  - Avoine/Vesce/Trèfle
  - Sorgho fourrager BMR

3.4.2. CIVE à cycle long

a. Impacts environnementaux des cultures et mélanges non fertilisés

Pour la production de 1 Nm^3 de méthane; **il semble que la CIVE à cycle long B (Ray-grass/Trèfle) présente des impacts environnementaux moins importants sur l'ensemble des indicateurs** que les deux autres CIVE (Tableau 22). La CIVE à cycle long C (Seigle/Vesce/Trèfle) présente les impacts les plus élevés.

Il est important de souligner que les résultats et conclusions concernant la CIVE longue C portent sur des données issues d'un seul site, car tous les autres avaient des rendements inférieurs à 3 tMS/ha en raison d'une récolte trop précoce. En effet, la CIVE longue C contient du seigle qui n'exprime son potentiel biomasse qu'à partir de la mi-Avril. Pour garantir la robustesse des conclusions, un jeu de données plus important serait nécessaire.

Catégorie d'impact	Unité	CL C non ferti (1)	CL B non ferti (3)	CL A non ferti (2)
Changement climatique	kg CO2 eq	3,4E-01	1,7E-01	2,0E-01
Acidification	molc H+ eq	2,6E-03	1,3E-03	1,5E-03
Eutrophisation eau douce	kg P eq	5,9E-05	3,1E-05	3,4E-05
Eutrophisation marine	kg N eq	3,2E-02	1,7E-02	1,9E-02
Ecotoxicité eau douce	CTUe	1,2E+00	6,3E-01	6,9E-01
Consommation des ressources	kg Sb eq	2,6E-06	1,1E-06	1,5E-06
Net Energy Ratio		9,6E+00	1,9E+01	1,7E+01
Occupation sol agricole	m2a	6,8E+00	3,7E+00	4,0E+00
Consommation d'eau	m3	1,0E-01	4,7E-02	5,9E-02

Tableau 22 : Impacts des CIVE longues non fertilisées

b. Impacts environnementaux des cultures et mélanges fertilisés

Pour les CIVE longues A (Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce) et C, les sites ayant reçu un apport de fertilisant minéral présentent des impacts plus élevés que ceux fertilisés façon organique (Tableau 23). Ces résultats sont liés au fait que les émissions azotées sont plus importantes. Ce sont les indicateurs changement climatique, acidification et eutrophisation (indicateurs très dépendants des émissions azotées) qui ont les valeurs les plus élevées.

La culture CIVE longue B fertilisée est la moins impactante pour la production de 1 Nm^3 de CH_4.

Ici encore, il est important de souligner que la plupart les résultats et conclusions présentés ci-dessus portent sur des données issues d'un seul site. Pour garantir la robustesse des conclusions, un jeu de données plus important serait nécessaire.

Catégorie d'impact	Unité	CL A ferti MIN (1)	CL A ferti ORG (2)	CL B ferti MIN (1)	CL B ferti ORG (2)	CL C ferti MIN (1)	CL C ferti ORG (1)
Changement climatique	kg CO2 eq	6,0E-01	6,3E-01	4,9E-01	5,0E-01	6,8E-01	4,9E-01
Acidification	molc H+ eq	2,5E-02	2,3E-02	2,0E-02	1,8E-02	2,8E-02	1,2E-02
Eutrophisation eau douce	kg P eq	5,9E-05	4,7E-05	4,8E-05	3,7E-05	6,7E-05	5,3E-05
Eutrophisation marine	kg N eq	2,8E-02	4,4E-02	2,3E-02	3,5E-02	3,2E-02	3,3E-02
Ecotoxicité eau douce	CTUe	1,2E+00	9,6E-01	9,5E-01	7,6E-01	1,3E+00	1,1E+00
Consommation des ressources	kg Sb eq	2,7E-06	4,6E-06	2,2E-06	3,6E-06	3,1E-06	7,8E-06
Net Energy Ratio		7,2E+00	1,1E+01	8,8E+00	1,4E+01	6,3E+00	8,8E+00
Occupation sol agricole	m2a	3,8E+00	4,9E+00	3,1E+00	3,9E+00	4,3E+00	4,9E+00
Consommation d'eau	m3	2,4E-01	1,2E-01	2,0E-01	9,6E-02	2,8E-01	1,9E-01

Tableau 23 : Impacts des CIVE à cycle long fertilisées

c. Comparaison des CIVE longues fertilisées ou non fertilisées

Les CIVE à cycle long A et B non fertilisées sont les moins impactantes pour 1 Nm^3 de méthane produit (Tableau 24).
La CIVE longue B fertilisée présente des impacts à peu près égaux, voire moindres, sur les différentes catégories que la CIVE longue C non fertilisée. **Sans considérer l'ensemble du cycle de rotation culturale**, il semble qu'il n'y ait a priori **pas d'intérêt environnemental à fertiliser la CIVE longue**. Il est crucial de choisir une CIVE longue adaptée au contexte pédoclimatique pour limiter le risque de rendement faible et ainsi implanter une culture économiquement viable.

Catégorie d'impact	Unité	CL C ferti moy (2)	CL B ferti moy (3)	CL A ferti moy (3)	CL C non ferti (1)	CL B non ferti (3)	CL A non ferti (2)
Changement climatique	kg CO2 eq	5,9E-01	5,0E-01	6,2E-01	3,4E-01	1,7E-01	2,0E-01
Acidification	molc H+ eq	2,0E-02	1,9E-02	2,3E-02	2,6E-03	1,3E-03	1,5E-03
Eutrophisation eau douce	kg P eq	6,1E-05	4,1E-05	5,2E-05	5,9E-05	3,1E-05	3,4E-05
Eutrophisation marine	kg N eq	3,3E-02	3,1E-02	3,8E-02	3,2E-02	1,7E-02	1,9E-02
Ecotoxicité eau douce	CTUe	1,2E+00	8,4E-01	1,0E+00	1,2E+00	6,3E-01	6,9E-01
Consommation des ressources	kg Sb eq	5,3E-06	3,1E-06	3,8E-06	2,6E-06	1,1E-06	1,5E-06
Net Energy Ratio		7,3E+00	1,2E+01	9,3E+00	9,6E+00	1,9E+01	1,7E+01
Occupation sol agricole	m2a	4,6E+00	3,6E+00	4,5E+00	6,8E+00	3,7E+00	4,0E+00
Consommation d'eau	m3	2,4E-01	1,4E-01	1,7E-01	1,0E-01	4,7E-02	5,9E-02

Tableau 24 : Comparaison des impacts des CIVE à cycle long

3.4.3. Conclusions de l'étude ACV

L'ACV a permis de comparer différentes CIVE en se plaçant dans un objectif d'extrapolation des données, cas d'une généralisation de ces cultures intermédiaires à vocation énergétique en France (avec contexte pédoclimatique adapté).

L'évaluation de l'ensemble des itinéraires techniques pour chaque culture a permis d'avoir rapidement une vision globale des performances environnementales des différents systèmes étudiés et d'identifier certaines cultures a priori pertinentes d'un point de vue environnemental.

L'évaluation environnementale des sites fertilisés a permis de cartographier les sources d'impacts. Pour illustration, dans le cas d'une fertilisation à l'urée, la production de l'urée génère une part importante des impacts (de 4 à 55%), mais également les émissions agricoles (N_2O, NH_3, CO_2, NO_3^-), la production et la consommation de carburant ainsi que les infrastructures.
Malgré le gain de rendement, fertiliser une culture ne présente pas forcément des avantages d'un point de vue environnemental. En effet, le gain de rendement que peut apporter cette fertilisation n'est pas toujours suffisant pour compenser les pollutions environnementales engendrées par la production du fertilisant et des émissions engendrées. Lorsqu'une fertilisation est nécessaire, **les amendements organiques sont à privilégier plutôt que les apports minéraux**.

L'étude a permis de révéler que **4 CIVE à cycle court semblent plus intéressantes d'un point de vue environnemental** que les autres :

- Sorgho sans BMR (fertilisé ou non fertilisé)
- Moha/Nyger/Tournesol/Vesce - non fertilisé
- Millet/Trèfle - non fertilisé
- Maïs - non fertilisé

Deux CIVE longues non fertilisées ont également présenté des impacts potentiels plus faibles :

- Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce
- Ray-grass/Trèfle

4. Recommandations

Les CIVE ont un intérêt pour les agriculteurs méthaniseurs qui souhaitent avoir un stock de matières méthanogènes disponible pour combler certains manques dans la ration d'alimentation de leur digesteur. Nous avons différencié deux types de CIVE :

- les **CIVE à cycle court** qui sont implantées en été, par exemple derrière une céréale, et qui sont récoltées à l'automne avant les premières gelées,
- les **CIVE à cycle long** qui sont implantées en automne, par exemple derrière un maïs, et qui sont récoltées avant les semis de printemps.

La mise en place de CIVE à cycle court présente une prise de risque importante, car elles sont semées sur une période critique (précipitations faibles voire nulles, températures élevées,...). En effet, il est important de prendre en compte le facteur pédo-climatique pour ces CIVE. Ainsi, il est préférable de réaliser les semis le plus tôt possible, c'est-à-dire derrière un mélange de céréales immatures, une orge ou une culture légumière (pois ou haricot), pour limiter au maximum les risques, en particulier la levée des couverts. La réussite de ces CIVE est également déterminée dès la récolte du précédent, car il est important d'avoir une bonne gestion des repousses pour limiter la concurrence lors de la levée (récolte des menues pailles, faux semis,…). Dans tous les cas, le choix d'un couvert à implantation rapide est primordial pour les CIVE à cycle court.
En ce qui concernent les CIVE à cycle long, ces couverts sont plus faciles à cultiver, car ils sont implantés sur une période plus clémente (précipitations régulières, températures douces, …). Par contre, ils ont besoin d'être récoltés le plus tard possible pour qu'ils puissent exprimer leur potentiel biomasse, c'est-à-dire atteindre un rendement minimum. Il est donc indispensable d'adapter sa rotation pour faire une récolte la plus tardive possible.

Ainsi la culture des CIVE nécessite de faire des choix culturaux, en optimisant les implantations et/ou les récoltes, afin d'atteindre un rendement de production économiquement intéressant. Notre retour d'expérience, sur les essais réalisés en 2012 et 2013, nous a permis de déterminer un rendement minimum à atteindre afin

que l'équilibre financier du projet de méthanisation ne soit pas impacté par la production de cette biomasse supplémentaire. Ce rendement a été fixé à 3 tMS/ha.

Pour l'atteindre, la CIVE implantée doit être considérée comme une culture en tant que telle, avec un itinéraire technique raisonné, mais surtout il est indispensable de :

- semer une espèce adaptée à la région d'implantation,
- optimiser la densité de semis afin que celle-ci ne soit ni trop faible, pour que le couvert s'implante sans concurrence, ni trop élevée pour limiter le coût de semis,
- choisir une date d'implantation ou de récolte compatible avec la production de biomasse de l'espèce en question.

En se basant sur les résultats obtenus lors des projets ExpéCIVE 2012 [1] et 2013, la France a été découpée en trois grandes zones en fonction des conditions climatiques rencontrées tout au long de l'année. Ainsi, nous trouvons (Annexe 15 et Annexe 16) :

- une zone froide, qui inclut les régions qui bénéficient de températures moyennes clémentes en été (entre 14 et 16°C) et froides en hiver. La pluviométrie moyenne y est importante à l'année, c'est-à-dire comprise entre 900 et 1500 mm, mais également en été (entre 150 et 500 mm),

- une zone tempérée, qui inclut des régions qui bénéficient de températures estivales moyennes comprises entre 16 et 18°C. La pluviométrie moyenne y est moyenne, c'est-à-dire comprise entre 500 et 900 mm, mais assez faible en été (entre 100 et 200 mm),

- une zone chaude, qui inclut les régions qui bénéficient de températures estivales moyennes importantes (entre 16 et 24°C). La pluviométrie annuelle moyenne y est moyenne, c'est-à-dire comprise entre 500 et 900 mm, par contre elle est très faible en été (entre 50 et 175 mm).

Selon la zone, les espèces implantées et les dates de semis et de récolte vont varier pour les intercultures courtes aussi bien que pour les longues.

Pour les espèces de **CIVE à cycle court**, les recommandations sont les suivantes (Figure 16) :

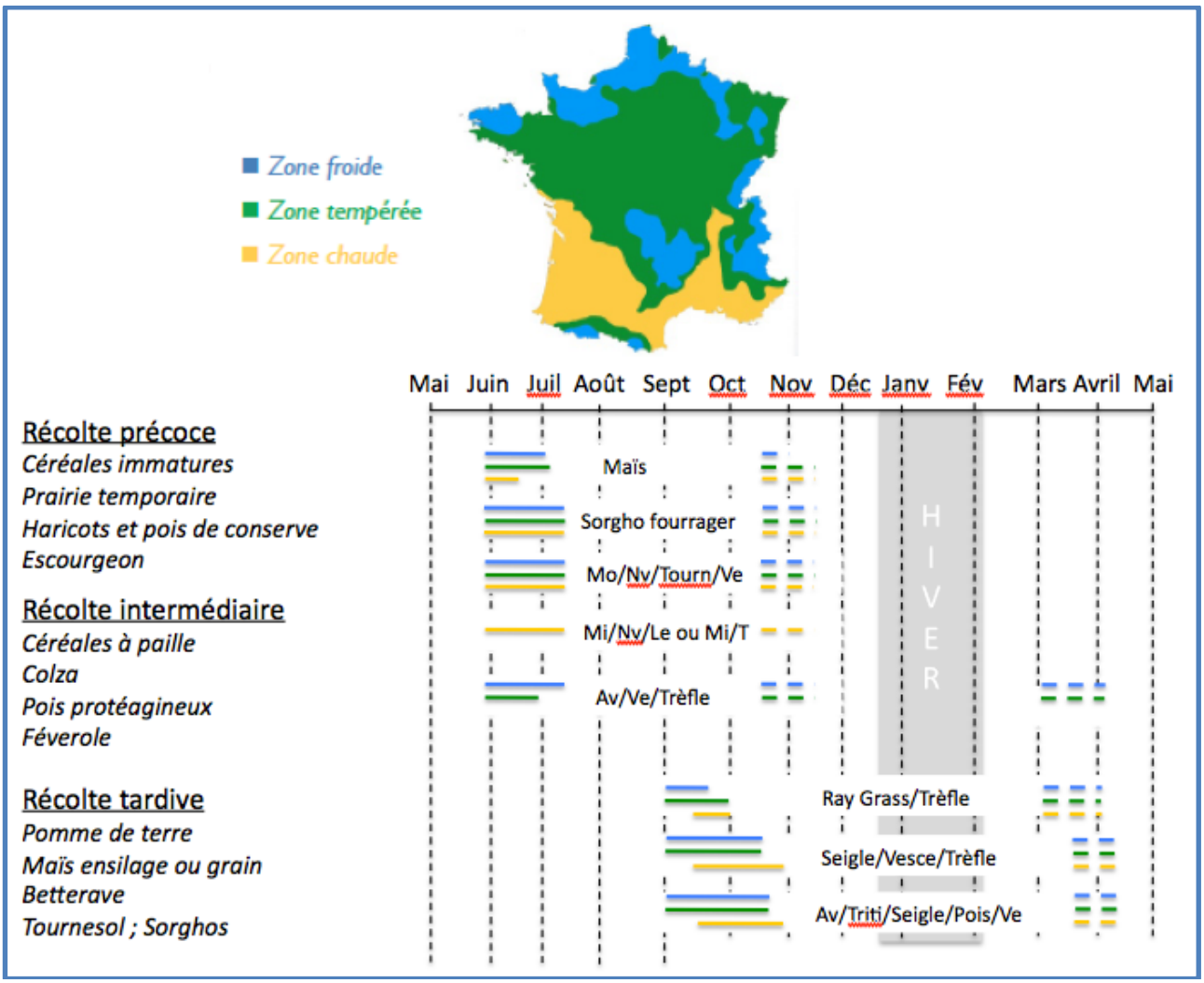
- le Sorgho fourrager et le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce sont des couverts qui laissent plus de possibilités. Ils peuvent être implantés derrière des cultures à récolte précoce ou intermédiaire (céréales à paille, colza, …). Ces couverts ne devront pas être implantés après mi-Juillet, quelle que soit la région d'implantation. Ils devront être récoltés avant fin Octobre dans les régions de la zone froide et mi-Novembre dans les régions des autres zones, car ils ne résistent pas au gel,

- le Maïs en interculture ne doit se faire que derrière des récoltes précoces (céréales immatures, pois et haricots de conserve,...) pour bénéficier des meilleures conditions climatiques en vue d'une bonne implantation. Cette remarque est valable quel que soit le couvert à cycle court, mais elle est d'autant plus vraie pour le maïs. Le semis doit être fait au plus tard début Juillet dans les régions des zones froide et tempérée. Par contre, une implantation après mi-Juin dans les régions de la zone chaude ne donnera pas de bons rendements, car le maïs aura du mal à lever par manque de précipitation et les températures seront trop chaudes pour que sa croissance soit optimale. Dans tous les cas, la précocité du maïs est à adapter en fonction de la région dans laquelle il sera implanté. La récolte devra avoir lieu avant fin Octobre dans les régions de la zone froide pour éviter le gel et avant mi-Novembre dans les régions des autres zones,

- les mélanges Millet/Nyger/Lentille et Millet/Trèfle ont des dates de semis et de récolte identiques à celles citées ci-dessus. Par contre, ces mélanges ne peuvent être implantés que dans les régions situées dans la zone chaude, car le Millet est une plante tropicale qui a besoin d'une somme de températures suffisante pour se développer,

- le mélange Avoine/Vesce/Trèfle est un mélange à implanter de préférence dans les régions des zones froide et tempérée, car il a besoin d'un maximum de précipitations pour produire de la

biomasse sur la période estivale. L'avantage de ce mélange est qu'il pourra être récolté deux fois, c'est-à-dire une fois à l'entrée de l'hiver, avant mi-Novembre, et une fois au début du printemps, courant Mars. Pour le semis, il est important de ne pas faire les implantations au-delà de fin Juin dans les régions situées dans la zone tempérée au risque d'avoir une mauvaise levée.



Mo : Moha ; Ny : Nyger ; Tourn : Tournesol ; Ve : Vesce ; Mi : Millet ; Le : Lentille Av : Avoine ; Triti : Triticale

Figure 16 : Recommandations de dates de semis et de récolte pour différentes CIVE à cycle court et à cycle long selon la région d'implantation

Pour les espèces de **CIVE à cycle long,** voici les principales préconisations à suivre (Figure 16) :

- le mélange Ray-grass/Trèfle doit être semé entre début Septembre et mi-Septembre dans les régions de la zone froide pour bénéficier des meilleures conditions d'implantation. Dans la zone tempérée, les implantations pourront s'étaler sur tout le mois de Septembre et dans la zone chaude de mi-Septembre à début Octobre en fonction de la récolte du précédent. La récolte peut s'étaler entre début Mars et début Avril, mais plus la récolte est tardive plus la production de biomasse est importante,

- les mélanges Seigle/Vesce/Trèfle et Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce peuvent être implantés de début Septembre à mi-Octobre dans les régions des zones froide et tempérée et de mi-Septembre à fin Octobre dans les régions de la zone chaude. Dans ce cas, la récolte ne devrait pas être faite avant fin Mars, quelle que soit la région, sous peine d'avoir un très faible rendement. Ainsi, il est préférable d'attendre au maximum pour le récolter (fin Avril).

5. Conclusions et perspectives

Les cultures intermédiaires ont des intérêts variés (protection de l'environnement, production de biomasse pour les exploitations agricoles, alimentation animale,…), mais il est important de bien choisir le couvert implanté et la période d'implantation pour avoir un maximum de biomasse. Les CIVE sont une bonne alternative aux cultures énergétiques dédiées, mais les informations techniques concernant ces cultures sont difficiles à trouver.
En 2012, un projet sur les CIVE à cycle court, c'est-à-dire sur des couverts implantés pendant 90 jours entre fin Juin à début Octobre, a été mené par l'ADEME en partenariat avec Méthaneva et Caussade semences à l'échelle nationale. Les résultats obtenus avaient permis de mettre en évidence l'intérêt de certaines CIVE par rapport à d'autres, tant d'un point de vue agronomique qu'environnemental, et l'importance des pratiques culturales réalisées sur ces cultures. Cependant, les conditions climatiques particulières de l'été 2012 (très sec) avaient rendu difficile l'analyse approfondie des données. De plus, des essais sur les CIVE à cycle long auraient été appréciés pour valider leurs intérêts et définir leurs conditions de culture.

Ainsi, un nouvel essai a été mené sur l'été 2013 pour tester des CIVE à cycle court et l'hiver 2013-2014 pour les CIVE à cycle long. Le but de cet essai était de :

- sélectionner des espèces et variétés de cultures adaptées à la codigestion en fonction de la zone d'implantation de ces dernières,
- déterminer les caractéristiques agronomiques de différents couverts végétaux sur des cycles de culture courts et longs,
- déterminer le potentiel méthanogène et le coût de production de ces couverts,
- faire une analyse de cycle de vie (ACV) de ces cultures pour évaluer leur impact environnemental.

Des essais de plein champ ont été réalisés sur 24 sites pour les CIVE à cycle court et 11 sites pour les CIVE à cycle long. Ce sont 9 couverts à cycle court et 3 couverts à cycle long qui ont été étudiés. Les mélanges d'espèces ont été favorisés par rapport aux espèces seules. Cependant, pour les CIVE à cycle court, le Maïs et deux espèces de Sorgho fourrager, avec ou sans gêne BMR, ont été étudiés afin d'avoir des rendements de référence de plantes à forte production de biomasse.
Le protocole d'implantation était laissé libre à l'agriculteur, mais la densité de semis était imposée. De même, si l'agriculteur souhaitait fertiliser et/ou irriguer l'essai, il pouvait le faire mais uniquement sur la moitié de la parcelle afin de pouvoir comparer les rendements des couverts avec et sans traitement. Les récoltes ont été faites par pesée géométrique après, en moyenne, 90 jours pour les CIVE à cycle court et 200 jours pour les CIVE à cycle long. Les rendements agronomiques et énergétiques ont été déterminés pour chaque espèce et chaque site. De même, un coût de production a été calculé par site et par couvert. Ces rendements et ces coûts ont été moyennés pour pouvoir faire une comparaison globale de chaque couvert et pour l'ACV.

De manière générale, les implantations se sont bien déroulées. Le protocole d'essai pour le traitement, avec une fertilisation et/ou irrigation de la moitié de la parcelle, a été respecté. Par contre, à l'avenir si l'essai est renouvellé il serait plus pertinent de fixer le fertilisant à utiliser. En effet, la fertilisation a été faite avec des fertilisants organiques (lisier, fumier, digestat) ou chimiques (urée) selon la matière disponible sur les différents sites. Il est donc difficile d'opérer des comparaisons sur les résultats obtenus, car même si l'apport avait été fixé à 50 unités d'azote par hectare, la valeur fertilisante des amendements utilisés est variable. De plus, il serait bon de faire des récoltes mécaniques plutôt que manuelles afin d'obtenir des résultats plus réalistes (hétérogénéité de la parcelle, repousses sur andains,….).
L'ensemble des résultats obtenus sur les essais de CIVE à cycle court et de CIVE à cycle long nous a permis de voir que pour réussir les CIVE il est important d'implanter au bon moment et au bon endroit pour obtenir un maximum de biomasse. Ainsi, nous avons pu exposer les recommandations que nous donnerions à tous les agriculteurs, concernant les couverts à implanter et le dates d'implantation et de récolte à respecter, en fonction de 3 grandes zones pédo-climatiques.

<u>Pour les CIVE à cycle court</u>

Sur les 24 sites implantés, seuls 17 sites ont été récoltés. Sur les 7 sites restant, aucun couvert n'avait poussé. Parmi ces 17 sites, 6 ont fertilisé l'essai et 1 a fertilisé et irrigué.

Les rendements moyens de ces couverts sont compris entre 2,3 et 4,8 tMS/ha. En comparant avec les essais menés en 2012, les rendements obtenus sont supérieurs sauf pour le Maïs et le Sorgho fourrager. L'année 2013 ayant été très humide les semis ont été tardifs ce qui a probablement pénalisé ces plantes. En effet, le Maïs et le Sorgho sont des plantes à photopériode croissante. Or, les semis ont débuté à partir du

mois de Juillet, c'est-à-dire une photopériode décroissante. Dans tous les cas, nous pouvons souligner ici le fait que les rendements obtenus vont essentiellement dépendre des conditions pédo-climatiques. **Les mélanges Moha/Nyger/Tournesol/Vesce et Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis présentent les meilleurs rendements. Cependant, le mélange Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis est très humide, donc il risque de poser des problèmes de stockage et surtout de conservation.** Le Sorgho fourrager sans BMR donne des rendements moyens, qui sont assez similaires à ceux de 2012. Ainsi, en choisissant cette plante comme CIVE à cycle court, les agriculteurs sont sûrs de pouvoir récolter de la biomasse en Septembre à condition que l'implantation se passe dans de bonnes conditions.
Une analyse de variances (ANOVA) à 2 facteurs a permis de mettre en évidence que seul le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce a un impact significatif sur les rendements. Ces bonnes performances resteraient à confirmer sur plus long terme.
L'impact de la fertilisation sur les rendements des couverts a été regardé. **Il semblerait que les couverts aient un meilleur rendement lorsqu'ils sont fertilisés**. Une ANOVA à 3 facteurs nous a permis de confirmer ce fait.
Des essais de potentiel méthanogène ont été effectués sur les CIVE étudiées. **Quel que soit le couvert, ce potentiel est à peu près équivalent à 230 Nm^3 CH_4/tMS.** Ainsi, le rendement énergétique de chaque CIVE à cycle court va dépendre du rendement agronomique du couvert. C'est pourquoi le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce ressort comme étant le couvert le plus intéressant quelle que soit la région de culture. Les mélanges contenant du Millet peuvent également être pertinents dans les régions du Sud (zone chaude).

Les coûts de production en €/ha suivent les tendances des coûts de semences, ainsi les CIVE à cycle court les plus coûteuse à produire sont : le Maïs et le mélange Millet/Trèfle. Mais si ce coût de production à l'hectare est rapporté au rendement (tMS/ha), on obtient un coût de production en €/tMS qui est beaucoup plus représentatif de la culture de la CIVE dans son ensemble. Dans ce cas, ce sont les mélanges Moha/Nyger/Tournesol/Vesce, Avoine/Phacélie/Tournesol/Vesce/Radis, Millet/Trèfle et Millet/Nyger/Lentille qui ont les coûts de production les plus bas. Quand la parcelle est fertilisée les tendances sont identiques, mais le Sorgho fourrager devient également intéressant d'un point de vue économique.

Les résultats de l'analyse de cycle de vie (ACV), sur les essais de CIVE à cycle court, ont mis en évidence que les couverts les plus pertinents d'un point de vue environnemental sont : le Maïs, le Millet/Trèfle et le Moha/Nyger/Tournesol/Vesce quand la parcelle n'est pas fertilisée et le Sorgho fourrager que la parcelle soit fertilisée ou pas.

Au final, les résultats obtenus sur les essais de CIVE à cycle court menés en 2012 et 2013 ont permis de mettre en évidence que ces couverts doivent impérativement être implantés avant mi-Juillet pour limiter les risques à la levée. Ensuite, nous avons pu souligner l'intérêt agronomique, énergétique, économique et environnemental de certains couverts par rapport à d'autres. Globalement, nous avons mis en évidence que le mélange **Moha/Nyger/Tournesol/Vesce est pertinent, quelle que soit la région** d'implantation. Ces résultats sont vrais que **la parcelle est été traitée ou pas** (fertilisation et/ou irrigation). Par contre, ils devront être confirmés lors de nouveaux essais, mais ce mélange est très prometteur pour les unités de méthanisation. **Quelle que soit la région d'implantation, le Sorgho fourrager sans BMR** est une espèce qui assure une certaine sécurité aux agriculteurs, car elle résiste bien à la chaleur ce qui lui permet de s'implanter et de pousser malgré des conditions climatiques estivales rudes. Ce couvert est particulièrement intéressant quand **la parcelle est fertilisée et/ou irriguée**. Dans **les régions de la zone chaude, le mélange Millet/Trèfle** peut aussi être utilisé dans le cas où les parcelles ne sont pas traitées.

Pour les CIVE à cycle long

11 sites ont été implantés sur toute la France. Seuls 6 sites ont été récoltés, car les autres ont travaillé le sol des parcelles d'essai avant que celle-ci n'ait été récoltée et malgré des couverts correctement développés. Parmi les sites récoltés, 5 avaient fertilisé la moitié de l'essai pour pouvoir déterminer le rendement de chaque couvert avec ou sans fertilisation.

Les rendements moyens des couverts étudiés varient entre 0,9 et 4,1 tMS/ha. **Les meilleurs rendements ont été obtenus grâce au mélange Ray-grass/Trèfle suivi par le mélange Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce**. Le mélange Seigle/Vesce/Trèfle a les rendements les plus faible, car la plupart des récoltes ont été faites début Avril c'est-à-dire avant la reprise en végétation de ce couvert, en particulier celle du seigle. Une ANOVA à 2 facteurs nous a permis de déterminer que cette différence de rendements était significative.

La fertilisation ne semble pas avoir d'influence particulière sur le rendement des couverts, à part peut-être sur le mélange Seigle/Vesce/Trèfle. Une ANOVA à 3 facteurs nous a permis d'établir que l'impact de la fertilisation n'était pas significatif.
Nous avons également regardé l'influence de la date de récolte sur le rendement, puisque certains sites avaient ramassé début Avril et d'autres fin Avril. En effet, nous avons pu remarquer que les rendements de chaque couvert doublaient voire triplaient selon la date de ramassage. Cependant, nous n'avons pas pu valider statistiquement le fait que cette date ait une influence sur le rendement du couvert puisque les récoltes ont été faites sur des sites différents.

Le potentiel méthanogène des CIVE à cycle long est légèrement supérieur à celui des CIVE à cycle court, 250 Nm^3 CH_4/tMS contre 230 en moyenne**.** Si ce potentiel est ramené au rendement moyen de la culture, ce sont les mélanges Ray-grass/Trèfle et Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce qui sont les plus intéressants.
En utilisant les rendements agronomiques obtenus dans le cas des récoltes tardives, tous les mélanges étudiés sont intéressants, car ils ont des rendements énergétiques supérieurs ou égaux aux rendements des CIVE à cycle court les plus intéressantes, telles que le mélange Moha/Nyger/Tournesol/Vesce ou les mélanges contenant du Millet. Par exemple, les mélanges Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce et Ray-grass/Trèfle ont un rendement énergétique supérieur ou égal à 1500 Nm^3 CH_4/ha, qui est le rendement obtenu pour du Sorgho fourrager fertilisé. Ce résultat nous montre combien il est important de laisser implanter les CIVE à cycle long jusqu'à la fin du mois d'Avril afin de favoriser la production de biomasse.

En ce qui concerne le coût de production en tonne de matière sèche, il apparaît que les CIVE à cycle long ont des coûts très faibles quel que soit le couvert. Ce coût ne dépasse pas les 100 €/tMS, soit le coût le plus bas des CIVE à cycle court. Il atteint même les 50 €/tMS pour le mélange Ray-grass/Trèfle, ce qui en fait le mélange le plus intéressant d'un point de vue économique toutes CIVE confondues. Lorsque ces couverts sont fertilisés, ils sont beaucoup moins intéressants économiquement parlant étant donné que les rendements sont identiques alors que le coût de production augmente avec la fertilisation.

D'un point de vue environnemental, l'ACV a permis de mettre en évidence les mélanges Ray-grass/Trèfle et Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce lorsque ceux-ci ne sont pas fertilisés.

Au final, la culture de CIVE à cycle long présente un risque moins important, car elles sont implantées sur une période propice à leur implantation (températures clémentes, précipitations régulières). Par contre, il est important de laisser ces couverts en place au-delà de mi-Avril afin de favoriser leur reprise en végétation en vue d'une production de biomasse optimale. Pour cela, il faudra décaler de quelques semaines la culture de maïs suivante au risque d'avoir des rendements de culture moins importants.
Le mélange **Ray-grass/Trèfle** semble être le couvert le plus intéressant selon tous les points étudiés (agronomique, énergétique, économique et environnemental). Il est d'autant plus intéressant si les agriculteurs ne veulent pas adapter leur rotation à la production d'un couvert végétal. Cependant, il faut garder à l'esprit que le ray-grass est une plante asséchante pour les parcelles, donc il va avoir un impact sur les réserves hydriques disponibles pour les cultures suivantes.
Le mélange **Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce** est un bon compromis au mélange précédent, à condition de le laisser jusqu'à la fin du mois d'Avril. Il présente l'avantage d'améliorer la composition azotée du sol grâce à la présence de légumineuses dans le mélange.

Perspectives
Les principales perspectives à donner à ces essais sont les suivantes :

- **Evaluer l'impact de la modification de la succession culturale sur les rendements de la culture suivante**. En effet, nous avons vu que, dans certains systèmes de cultures, l'augmentation de la production d'une CIVE passe entre autres par un allongement de la durée du cycle de culture. **Au-delà du seul choix de l'espèce, il est nécessaire de réfléchir à l'insertion des CIVE dans la rotation. 3 cultures en 2 ans**. Cependant, à ce jour, aucun programme d'essais n'a évalué l'impact de ce type de rotation. Il serait donc intéressant de réaliser une étude sur cet impact tout en essayant d'évaluer si une éventuelle perte de rendement est compensée par la production d'énergie en méthanisation,

- Etudier le comportement des CIVE lors du stockage sous forme d'ensilage. A priori, il faudrait respecter les mêmes règles que celles employées pour l'ensilage de maïs ou d'herbe (respecter le stade végétatif de la plante et la finesse du hachage, soigner le tassement du silo,…). Cependant, il

serait intéressant d'évaluer les conditions de conservation sur le long terme ou encore connaître l'impact de ce type de stockage sur le potentiel méthanogène des couverts.

Références bibliographiques

1 ADEME, Caussade semences, Méthaneva. *Projet EXPECIVE 2012, Etude au champ des potentiels agronomiques, méthanogènes et environnementaux des cultures intermédiaires à vocation énergétique,* **2013**

2 Barème Entraide 2012/2013. Document trouvé le 15 Août 2013 sur le site internet : *http://www.indre.chambagri.fr/fileadmin/cda36/documents/Publications/Agro-Equipement/Explication_calcu_du_Bareme.pdf*

3 Hugues, P. *Les sorghos fourragers (II) Etude physiologique de la plante de sorgho fourrager, base pour la culture*. Fourrage n° 28, **1966**

4 Turlin, J-P., Grall, J. *Protection des cultures – Fiche 2.3 – Réduire le salissement avec les couverts végétaux*, **2014**

5 Garnier, J-F. *Evaluation des coûts de production en grandes cultures biologiques*. Présentation réalisée dans le cadre de la Journée Technique Grandes Cultures Biologiques, **2009**

6 Carte de la pluviométrie annuelle. Document trouvé le 15 Août 2013 sur le site internet : *http://meteo-express.com/pluie-annuelle.html*

Sigles et acronymes

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
ANOVA	Analyse de Variance
BCMA	Bureau de Coordination de Machinisme Agricole
BMR	Brow Mid Rid (Nervure Centrale Brune)
CIPAN	Culture Intermédiaire Piège à Nitrates
CIVE	Culture Intermédiaire à Vocation Energétique
CH_4	Méthane
CO_2	Dioxyde de carbone
CTU	Comparative Toxic Units
ddl	Degré de liberté
eq	Equivalent
F	Test de Fischer
ferti	Fertilisation
H^+	Ion hydrogène
ha	Hectare
ITK	Itinéraire technique d'implantation
Kg	Kilogramme
MB	Matière brute
MJ	Mégajoule
MS	Matière sèche
MV	Matière volatile ou matière organique
N	Azote
Nbaseline	Azote résiduel dans le sol
NH_3	Ammoniac
Nlixivié	Azote lixivié
Nm^3	Normo mètre cube
Norga	Azote provenant d'engrais organique
NO_2	Dioxyde d'azote
NO_3^-	Ion nitrate
Nsynth	Azote provenant d'engrais minéral
P	Phosphore
Pr	Probabilité de l'hypothèse nulle
Rdt	Rendement
Sb	Antimoine
SCE	Somme des carrés

Annexes

Annexe 1 : Liste des couverts à cycle court implantés et leurs principales caractéristiques (photos des couverts récoltés en automne 2013)

Annexe 2 : Liste des couverts à cycle long implantés et leurs principales caractéristiques (photos des couverts récoltés au printemps 2014)

Annexe 3 : Comparaison des rendements agronomiques des CIVE à cycle court en fonction de la date d'implantation et de la durée d'implantation

Annexe 4 : Rendements agronomiques des CIVE à cycle court implantés dans les zones Sud et Nord en fonction de la région d'implantation

Annexe 5 : Principe de l'analyse de variance ou ANOVA

Annexe 6 : Boîtes de dispersion des rendements moyens des couverts à cycle court en fonction du site d'implantation (Graphique 1) et de la région d'implantation (Graphique 2)

Annexe 7 : Résultats de l'ANOVA à 2 facteurs pour les CIVE à cycle court

Annexe 8 : Résultats de la comparaison multiple pour l'ANOVA à 2 facteurs sur le site d'implantation et le type de culture dans le cas des sites ayant implanté les couverts communs des CIVE à cycle court des zones Nord et Sud sans (Tableau 1) et avec Maïs (Tableau 2)

Annexe 9 : Résultats de l'ANOVA à 2 facteurs pour la région et le type de culture sans (Tableau 1) ou avec Maïs (Tableau 2) pour les CIVE à cycle court

Annexe 10 : Résultats de l'ANOVA à 3 facteurs pour les CIVE à cycle court pour le site d'implantation, le type de culture et la fertilisation

Annexe 11 : Boîtes de dispersion des rendements moyens des couverts à cycle long en fonction du site d'implantation

Annexe 12 : Résultats de la comparaison multiple pour l'ANOVA à 2 facteurs sur le site d'implantation et le type de culture pour les CIVE à cycle long

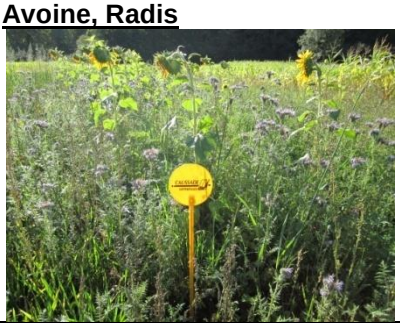
Annexe 13 : Résultats de la comparaison multiple pour l'ANOVA à 2 facteurs sur la région et le type de culture

Annexe 14 : Résultats de la comparaison multiple pour l'ANOVA à 3 facteurs sur le type de culture, le site d'implantation et le traitement par fertilisation pour les CIVE à cycle long

Annexe 15 : Cartes des températures moyennes annuelles et par saison, en °C, calculées à partir des normales de 1981 à 2010 sur la France entière (www.meteofrance.fr)

Annexe 16 : Cartes des précipitations moyennes annuelles et par saison, en mm, calculées à partir des normales de 1981 à 2010 sur la France entière (www.meteofrance.fr)

Annexe 1 : Liste des couverts à cycle court implantés et leurs principales caractéristiques (photos des couverts récoltés en automne 2013)

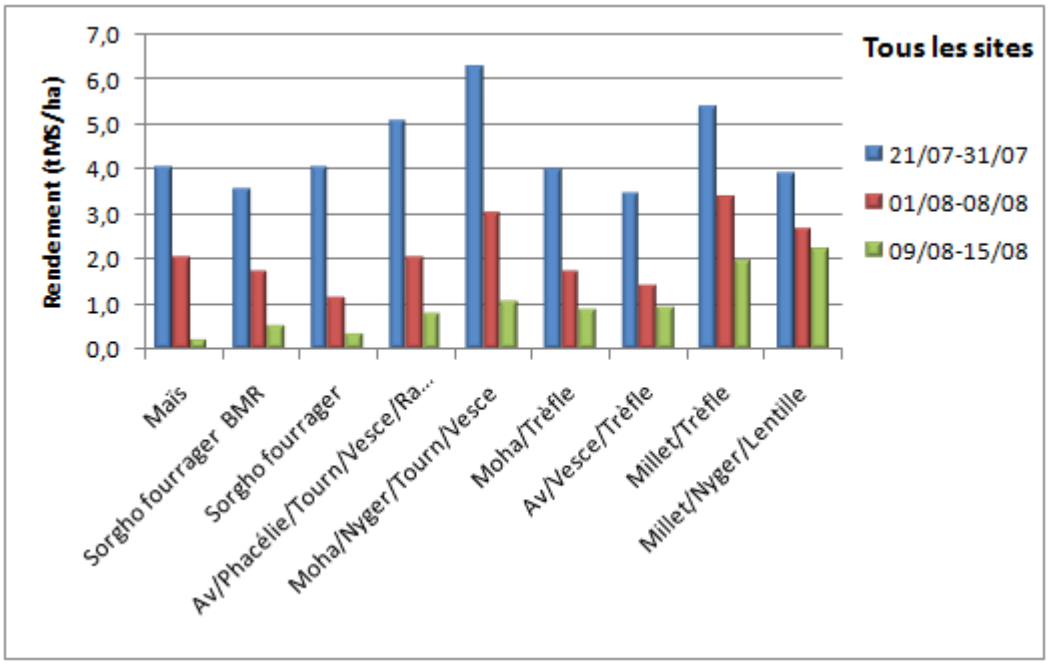
Maïs	3 variétés de maïs différentes ont été implantées. La variété Borgi et Troizi sont des maïs très précoces et montre une très bonne vigueur de départ. La variété Kaseri est demi-précoce.
Sorgho fourrager BRM	La variété implantée est demi-tardive. Il s'adapte bien aux terres difficiles. Même en situation de déficit hydrique important, cette variété assure un fort potentiel de rendement. Il est conseillé dans les régions du sud.
Sorgho fourrager	Ce sorgho fourrager est très vigoureux, son implantation est rapide ce qui permet un bon contrôle du salissement. Il nécessite une implantation au printemps sur sol suffisamment réchauffé.
Phacélie, Vesce, Tournesol, Avoine, Radis 	Ce mélange est composé d'une graminée, d'une hydrophyllacée, de crucifère et d'une fabacée. C'est un couvert à cycle long, d'implantation rapide, adapté aux semis de juillet à mi-août. Il possède une très bonne capacité de piégeage des éléments minéraux et aide à la structuration du sol.
Moha/Nyger/Tournesol/Vesce	Ce mélange, constitué de plantes résistantes à la chaleur, a été conçu spécialement pour la culture estivale de couverts dédiés à la méthanisation

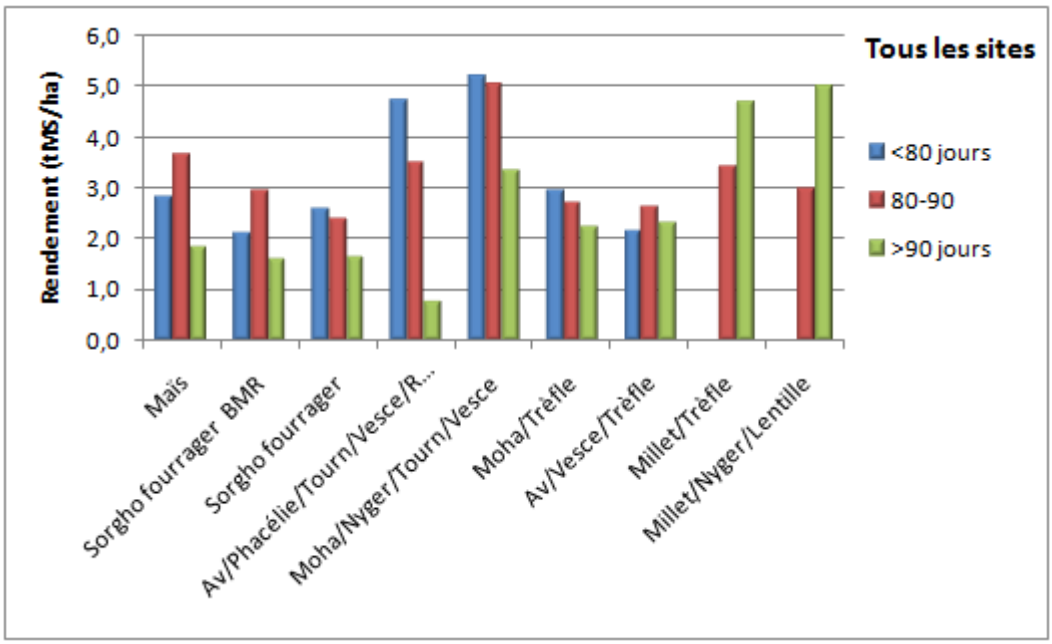
Moha/Trèfle d'Alexandrie	L'association moha fourrager-trèfle d'Alexandrie est adaptée à la période estivale, car elle est peu exigeante en eau et résistante à la chaleur. Ce mélange permet de constituer rapidement de la biomasse.
Avoine, Vesce, Trèfle d'Alexandrie, Trèfle incarnat	Ce mélange constitué de graminées et de fabacées est à cycle long. C'est un couvert autonome en azote, dense qui permet un bon contrôle des adventices et qui se caractérise par un bon effet restructurant du sol grâce à la complémentarité des systèmes racinaires. Il est recommandé de le semé de mi-juillet à début septembre. Il peut être contre indiqué en zone vulnérables où l'implantation de légumineuses pendant l'interculture peut être proscrite.
Millet perlé, Trèfle d'Alexandrie	Ce mélange constitue un fourrage équilibré. Le millet perlé possède de bonne valeurs UFL, une bonne résistance aux conditions séchantes et une capacité de bonne capacité de repousse. Il est très tardif, les épis n'apparaissent pas avant fin octobre. Le trèfle d'Alexandrie possède une bonne vitesse d'implantation et une valeur protéique élevée. Il apporte au mélange l'autonomie en azote. Ce mélange doit être semé sur tous types de sols suffisamment réchauffés (12°c) de mai à mi-juillet. Il est idéal derrière les protéagineux, les céréales immatures ou les céréales récoltées tôt.
Millet perlé, Lentille, Nyger, Trèfle d'Alexandrie	Mélange adapté aux zones sud, car il présente un bon comportement en zones sèches avec la synergie de 4 espèces d'implantation rapide, résistantes au sec et à la chaleur. Il a une très bonne capacité à fixer l'azote et les autres éléments nutritifs. Il a un effet structurant du sol, lié à la complémentarité des systèmes racinaires. C'est un couvert à cycle court (3 mois) qui est sensible au gel.

Annexe 2 : Liste des couverts à cycle long implantés et leurs principales caractéristiques (photos des couverts récoltés au printemps 2014)

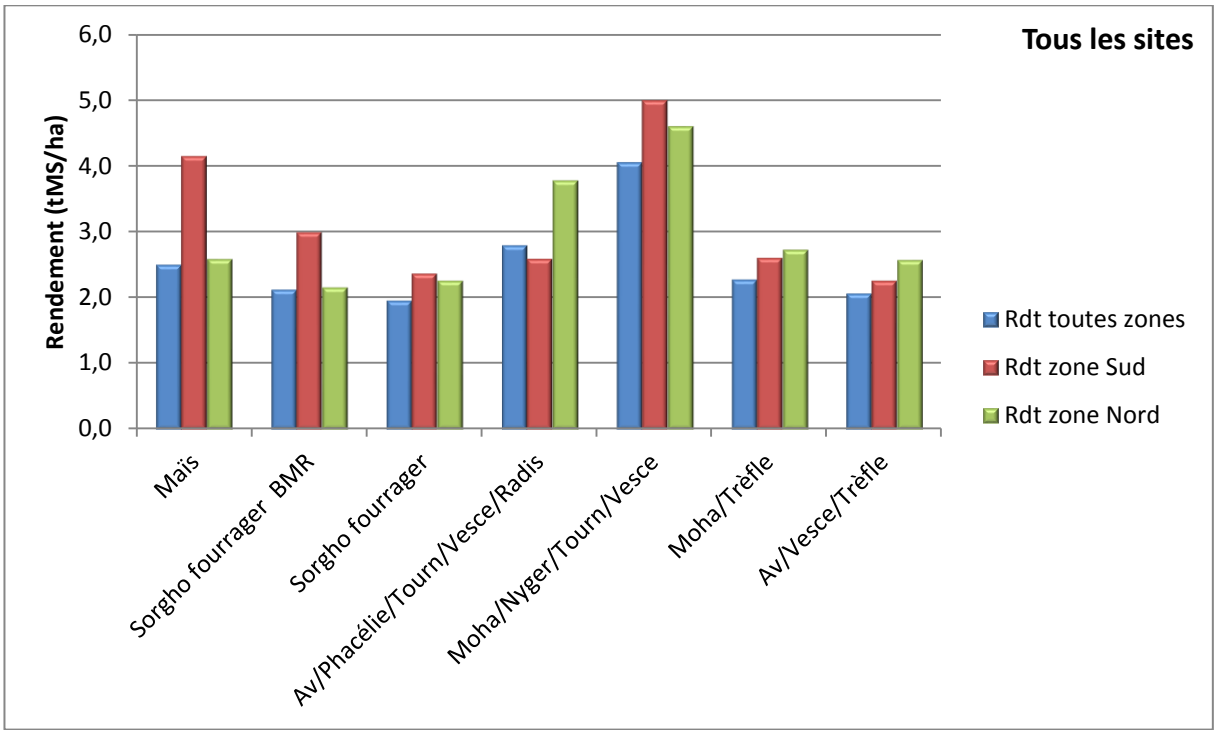
Avoine/Triticale/Seigle/Pois/Vesce	Ce mélange rustique est composé majoritairement de triticale, qui est un gage de productivité en matière sèche par hectare.
Ray-grass, Trèfle incarnat, Trèfle de Perse	Ce mélange constitue un bon fourrage, il contribue à l'amélioration des teneurs en protéines de la ration de base. La date de semis recommandée est de fin août à début octobre. Il convient à la majorité des sols : séchants, humides, acides… et résiste au froid.
Seigle, Vesce, Trèfle de Perse	Ce mélange contient des espèces qui ont un pouvoir de tallage important, soit une couverture intéressante en hiver. De plus, son système racinaire puissant permet de restructurer les sols. Ce mélange s'adapte à tous types de terres sauf les terres argileuses.

Annexe 3 : Comparaison des rendements agronomiques des CIVE à cycle court en fonction de la date d'implantation et de la durée d'implantation





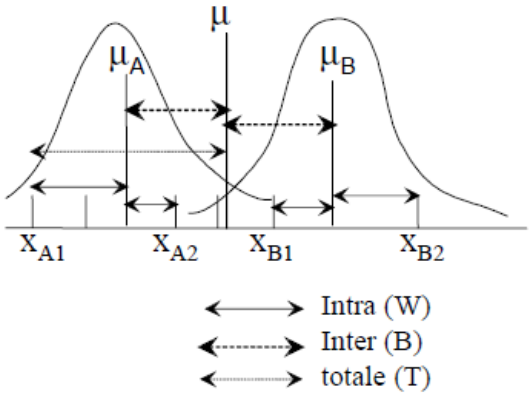
Annexe 4 : Rendements agronomiques des CIVE à cycle court implantés dans les zones Sud et Nord en fonction de la région d'implantation



Annexe 5 : Principe de l'analyse de variance ou ANOVA

L'ANOVA est basée sur le principe mathématique simple de la décomposition de la variation (dispersion) totale observée sur la variable, suivant différentes sources de variations :

- ✓ une variation inter-échantillons, due aux écarts entre les moyennes de chaque échantillon et la moyenne générale, et qui traduit l'effet du facteur (variation factorielle B),
- ✓ une variation intra-échantillon, qui cumule les écarts de chaque valeur individuelle de la variable à leur moyenne d'échantillon. Cette dispersion provient des fluctuations aléatoires d'échantillonnage (variation résiduelle W).



Dans une première partie de l'analyse, les différents effets sont testés un par un. Pour cela, 2 hypothèses sont émises :

- ✓ Hypothèse nulle (Ho) : les échantillons proviennent de x populations statistiques normales de même moyenne et de même variance, ou d'une population unique normale N(μ,σ).
- ✓ Hypothèse alternative (H_1) : certaines moyennes (ou toutes) diffèrent les unes des autres. Autrement dit, le facteur testé a un effet significatif sur la variable mesurée.

Dans le cas d'une ANOVA à deux facteurs, toute valeur de la variable peut se décomposer selon le modèle théorique suivant :

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$

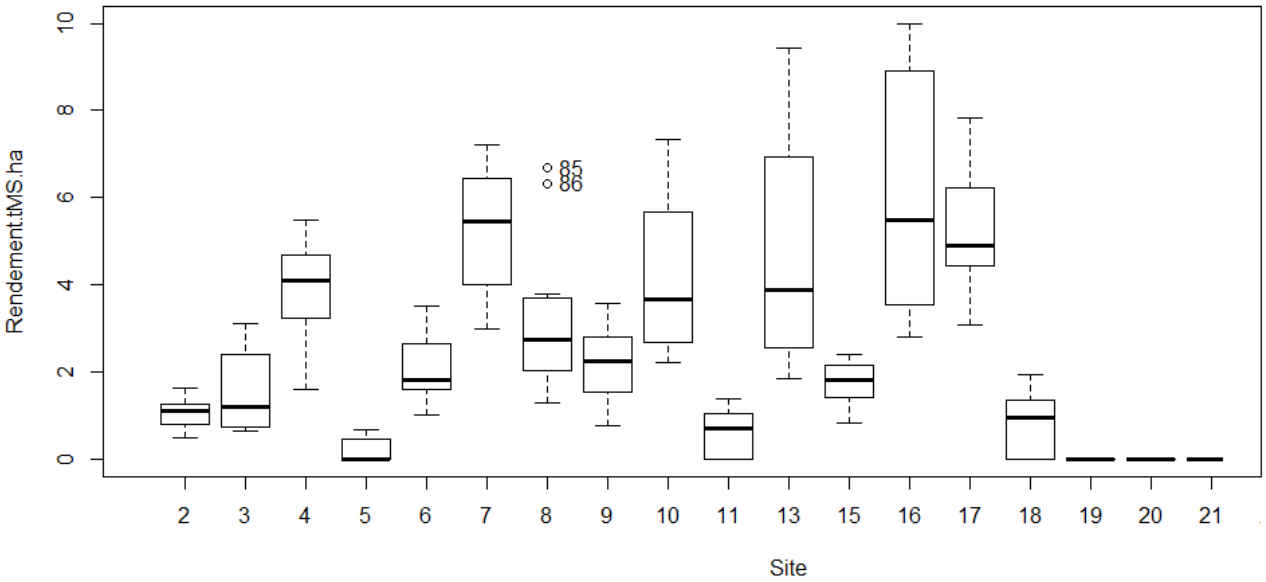
Avec :
Yij : La variable à expliquer, ici c'est le rendement
μ : La constante, rendement de référence qui est estimé par la moyenne de tous les rendements observés
α : L'effet d'un facteur, par exemple l'effet du type de culture, qui est estimé par l'écart entre son rendement moyen observé et le rendement de référence. Il y a i modalités, dans notre cas, s'il y a 6 cultures différentes il y a 6 modalités
β : L'effet de l'autre facteur
αβ : L'effet de l'interaction entre les deux facteurs. Il n'est pas toujours testé pour cause de manque de données
ε : la résiduelle, qui représente la part aléatoire de la variabilité des rendements observée (variabilité biologique, erreurs de mesures…)

Dans une première partie de l'analyse, les différents effets sont testés un par un à l'aide des hypothèses H_0 et H_1. L'analyse donne l'hypothèse à valider. La même démarche est ensuite appliquée pour les autres facteurs. A la fin, les facteurs qui ont un effet sont connus.

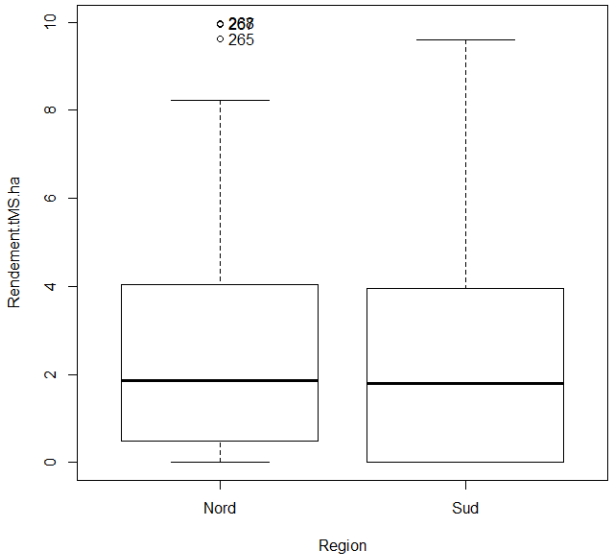
Lorsque l'effet global d'un facteur est validé, il faut savoir d'où vient cet effet. Si H1 est validée, l'effet du facteur n'est peut être valable que pour 1 modalité. Sont donc ensuite testées toutes les modalités du facteur dont l'effet a été accepté.

Annexe 6 : Boîtes de dispersion des rendements moyens des couverts à cycle court en fonction du site d'implantation (Graphique 1) et de la région d'implantation (Graphique 2)

Graphique 1



Graphique 2



Annexe 7 : Résultats de l'ANOVA à 2 facteurs pour les CIVE à cycle court

pour :

a. le site d'implantation et le type de culture dans le cas des sites ayant implanté les couverts communs des zones Nord et Sud et du maïs

```
$Ftest
                 SS  df     MS  F value    Pr(>F)
Culture      129.53   3 43.177 126.4965 < 2.2e-16 ***
Site         785.98  19 41.367 121.1961 < 2.2e-16 ***
Culture:Site 167.38  57  2.937   8.6033 < 2.2e-16 ***
Residuals     36.86 108  0.341
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

b. le site d'implantation et le type de culture dans le cas des sites ayant implanté les couverts communs de la zone Sud sauf le maïs

```
$Ftest
                 SS df     MS  F value    Pr(>F)
Culture       28.61  7  4.087   5.9797 3.183e-05 ***
Site         359.63  5 71.926 105.2308 < 2.2e-16 ***
Culture:Site  76.62 35  2.189   3.2026 5.050e-05 ***
Residuals     38.28 56  0.684
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

c. le site d'implantation et le type de culture dans le cas des sites ayant implanté les couverts communs de la zone Sud et du maïs

```
$Ftest
                 SS df     MS F value    Pr(>F)
Culture      11.257  8  1.407  24.354 3.841e-08 ***
Site         35.740  1 35.740 618.615 2.170e-15 ***
Culture:Site 14.851  8  1.856  32.132 4.037e-09 ***
Residuals     1.040 18  0.058
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Annexe 8 : Résultats de la comparaison multiple pour l'ANOVA à 2 facteurs sur le site d'implantation et le type de culture dans le cas des sites ayant implanté les couverts communs des CIVE à cycle court des zones Nord et Sud sans (Tableau 1) et avec Maïs (Tableau 2)

Tableau 1

$Ttest

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)
(Intercept)	2.37944444	0.03368976	70.62811849	3.251258e-110
Culture - bSorgho fourrager BMR	-0.42027778	0.07533260	-5.57896315	1.233941e-07
Culture - cSorgho fourrager	-0.58101852	0.07533260	-7.71271068	2.210630e-12
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis	0.46268519	0.07533260	6.14189884	8.186994e-09
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce	1.25870370	0.07533260	16.70861975	5.839773e-35
Culture - fMoha/Trèfle	-0.32879630	0.07533260	-4.36459532	2.478793e-05
Culture - gAv/Vesce/Trèfle	-0.39129630	0.07533260	-5.19424945	7.221371e-07
Site - 2	-1.30861111	0.14542373	-8.99860777	1.608943e-15
Site - 3	-0.84944444	0.14542373	-5.84116803	3.550550e-08
Site - 4	1.56222222	0.14542373	10.74255362	6.124732e-20
Site - 5	-2.20194444	0.14542373	-15.14157585	3.977089e-31
Site - 6	-0.32555556	0.12032058	-2.70573469	7.675239e-03
Site - 7	2.87555556	0.14542373	19.77363355	4.257696e-42
Site - 8	0.78972222	0.14542373	5.43049074	2.461909e-07
Site - 9	-0.24222222	0.12032058	-2.01314049	4.604482e-02
Site - 10	1.81777778	0.12032058	15.10778824	4.824257e-31
Site - 11	-1.73555556	0.12032058	-14.42442863	2.451946e-29
Site - 13	2.34055556	0.14542373	16.09472916	1.796303e-33
Site - 15	-0.61277778	0.14542373	-4.21373992	4.511751e-05
Site - 16	3.72555556	0.14542373	25.61862183	2.655867e-54
Site - 17	2.83166667	0.12032058	23.53435106	3.706009e-50
Site - 18	-1.52861111	0.14542373	-10.51142827	2.391886e-19
Site - 19	-2.37944444	0.14542373	-16.36214693	4.017417e-34
Site - 20	-2.37944444	0.14542373	-16.36214693	4.017417e-34
Site - 21	-2.37944444	0.14542373	-16.36214693	4.017417e-34
Culture - bSorgho fourrager BMR : Site - 2	0.54944444	0.32517735	1.68967626	9.334782e-02
Culture - cSorgho fourrager : Site - 2	0.06518519	0.32517735	0.20046041	8.414156e-01
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis : Site - 2	-0.43351852	0.32517735	-1.33317564	1.846708e-01
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce : Site - 2	-1.17453704	0.32517735	-3.61198911	4.244595e-04
Culture - fMoha/Trèfle : Site - 2	0.04296296	0.32517735	0.13212164	8.950805e-01
Culture - gAv/Vesce/Trèfle : Site - 2	0.95046296	0.32517735	2.92290645	4.053861e-03

Tableau 2

$Ttest

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)
(Intercept)	2.46064103	0.03279837	75.02326902	4.718537e-102
Culture - aMais	-0.05820513	0.08033927	-0.72449159	4.701860e-01
Culture - bSorgho fourrager BMR	-0.63500000	0.08033927	-7.90397983	1.527450e-12
Culture - cSorgho fourrager	-0.59025641	0.08033927	-7.34704687	2.773160e-11
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis	0.61269231	0.08033927	7.62631125	6.535183e-12
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce	1.25448718	0.08033927	15.61486829	1.383417e-30
Culture - fMoha/Trèfle	-0.22038462	0.08033927	-2.74317410	7.026347e-03
Culture - gAv/Vesce/Trèfle	-0.36333333	0.08033927	-4.52248715	1.454939e-05
Site - 2	-1.37206960	0.11942005	-11.48944092	5.168102e-21
Site - 3	-0.26706960	0.11942005	-2.23638827	2.718986e-02
Site - 5	-2.30849817	0.11942005	-19.33090958	1.619452e-38
Site - 7	2.57507326	0.11942005	21.56315697	6.406812e-43
Site - 8	0.75864469	0.11942005	6.35274140	4.030633e-09
Site - 9	-0.62873626	0.09932779	-6.32991297	4.502604e-09
Site - 10	1.77793040	0.09932779	17.89962719	1.498246e-35
Site - 11	-1.90873626	0.09932779	-19.21653822	2.768544e-38
Site - 15	-0.19064103	0.11942005	-1.59639045	1.130539e-01
Site - 16	3.75007326	0.11942005	31.40237584	1.995249e-59
Site - 17	2.00602564	0.09932779	20.19601614	2.958325e-40
Site - 18	-1.73135531	0.11942005	-14.49802882	4.628154e-28
Site - 19	-2.46064103	0.11942005	-20.60492394	4.608811e-41
Culture - aMais : Site - 2	0.16463370	0.29251818	0.56281526	5.746195e-01
Culture - bSorgho fourrager BMR : Site - 2	0.74642857	0.29251818	2.55173391	1.198568e-02
Culture - cSorgho fourrager : Site - 2	0.05668498	0.29251818	0.19378276	8.466764e-01
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis : Site - 2	-0.60126374	0.29251818	-2.05547473	4.202127e-02
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce : Site - 2	-1.18805861	0.29251818	-4.06148633	8.772527e-05
Culture - fMoha/Trèfle : Site - 2	-0.08318681	0.29251818	-0.28438168	7.766122e-01
Culture - gAv/Vesce/Trèfle : Site - 2	0.90476190	0.29251818	3.09301080	2.469196e-03

Annexe 9 : Résultats de l'ANOVA à 2 facteurs pour la région et le type de culture sans (Tableau 1) ou avec Maïs (Tableau 2) pour les CIVE à cycle court

Tableau 1

```
$Ftest
               SS  df      MS F value    Pr(>F)
Culture    107.85   5 21.5701  4.3224 0.0008765 ***
Region      12.52   1 12.5154  2.5079 0.1145966
Residuals 1192.68 239  4.9903
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                          Estimate Std. Error    t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                              2.3479991  0.1530380 15.3425860 1.916285e-37
Culture - bSorgho fourrager BMR         -0.4500813  0.3184793 -1.4132200 1.588921e-01
Culture - cSorgho fourrager             -0.5769106  0.3184793 -1.8114540 7.132590e-02
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis  0.4716260  0.3184793  1.4808687 1.399586e-01
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce         1.2694309  0.3184793  3.9859135 8.933193e-05
Culture - fMoha/Trèfle                  -0.3010569  0.3184793 -0.9452951 3.454629e-01
Culture - gAv/Vesce/Trèfle              -0.4130081  0.3184793 -1.2968132 1.959461e-01
Region - Nord                            0.2423581  0.1530380  1.5836460 1.145966e-01
Region - Sud                            -0.2423581  0.1530380 -1.5836460 1.145966e-01
```

Tableau 2

```
$Ftest
               SS  df     MS F value   Pr(>F)
Culture     92.96   6 15.494  3.0404 0.007208 **
Region      53.86   1 53.857 10.5685 0.001348 **
Residuals 1029.38 202  5.096
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                          Estimate Std. Error    t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                              1.9559478  0.2291280  8.5364859 3.308799e-15
Culture - aMais                         -0.2705238  0.3815743 -0.7089675 4.791621e-01
Culture - bSorgho fourrager BMR         -0.6241905  0.3815743 -1.6358292 1.034325e-01
Culture - cSorgho fourrager             -0.5515238  0.3815743 -1.4453902 1.498979e-01
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis  0.6764762  0.3815743  1.7728555 7.775970e-02
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce         1.3084762  0.3815743  3.4291514 7.338806e-04
Culture - fMoha/Trèfle                  -0.1771905  0.3815743 -0.4643668 6.428850e-01
Culture - gAv/Vesce/Trèfle              -0.3615238  0.3815743 -0.9474531 3.445400e-01
Region - Nord                            0.7448764  0.2291280  3.2509184 1.347773e-03
Region - Sud                            -0.7448764  0.2291280 -3.2509184 1.347773e-03
```

Annexe 10 : Résultats de l'ANOVA à 3 facteurs pour les CIVE à cycle court pour le site d'implantation, le type de culture et la fertilisation

dans le cas :

a. des sites ayant implanté les couverts communs des zones Nord et Sud sauf du Maïs

```
$Ftest
                              SS df      MS  F value    Pr(>F)
Culture                    72.43  5  14.486  33.4343 < 2.2e-16 ***
Site                      765.65  6 127.608 294.5268 < 2.2e-16 ***
Fertilisation             155.50  1 155.502 358.9074 < 2.2e-16 ***
Culture:Site              257.24 30   8.575  19.7908 < 2.2e-16 ***
Site:Fertilisation         79.89  6  13.316  30.7331 < 2.2e-16 ***
Culture:Fertilisation      17.14  5   3.427   7.9099 3.823e-06 ***
Culture:Site:Fertilisation 102.56 30   3.419   7.8902 3.413e-14 ***
Residuals                  36.39 84   0.433
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                                                  Estimate Std. Error      t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                                                  3.204464286 0.05078337  63.10066399 1.510111e-72
Culture - bSorgho fourrager BMR                              0.121250000 0.11355506   1.06776391 2.886861e-01
Culture - cSorgho fourrager                                 -0.141964286 0.11355506  -1.25018013 2.147054e-01
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis                     0.401250000 0.11355506   3.53352800 6.693885e-04
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce                            1.121607143 0.11355506   9.87720933 1.023511e-15
Culture - fMoha/Trèfle                                      -0.799464286 0.11355506  -7.04032258 4.853598e-10
Culture - gAv/Vesce/Trèfle                                  -0.702678571 0.11355506  -6.18799852 2.134551e-08
Site - 2                                                    -2.040297619 0.12439334 -16.40198427 6.424618e-28
Site - 4                                                     2.091369048 0.12439334  16.81254828 1.300445e-28
Site - 5                                                    -3.000297619 0.12439334 -24.11943919 1.613625e-39
Site - 8                                                     1.995535714 0.12439334  16.04214262 2.651723e-27
Site - 13                                                    2.705952381 0.12439334  21.75319325 2.886132e-36
Site - 15                                                   -0.003214286 0.12439334  -0.02583969 9.794465e-01
Site - 18                                                   -1.749047619 0.12439334 -14.06062099 8.747639e-24
Fertilisation - Non                                         -0.962083333 0.05078337 -18.94485060 4.545557e-32
Fertilisation - Oui                                          0.962083333 0.05078337  18.94485060 4.545557e-32
```

b. des sites ayant implanté les couverts communs des zones Nord et Sud et du Maïs

```
$Ftest
                              SS df     MS F value    Pr(>F)
Culture                    35.93  6  5.988  30.005 < 2.2e-16 ***
Site                      380.95  4 95.237 477.209 < 2.2e-16 ***
Fertilisation              63.41  1 63.410 317.731 < 2.2e-16 ***
Culture:Site              183.61 24  7.650  38.333 < 2.2e-16 ***
Site:Fertilisation         43.75  4 10.938  54.808 < 2.2e-16 ***
Culture:Fertilisation      36.33  6  6.055  30.342 < 2.2e-16 ***
Culture:Site:Fertilisation 114.87 24  4.786  23.982 < 2.2e-16 ***
Residuals                  13.97 70  0.200
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                                                  Estimate Std. Error      t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                                                  2.164857143 0.03775593  57.33820297 1.410554e-60
Culture - aMais                                             -0.480857143 0.09248276  -5.19942456 1.892312e-06
Culture - bSorgho fourrager BMR                              0.098642857 0.09248276   1.06660804 2.898138e-01
Culture - cSorgho fourrager                                  0.027142857 0.09248276   0.29349099 7.700153e-01
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis                     0.065142857 0.09248276   0.70437837 4.835340e-01
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce                            1.103642857 0.09248276  11.93349805 1.545841e-18
Culture - fMoha/Trèfle                                      -0.380357143 0.09248276  -4.11273556 1.050184e-04
Culture - gAv/Vesce/Trèfle                                  -0.433357143 0.09248276  -4.68581533 1.331466e-05
Site - 2                                                    -0.883071429 0.07551186 -11.69447346 3.995842e-18
Site - 5                                                    -1.989857143 0.07551186 -26.35158470 4.572749e-38
Site - 8                                                     2.543714286 0.07551186  33.68628884 5.461388e-45
Site - 15                                                    1.246571429 0.07551186  16.50828689 7.766293e-26
Site - 18                                                   -0.917357143 0.07551186 -12.14851757 6.616538e-19
Fertilisation - Non                                         -0.673000000 0.03775593 -17.82501480 9.991101e-28
Fertilisation - Oui                                          0.673000000 0.03775593  17.82501480 9.991101e-28
```

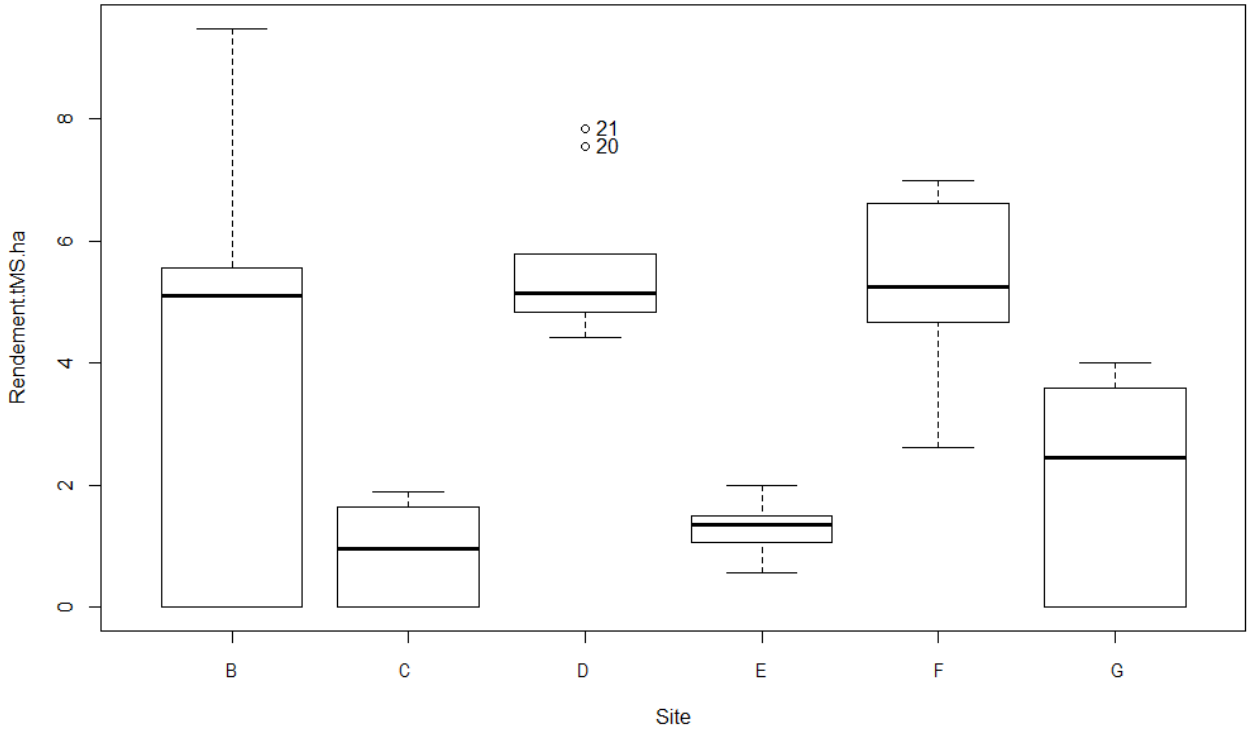
c. des sites ayant implanté les couverts communs de la zone Sud sauf du Maïs

```
$Ftest
                              SS df     MS F value    Pr(>F)
Culture                    35.93  6  5.988  30.005 < 2.2e-16 ***
Site                      380.95  4 95.237 477.209 < 2.2e-16 ***
Fertilisation              63.41  1 63.410 317.731 < 2.2e-16 ***
Culture:Site              183.61 24  7.650  38.333 < 2.2e-16 ***
Site:Fertilisation         43.75  4 10.938  54.808 < 2.2e-16 ***
Culture:Fertilisation      36.33  6  6.055  30.342 < 2.2e-16 ***
Culture:Site:Fertilisation 114.87 24  4.786  23.982 < 2.2e-16 ***
Residuals                  13.97 70  0.200
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                                              Estimate Std. Error      t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                                              2.164857143 0.03775593  57.33820297 1.410554e-60
Culture - aMais                                         -0.480857143 0.09248276  -5.19942456 1.892312e-06
Culture - bSorgho fourrager BMR                          0.098642857 0.09248276   1.06660804 2.898138e-01
Culture - cSorgho fourrager                              0.027142857 0.09248276   0.29349099 7.700153e-01
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis                 0.065142857 0.09248276   0.70437837 4.835340e-01
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce                        1.103642857 0.09248276  11.93349805 1.545841e-18
Culture - fMoha/Trèfle                                  -0.380357143 0.09248276  -4.11273556 1.050184e-04
Culture - gAv/Vesce/Trèfle                              -0.433357143 0.09248276  -4.68581533 1.331466e-05
Site - 2                                                -0.883071429 0.07551186 -11.69447346 3.995842e-18
Site - 5                                                -1.989857143 0.07551186 -26.35158470 4.572749e-38
Site - 8                                                 2.543714286 0.07551186  33.68628884 5.461388e-45
Site - 15                                                1.246571429 0.07551186  16.50828689 7.766293e-26
Site - 18                                               -0.917357143 0.07551186 -12.14851757 6.616538e-19
Fertilisation - Non                                     -0.673000000 0.03775593 -17.82501480 9.991101e-28
Fertilisation - Oui                                      0.673000000 0.03775593  17.82501480 9.991101e-28
```

d. des sites ayant implanté les couverts communs de la zone Sud et du Maïs

```
$Ftest
                                 SS df      MS F value    Pr(>F)
Culture                     33.805  8   4.226  12.998 1.394e-08 ***
Site                       153.213  1 153.213 471.280 < 2.2e-16 ***
Fertilisation               16.598  1  16.598  51.056 2.118e-08 ***
Culture:Site                47.018  8   5.877  18.078 1.749e-10 ***
Site:Fertilisation          15.392  1  15.392  47.346 4.708e-08 ***
Culture:Fertilisation       27.819  8   3.477  10.696 1.520e-07 ***
Culture:Site:Fertilisation  28.276  8   3.534  10.872 1.253e-07 ***
Residuals                   11.704 36   0.325
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                                              Estimate Std. Error     t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                                             1.59486111 0.06719567 23.7345805 1.409127e-23
Culture - aMais                                         0.74138889 0.19005806  3.9008547 4.022323e-04
Culture - bSorgho fourrager BMR                         0.36388889 0.19005806  1.9146196 6.351433e-02
Culture - cSorgho fourrager                             0.07888889 0.19005806  0.4150778 6.805484e-01
Culture - dAv/Phacélie/Tourn/Vesce/Radis               -0.36486111 0.19005806 -1.9197350 6.284333e-02
Culture - eMoha/Nyger/Tourn/Vesce                       1.43263889 0.19005806  7.5379011 6.550403e-09
Culture - fMoha/Trèfle                                 -0.36611111 0.19005806 -1.9263119 6.198960e-02
Culture - gAv/Vesce/Trèfle                             -0.49736111 0.19005806 -2.6168903 1.289148e-02
Culture - hMillet/Trèfle                               -0.75111111 0.19005806 -3.9520086 3.467300e-04
Culture - iMillet/Nyger/Lentille                       -0.63736111 0.19005806 -3.3535073 1.888696e-03
Site - 5                                               -1.45875000 0.06719567 -21.7089871 2.850182e-22
Site - 15                                               1.45875000 0.06719567 21.7089871 2.850182e-22
Fertilisation - Non                                    -0.48013889 0.06719567 -7.1453840 2.118057e-08
Fertilisation - Oui                                     0.48013889 0.06719567  7.1453840 2.118057e-08
```

Annexe 11 : Boîtes de dispersion des rendements moyens des couverts à cycle long en fonction du site d'implantation



Annexe 12 : Résultats de la comparaison multiple pour l'ANOVA à 2 facteurs sur le site d'implantation et le type de culture pour les CIVE à cycle long

```
$Ftest
                 SS df     MS F value    Pr(>F)
Culture      81.213  2 40.607  77.138 9.651e-14 ***
Site        187.659  5 37.532  71.296 < 2.2e-16 ***
Culture:Site 54.055 10  5.406  10.268 6.785e-08 ***
Residuals    18.951 36  0.526
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                                        Estimate Std. Error     t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                                            3.2231481 0.09873445  32.6446163 2.421659e-28
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois           0.2918519 0.13963159   2.0901563 4.372844e-02
Culture - Ray Grass/Trèfle                             1.3346296 0.13963159   9.5582209 2.048278e-11
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle                         -1.6264815 0.13963159 -11.6483772 9.060795e-14
Site - 1                                               0.9068519 0.22077694   4.1075480 2.199996e-04
Site - 2                                              -2.3009259 0.22077694 -10.4219488 2.035714e-12
Site - 3                                               2.3924074 0.22077694  10.8363104 6.961199e-13
Site - 4                                              -1.9375926 0.22077694  -8.7762455 1.800236e-10
Site - 5                                               2.0212963 0.22077694   9.1553780 6.214909e-11
Site - 6                                              -1.0820370 0.22077694  -4.9010420 2.032157e-05
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 1  0.5448148 0.31222574   1.7449388 8.952783e-02
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 1                  1.9587037 0.31222574   6.2733576 3.001493e-07
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 1              -2.5035185 0.31222574  -8.0182965 1.591121e-09
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 2  0.5159259 0.31222574   1.6524132 1.071472e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 2                 -1.2201852 0.31222574  -3.9080224 3.939640e-04
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 2               0.7042593 0.31222574   2.2556092 3.026817e-02
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 3 -0.7507407 0.31222574  -2.4044806 2.146481e-02
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 3                 -0.1601852 0.31222574  -0.5130429 6.110555e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 3               0.9109259 0.31222574   2.9175235 6.044150e-03
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 4 -0.1507407 0.31222574  -0.4827941 6.321650e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 4                 -1.2135185 0.31222574  -3.8866704 4.190949e-04
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 4               1.3642593 0.31222574   4.3694645 1.012152e-04
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 5 -0.3096296 0.31222574  -0.9916852 3.279702e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 5                  0.2709259 0.31222574   0.8677245 3.912928e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 5               0.0387037 0.31222574   0.1239606 9.020360e-01
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 6  0.1503704 0.31222574   0.4816079 6.329994e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 6                  0.3642593 0.31222574   1.1666535 2.510207e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 6              -0.5146296 0.31222574  -1.6482614 1.080007e-01
```

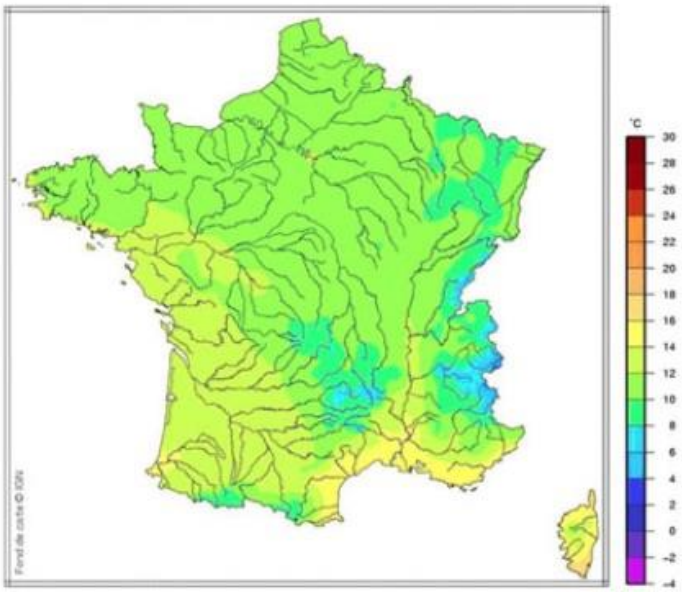
Annexe 13 : Résultats de la comparaison multiple pour l'ANOVA à 2 facteurs sur la région et le type de culture pour les CIVE à cycle long

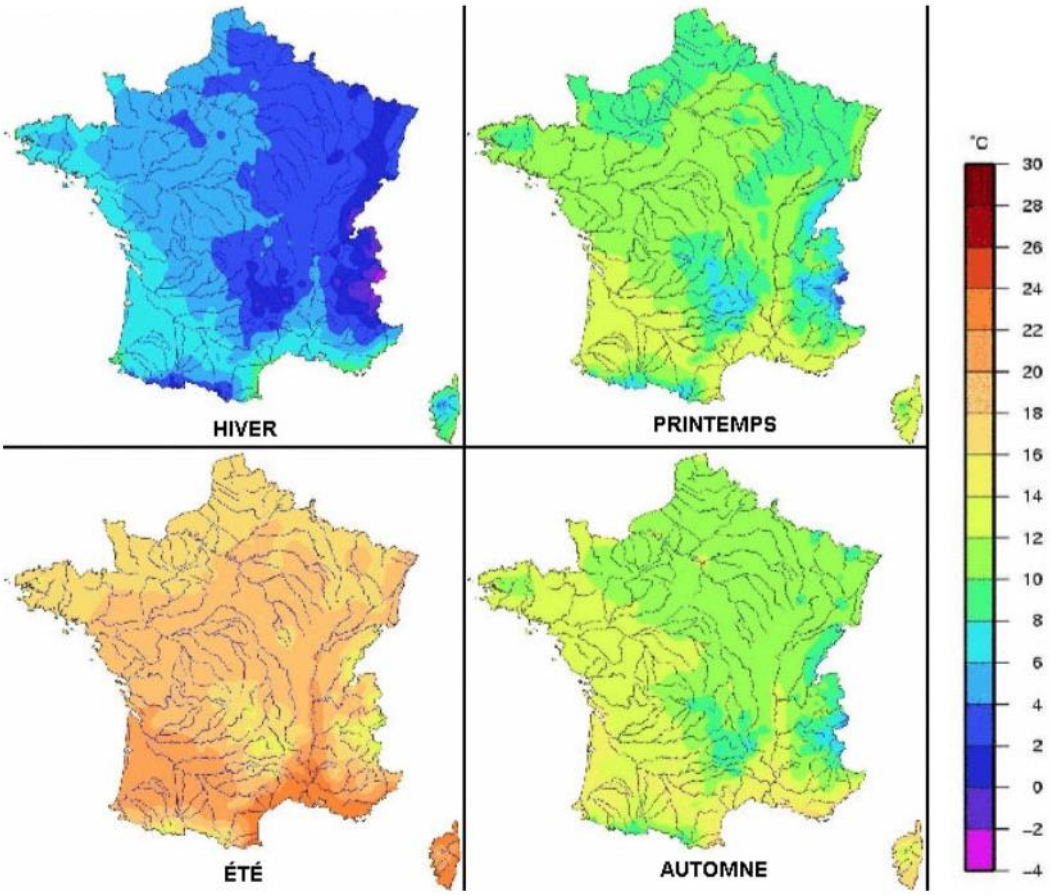
```
$Ftest
               SS df     MS F value    Pr(>F)
Culture    81.213  2 40.607  8.1515 0.0008628 ***
Region     11.590  1 11.590  2.3267 0.1334760
Residuals 249.075 50  4.981
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                            Estimate Std. Error    t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                                3.3869444  0.3221509 10.5135330 2.901788e-14
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois  0.2918519  0.4295346  0.6794607 4.999796e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle                 1.3346296  0.4295346  3.1071530 3.111823e-03
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle             -1.6264815  0.4295346 -3.7866136 4.104675e-04
Region - N                                -0.4913889  0.3221509 -1.5253375 1.334760e-01
Region - S                                 0.4913889  0.3221509  1.5253375 1.334760e-01
```

Annexe 14 : Résultats de la comparaison multiple pour l'ANOVA à 3 facteurs sur le type de culture, le site d'implantation et le traitement par fertilisation pour les CIVE à cycle long

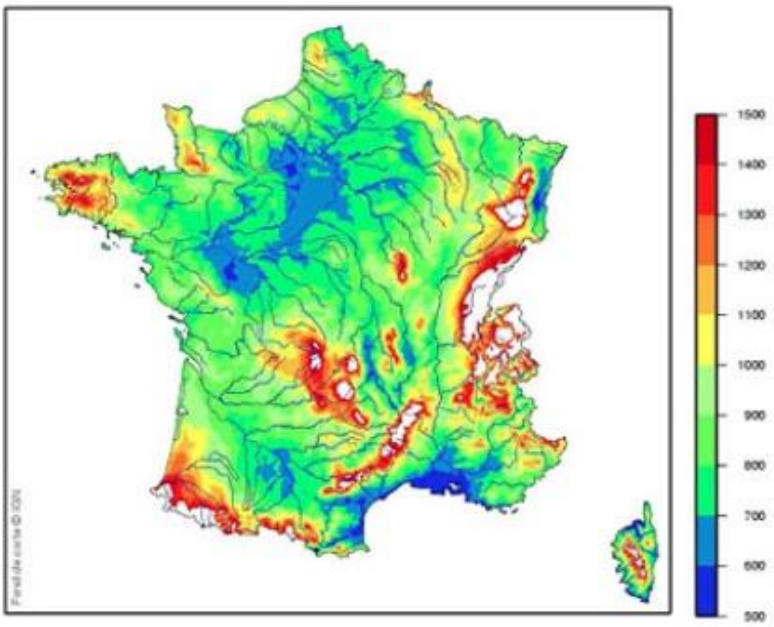
```
$Ftest
                              SS df     MS  F value    Pr(>F)
Culture                   59.759  2 29.879 149.0906 < 2.2e-16 ***
Site                     221.701  3 73.900 368.7430 < 2.2e-16 ***
Fertilisation              2.864  1  2.864  14.2907 0.0004334 ***
Culture:Site              29.670  6  4.945  24.6739 4.098e-13 ***
Culture:Fertilisation      0.104  2  0.052   0.2605 0.7717545
Site:Fertilisation         0.265  3  0.088   0.4405 0.7251086
Culture:Site:Fertilisation 2.836  6  0.473   2.3586 0.0446430 *
Residuals                  9.620 48  0.200
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$Ttest
                                                                   Estimate Std. Error      t value     Pr(>|t|)
(Intercept)                                                     2.597777778 0.05275877  49.23878724 9.502499e-43
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois                    0.300555556 0.07461217   4.02823791 1.993552e-04
Culture - Ray Grass/Trèfle                                      0.934722222 0.07461217  12.52774545 9.658463e-17
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle                                  -1.235277778 0.07461217 -16.55598336 1.780669e-21
Site - 2                                                       -1.563333333 0.09138087 -17.10788455 4.614239e-22
Site - 4                                                       -1.132222222 0.09138087 -12.39014525 1.451562e-16
Site - 5                                                        2.922222222 0.09138087  31.97849067 5.094657e-34
Site - 6                                                       -0.226666667 0.09138087  -2.48046087 1.668000e-02
Fertilisation - Non                                            -0.199444444 0.05275877  -3.78030894 4.333607e-04
Fertilisation - oui                                             0.199444444 0.05275877   3.78030894 4.333607e-04
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 2         0.451666667 0.12923206   3.49500471 1.030468e-03
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 2                          -0.652500000 0.12923206  -5.04905662 6.819784e-06
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 2                        0.200833333 0.12923206   1.55405191 1.267414e-01
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 4        -0.019444444 0.12923206  -0.15046146 8.810311e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 4                          -0.816944444 0.12923206  -6.32153066 8.076577e-08
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 4                        0.836388889 0.12923206   6.47199212 4.747987e-08
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 5        -0.640555556 0.12923206  -4.95663030 9.343480e-06
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 5                           0.541944444 0.12923206   4.19357576 1.174875e-04
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 5                        0.098611111 0.12923206   0.76305453 4.491649e-01
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 6         0.208333333 0.12923206   1.61208704 1.134997e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 6                           0.927500000 0.12923206   7.17701152 3.938455e-09
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 6                       -1.135833333 0.12923206  -8.78909857 1.452188e-11
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Fertilisation - Non  0.042777778 0.07461217   0.57333516 5.690943e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Fertilisation - Non               -0.049722222 0.07461217  -0.66640904 5.083402e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Fertilisation - Non             0.006944444 0.07461217   0.09307389 9.262323e-01
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Fertilisation - oui -0.042777778 0.07461217  -0.57333516 5.690943e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Fertilisation - oui                0.049722222 0.07461217   0.66640904 5.083402e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Fertilisation - oui            -0.006944444 0.07461217  -0.09307389 9.262323e-01
Site - 2 : Fertilisation - Non                                  0.087222222 0.09138087   0.95449107 3.446175e-01
Site - 4 : Fertilisation - Non                                  0.019444444 0.09138087   0.21278463 8.323961e-01
Site - 5 : Fertilisation - Non                                 -0.076111111 0.09138087  -0.83289985 4.090265e-01
Site - 6 : Fertilisation - Non                                 -0.030555556 0.09138087  -0.33437585 7.395526e-01
Site - 2 : Fertilisation - oui                                 -0.087222222 0.09138087  -0.95449107 3.446175e-01
Site - 4 : Fertilisation - oui                                 -0.019444444 0.09138087  -0.21278463 8.323961e-01
Site - 5 : Fertilisation - oui                                  0.076111111 0.09138087   0.83289985 4.090265e-01
Site - 6 : Fertilisation - oui                                  0.030555556 0.09138087   0.33437585 7.395526e-01
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 2         0.012777778 0.12923206   0.09887467 9.216496e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 2                          -0.118055556 0.12923206  -0.91351599 3.655372e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 2                        0.105277778 0.12923206   0.81464132 4.193012e-01
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 4        -0.182777778 0.12923206  -1.41433770 1.637168e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 4                           0.053055556 0.12923206   0.41054483 6.832332e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 4                        0.129722222 0.12923206   1.00379287 3.205121e-01
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 5         0.279444444 0.12923206   2.16234609 3.560508e-02
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 5                           0.178611111 0.12923206   1.38209596 1.733405e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 5                       -0.458055556 0.12923206  -3.54444205 8.888522e-04
Culture - Avoine/Triticale/Seigle/Vesce/Pois : Site - 6        -0.109444444 0.12923206  -0.84688306 4.012631e-01
Culture - Ray Grass/Trèfle : Site - 6                          -0.113611111 0.12923206  -0.87912480 3.837136e-01
Culture - Seigle/Vesce/Trèfle : Site - 6                        0.223055556 0.12923206   1.72600786 9.077859e-02
```

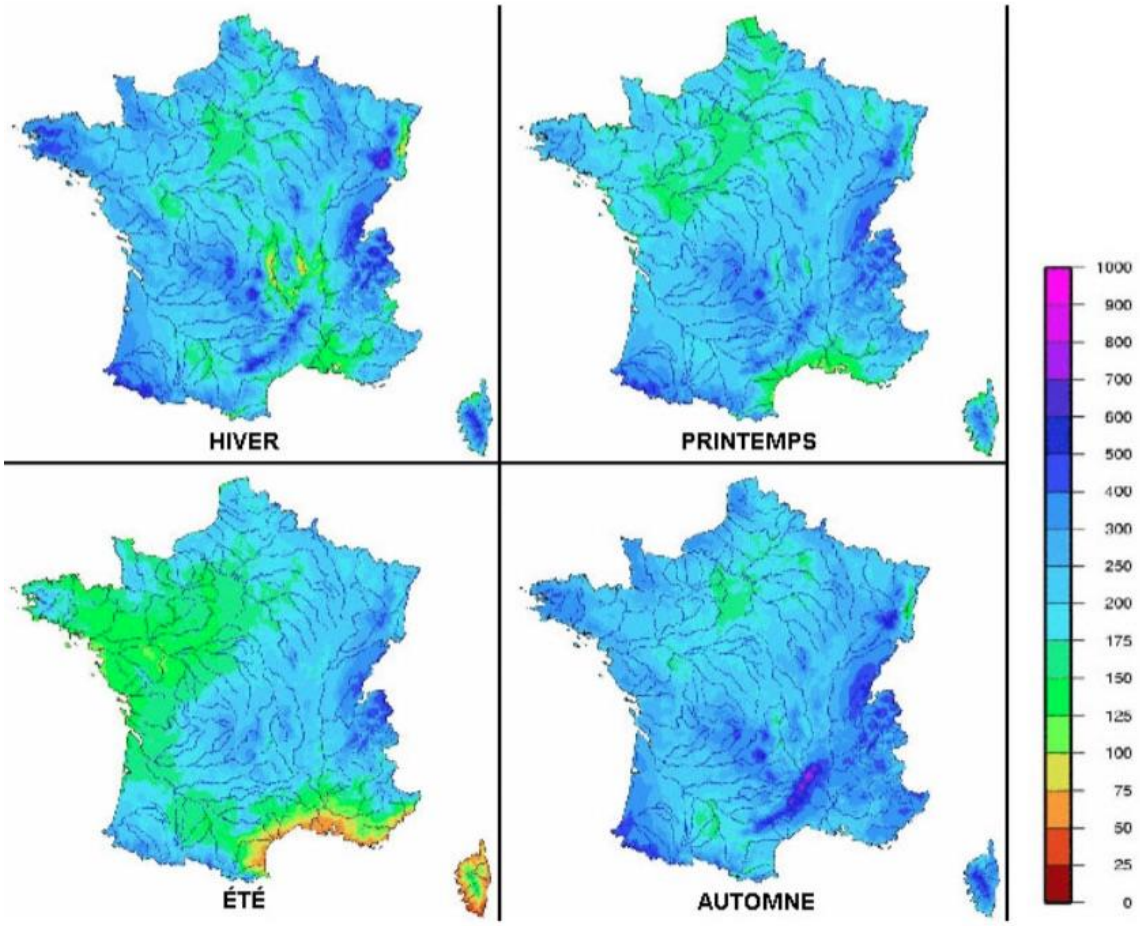
Annexe 15 : Cartes des températures moyennes annuelles et par saison, en °C, calculées à partir des normales de 1981 à 2010 sur la France entière (www.meteofrance.fr)





Annexe 16 : Cartes des précipitations moyennes annuelles et par saison, en mm, calculées à partir des normales de 1981 à 2010 sur la France entière (www.meteofrance.fr)





L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (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, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

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

www.ademe.fr