



Produire
de la **biomasse**
et du **méthane**
dans les Hauts-de-France avec la
double culture dédiée
à la biomasse

Sommaire

La démarche FILABIOM	3
Le projet Réseau de sites démonstrateurs	4
Introduction - Produire de la biomasse et du méthane avec la double culture dédiée	5
Intégrer une double culture dédiée dans son assolement	6
Les enjeux de la production de double culture dédiée	8
Maximiser la production de biomasse	8
Maximiser la production de méthane	8
Limiter les impacts agro-environnementaux	8
Précisions sur le jeu de données utilisé	9
Thème 1 - Maximiser la production de biomasse de la double culture dédiée	11
Jouer sur la durée des cycles culturaux	12
I. influences de la température et du rayonnement sur le rendement	12
II. repartir la période culturale d'un an entre les deux cultures	15
Réussir l'implantation de la 2 nd culture : les modalités	20
I. modalités d'implantation testées dans les essais	20
II. Effets du mode d'implantation sur la culture de maïs	21
III. retours d'expériences des pilotes des plateformes	23
Choisir les espèces à planter	24
I. Choisir sa céréale immature	24
II. Choisir sa deuxième culture	26
Thème 2 – Maximiser la production de méthane	32
Les leviers pour maximiser la production de méthane	34
I. relation entre le rendement et la production de méthane	34
II. relation entre la production de méthane et le potentiel méthanogène	34
III. maximiser la production de méthane de la double culture dédiée	35
Thème 3 – Impacts agro-environnementaux	36
Les exportations de phosphore et de potassium	36
Impacts sur le rendement de la culture suivante : le cas du blé	36
Etat de la réserve hydrique en entrée d'hiver avec la production d'une double culture dédiée	36
La perte d'azote par lessivage	36
Les contributions aux entrées de carbone humifié	36
Bibliographie	36

La démarche FILABIOM

La mise en place d'une filière d'approvisionnement d'une unité de valorisation en biomasse agricole passe, à la fois, par le développement concret de la chaîne de valeur (conception d'un approvisionnement, organisation de la production, contractualisation...) et par l'ancrage du projet dans son territoire.

La démarche FILABIOM (Figure 1) a vocation à aider à la mise en place de ces filières territoriales. Elle vous propose des clés de réussite basées sur des connaissances théoriques, des retours d'expérience et des références acquises via l'expérimentation et le suivi de projets.

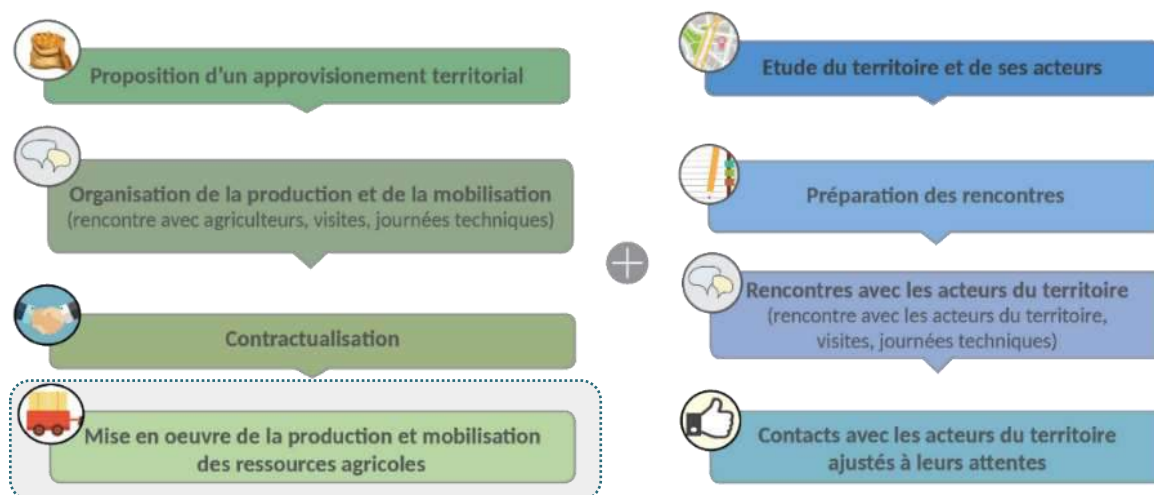


Figure 1 : La démarche FILABIOM

Ce guide technique *Produire davantage de biomasse et de méthane dans les Hauts-de-France avec la double culture dédiée à la biomasse* porte sur le volet de la mise en œuvre de la production et de la mobilisation des ressources agricoles et développe plus particulièrement un des leviers pour produire davantage de biomasse agricole : la double culture dédiée notamment destinée à la filière de bioénergie, pour la méthanisation, et qui peut également servir en alimentation animale au besoin (fourrage).

Vous avez dit « Biomasse » ?

On s'intéresse dans ce guide technique à la biomasse végétale d'origine agricole : soit l'ensemble de la matière d'une culture considérée comme biodégradable.

La biomasse végétale agricole est une source d'énergie renouvelable, dit bioénergie, valorisée dans différentes filières comme le bois-énergie, le biogaz, les biocarburants, etc. En plus d'être valorisée en bioénergie, la biomasse végétale agricole peut être valorisée dans des filières non alimentaires (fourrage, biomatériaux, tissus ...).

Dans ce guide technique, la biomasse végétale agricole est à destination de la méthanisation.

Vous avez dit « Double culture dédiée » ?

Il s'agit de la production successive de deux cultures dites « biomasse », produites en un an, toutes deux dédiées à une valorisation non alimentaire, ici pour la méthanisation.

A qui s'adresse ce guide technique ?

Aux agriculteurs souhaitant produire davantage de biomasse dans les systèmes de culture des Hauts-de-France.

Aux structures accompagnant techniquement ces agriculteurs.

Exemples : chambre d'agriculture, coopérative agricole, institut technique, bureau d'études ...

Le projet Réseau de sites démonstrateurs

Le projet partenarial Réseau de sites démonstrateurs (2015-2020) a permis de construire la démarche FILABIOM. Il visait à favoriser l'essor des filières de la bioéconomie au sein des territoires des Hauts-de-France et, en particulier, à démontrer la capacité de ces territoires à produire et mobiliser la biomasse agricole nécessaire à l'approvisionnement de ces filières. Il s'agissait notamment d'acquérir des références et connaissances utiles à la production et mobilisation de biomasses agricoles dans les Hauts-de-France, pour une valorisation territoriale de celles-ci dans les secteurs de la chimie, des agromatériaux ou encore de l'énergie.

Vous avez dit « bioéconomie » ?

« La bioéconomie englobe l'ensemble des activités liées à la production, à l'utilisation et à la transformation de bioressources. Elles sont destinées à répondre de façon durable aux besoins alimentaires et à une partie des besoins matériaux et énergétiques de la société, et à lui fournir des services écosystémiques » (MAAF, 2016)

Pour ce faire, un réseau de sites a été suivi pendant cinq ans. Il était composé de :

- Trois cas concrets où les étapes de la démarche ont été déployées et testées afin de répondre au projet d'approvisionnement en biomasse agricole d'un industriel
- Quatre plateformes d'expérimentation agronomique sur lesquelles des essais ont été conduits afin de tester et démontrer la capacité de l'agriculture des Hauts-de-France à produire la biomasse nécessaire aux filières de la bioéconomie (Figure 2).

Les résultats présentés dans ce guide sont issus de ce dispositif.



Les plateformes d'expérimentation agronomique du projet réseau de sites démonstrateurs

Sur chacune des plateformes du réseau ont été testés un, voire plusieurs, systèmes de culture prédominants dans les Hauts-de-France et déclinés en plusieurs scénarios selon un gradient croissant de production de biomasse (scénario témoin, alimentaire prioritaire et biomasse prioritaire).

Essais pluriannuels « système de culture »

Céréaliier-oléagineux
Pomme-de-Terre – Légumes

Betteravier

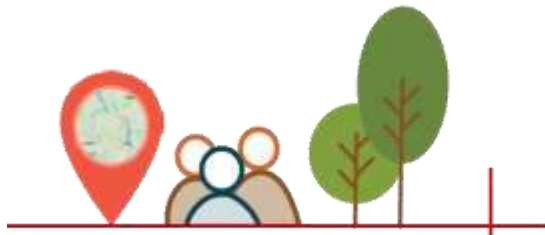
Betteravier en zone de BAC

Polyculture - élevage

Essais annuels répondant plus précisément à des questions techniques et alimentant la mise en place et la faisabilité des systèmes de culture.



Figure 2 : Les quatre plateformes d'expérimentation agronomique du projet



Introduction - Produire de la biomasse et du méthane avec la double culture dédiée

Intégrer une double culture dédiée dans son assolement

La double culture dédiée est la **production successive de deux cultures biomasses**, toutes deux dédiées à une valorisation non alimentaire.

La première culture est une **culture d'hiver récoltée au printemps**, par exemple une céréale immature associée ou non à des légumineuses, suivie par l'implantation d'une **culture d'été à cycle court** comme le maïs, sorgho, soja, tournesol, chanvre, betterave fourragère...

La succession de ces deux cultures conduit donc à un temps d'occupation du sol d'un an, favorisant une forte production de biomasse à l'hectare sur une année. Toutefois, contrairement aux CIVE (culture intermédiaire à valorisation énergétique), produites en interculture (i.e. en dérobées entre deux cultures principales), l'introduction de cette double culture conduit à une modification majeure de la rotation : soit en allongeant la rotation, soit en substituant une culture de la rotation (Figure 3).

Année N	Année N+1	Année N+2	...
S O N D J F M A M J J A	S O N D J F M A M J J A	S O N D J F M A M J J A	...
Colza	CIPAN	Betterave	Blé
Blé	CIVE d'été : ex sorgho	Betterave	Blé
Colza	CIVE d'hiver : ex triticale / pois	Betterave	Blé
Colza	CIVE d'hiver : ex triticale / pois	Maïs grain	Blé
Colza	Seigle	Sorgho	Blé

- Culture principale** pour une valorisation alimentaire
- CIPAN** (culture intermédiaire piège à nitrates, non récoltée)
- Interculture** déclarée en tant que culture dérobée pour une valorisation énergétique (**CIVE**)
- Double culture dédiée** : deux cultures pour une valorisation énergétique. Une des 2 cultures est à déclarer en tant que culture principale (deuxième culture par exemple) et l'autre culture en tant que dérobée (première culture par exemple) (cf page suivante pour la réglementation en vigueur). Les deux cultures sont bien toutes les deux pour une valorisation non alimentaire : la méthanisation.

Figure 3 : Exemples d'insertion de double culture dédiée dans un système de culture et comparaison avec celle d'une interculture ou d'une CIVE

L'évaluation

L'introduction d'une double culture dans un système de culture est une solution permettant une production et donc une exportation importante de biomasse.

Il est toutefois important d'évaluer les impacts de l'introduction de ce levier et de la modification des rotations sur l'agrosystème afin de les prendre en compte dans la conception d'un nouveau système de culture.

LA REGLEMENTATION SUR LA PRODUCTION DE DOUBLES CULTURES DEDIEES (2020)

«

DECRET N° 2016-929 DU 7 JUILLET 2016 PRIS POUR L'APPLICATION DE L'ARTICLE L. 541-39 DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT

»

Art. D. 543-291

Au sens de la présente section, on entend par « culture principale » la culture d'une parcelle qui est :

- ⓐ soit présente le plus longtemps sur un cycle annuel ;
- ⓑ soit identifiable entre le 15 juin et le 15 septembre sur la parcelle, en place ou par ses restes ;
- ⓒ soit commercialisée sous contrat.

Art. D. 543-292

Les installations de méthanisation de déchets non dangereux ou de matières végétales brutes peuvent être approvisionnées par des cultures alimentaires ou énergétiques, cultivées à titre de culture principale, dans une proportion maximale de 15 % du tonnage brut total des intrants par année civile.

Cette proportion peut être dépassée pour une année donnée si la proportion des cultures alimentaires ou énergétiques, cultivées à titre de culture principale, dans l'approvisionnement de l'installation a été inférieure, en moyenne, pour les trois dernières années, à 15 % du tonnage total brut des intrants.

Pour l'application des deux précédents alinéas, les volumes d'intrants issus de prairies permanentes et de cultures intermédiaires à vocation énergétique ne sont pas pris en compte.

Dans le cadre de la double culture dédiée, la première ou la deuxième culture peut être déclarée comme culture principale car :

- ⓐ La première culture est présente plus longtemps : elle est implantée vers le 1-15/10 et récoltée mi-mai (7 mois de cycle) alors que le maïs ou le sorgho est semé le 15/05 et récolté le 15/10 (5 mois de cycle)
- ⓑ La deuxième culture est identifiable entre le 15/06 et le 17/09

Selon la culture déclarée en principale, la seconde sera déclarée en dérobée

Annuellement, il est légalement possible d'approvisionner à hauteur de 15% du volume (en tMB) de matière première entrante un méthaniseur avec des cultures principales. Dans le cas des doubles cultures dédiées, le tonnage entrant de la culture déclarée comme dérobée n'est donc pas limitée tandis que celui de la culture déclarée comme culture principale peut aller jusqu'à 15% du tonnage brute.

Il s'agit donc bien du volume de matière première entrant et non pas de 15% de la surface cultivée en hectare.



Les enjeux de la production de double culture dédiée

MAXIMISER LA PRODUCTION DE BIOMASSE

Maximiser la production de biomasse sous-entend de maximiser la matière brute à l'hectare mais également,

dans le cadre d'une valorisation énergétique en méthane, la matière sèche. En effet, c'est la matière sèche qui est transformée en bioénergie.

Il convient donc de chercher à récolter une biomasse à un taux de matière sèche permettant de concilier adaptation à la filière de valorisation (qualité de la matière), réduction des volumes de transport (le transport de l'eau a un coût) et stockage de la ressource.

Cet enjeu soulève des questions techniques :

- Quel niveau de productivité potentiel pour la double culture ?
- Quelle conduite culturale pour maximiser la biomasse ? (Choix des espèces et des variétés, implantation, date de semis/récolte...)

LIMITER LES IMPACTS AGRO-ENVIRONNEMENTAUX

La production et l'exportation importante de biomasse ainsi que la modification de la rotation ont des conséquences sur les agrosystèmes : consommation des ressources (eau, azote, phosphore, potassium...), restitution au sol différentes (biomasse, carbone humifiée, azote)... Cela peut avoir des impacts agro-environnementaux très divers : pression adventices, fertilité du sol, consommation en eau, biodiversité, émission GES, impacts sur la culture suivante,...

Il convient donc d'évaluer ces impacts afin de pouvoir les prendre en compte dans la conduite de la double culture et dans la conception des systèmes de culture et ainsi concilier production de biomasse et environnement.

Vous avez dit « *Production de méthane* » ?

$$\text{Production de méthane} \left(\frac{m^3 CH_4}{ha} \right) = \text{Rendement} \left(\frac{tMS}{ha} \right) \times \text{Potentiel méthanogène} \left(\frac{m^3 CH_4}{tMS} \right)$$

MAXIMISER LA PRODUCTION DE METHANE

Dans l'optique d'une valorisation énergétique de la culture, il est recherché l'obtention d'un maximum de méthane par hectare de culture (CH_4/ha).

Cette production de méthane dépend de la quantité de biomasse produite, en matière sèche, et du potentiel méthanogène de cette biomasse. Ainsi pour maximiser la production de méthane, il faut maximiser :

- La biomasse sèche
- Le potentiel méthanogène

Cet enjeu soulève des questions :

- Quelle conduite culturale pour maximiser le potentiel méthanogène ? (Choix des espèces, variétés, stades de récolte ...)
- Quelle conduite culturale pour maximiser la quantité de méthane par hectare ? (Choix des espèces, variétés, date de récolte/semis)

Vous avez dit « *Potentiel méthanogène* » ?

Il s'agit de la quantité de méthane produite lors de la fermentation d'une quantité de biomasse. Cette quantité de méthane produite est estimée en laboratoire à partir d'un échantillon du végétal placé dans un bioréacteur fermé, permettant de reconstituer les conditions anaérobiques de la méthanisation.

Le potentiel méthanogène dépend notamment de la composition biochimique de la plante qui elle-même dépend de nombreux facteurs (espèces, variétés, stades de culture ...)

Précisions sur le jeu de données utilisé

DES DONNEES ISSUES DE PLATEFORMES D'EXPERIMENTATION PLURIANNUELLES

Les résultats présentés sont issus de toutes les plateformes expérimentales du projet Réseau de sites démonstrateurs. Il s'agit de données acquises sur trois plateformes d'essai pluriannuelles situées dans les Hauts-de-France : La Ferme 3.0 (80), Landifay (02), UniLaSalle Beauvais (60).

Dans certains systèmes de culture testés sur ces plateformes, où l'objectif principal était de maximiser la production de biomasse, des doubles cultures furent introduites, remplaçant ainsi certaines cultures alimentaires des rotations témoins. La production de ces doubles cultures a été menée dans des contextes pédoclimatiques et agronomiques différents en 2017, 2018 et 2019.

Les doubles cultures qui ont été testées sont :

- ① Triticale-pois suivi d'un sorgho
- ② Seigle suivi d'un sorgho
- ③ Seigle suivi d'un maïs
- ④ Céréales associée à des légumineuses suivie d'un maïs



DES DONNEES ISSUES D'ESSAIS FACTORIELS

Les résultats s'appuient également sur des données acquises sur la plateforme d'essai annuel de Catenoy (60), dont l'objectif était de produire des références pour améliorer la conduite de doubles cultures et lever certains verrous techniques rencontrés dans les essais *systèmes de culture*. Pour cela, des essais factoriels annuels ont été menés séparément sur la première et deuxième culture :

- ① Essais sur les espèces et les stades de récolte adaptés en première culture : différentes espèces et variétés de céréales, pures ou en mélange, récoltées en immature à différents stades ont été testées en 2017, 2018 et 2019
- ② Essais sur les espèces et variétés et les dates de semis adaptées en deuxième culture ont été menés en 2018 et 2019

En 2019, le même essai a été conduit à Monceau-sur-Oise (02) afin de comparer les résultats dans un autre contexte pédoclimatique.

PROTOCOLES DE RECOLTE

Sur les plateformes, l'estimation de la biomasse a été réalisée à partir de placettes de prélèvement manuel.

Pour la première culture (les céréales immatures pures ou en association avec des légumineuses), des placettes de 1m² ont été prélevées en séparant la biomasse supérieure à 10 cm qui représente « la biomasse exportable », et celle comprise entre 0 et 10 cm, considérée comme « la biomasse restituée » au sol, et en dissociant les légumineuses des graminées pour chaque catégorie.

Pour la deuxième culture (maïs ou sorgho), des placettes de 8m linéaire ou de deux rangs de 4m ont été prélevées en séparant la biomasse supérieure à 10 cm qui représente « la biomasse exportable » et celle comprise entre 0 et 10 cm considérée comme « la biomasse restituée » au sol,

Sur la biomasse exportée, des analyses de teneurs en C, N, P et K ont été réalisées pour estimer la quantité exportées de ces éléments. Des analyses de potentiels méthanogènes ont également été faites pour calculer des quantités de méthane produites par hectare.





Ce guide technique est une synthèse des résultats d'essais agronomiques pluriannuels et annuels de doubles cultures dédiées à une valorisation énergétique. Ces essais ont été conduits sur les quatre plateformes expérimentales du projet Réseau de sites démonstrateurs.

Ce guide vous propose :

- ⊕ Des références sur la production de la double culture pour une valorisation énergétique
- ⊕ Des clés de réussite pour sa conduite culturale (👉👈)
- ⊕ Des retours d'expérience des pilotes des plateformes expérimentales

Il est organisé autour de trois thèmes :

Thème 1

Maximiser la production de biomasse

- ⊕ Jouer sur la durée des cycles culturaux
- ⊕ Réussir l'implantation de la 2nd culture : les modalités
- ⊕ Choisir les espèces à implanter

Thème 2

Maximiser la production de méthane

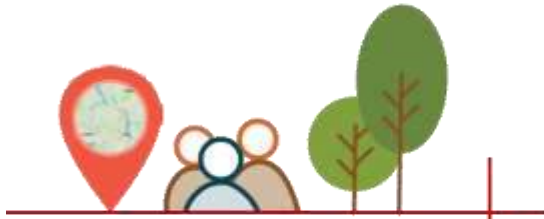
- ⊕ Les leviers pour maximiser la production de méthane

Thème 3

Impacts agro-environnementaux

- ⊕ Les exportations de phosphore et de potassium
- ⊕ Impacts sur le rendement de la culture suivante : cas du blé
- ⊕ Etat de la réserve hydrique en entrée hiver avec la production d'une double culture dédiée
- ⊕ La perte d'azote par lessivage
- ⊕ La contributions aux entrées de carbone humifié





Thème 1 - Maximiser la production de biomasse de la double culture dédiée

La double culture, par la succession de deux cultures biomasse en un an, est un levier intéressant pour produire des quantités importantes de biomasse.

Cette partie s'intéresse aux facteurs influençant la production de la biomasse de chacune des deux cultures individuellement et du cumul des deux. Elle fournit des clés de réussite pour maximiser la production et l'exportation de biomasse à partir de l'analyse exploratoire des résultats issus des plateformes expérimentales du projet Réseau de sites démonstrateurs.

Elle s'intéresse plus particulièrement à la phase d'implantation des cultures via les dates de semis et de récolte, le mode d'implantation et le choix des espèces à implanter.

A quelle date récolter la première culture ?

A quelle date semer la deuxième culture ?

Quels compromis entre les deux cultures pour maximiser le cumul de biomasse des deux cultures ?

Quelle mode d'implantation est à privilégier ?

Jouer sur la durée des cycles culturaux

Les cumuls de températures et de rayonnements sont les principaux facteurs de réussite d'une double culture. Cependant, il n'est pas possible d'influer ces facteurs climatiques. La solution pour maximiser la production de biomasse est alors de jouer sur la durée d'accumulation de degrés et de rayonnements de la culture, c'est-à-dire la durée du cycle culturale, au travers de la date de semis et/ou de la date de récolte.

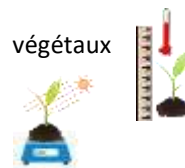
Le calendrier cultural de la double culture s'étend sur une période d'un an afin de limiter l'impact sur la culture alimentaire précédente et suivante. Ainsi, la durée du cycle culturale de chacune des deux cultures conduites successivement est réduite par rapport à une conduite en culture principale. Dans ce contexte, comment répartir cette période d'un an entre les deux cultures de la double culture afin d'assurer une croissance optimale et une biomasse cumulée maximale pour la double culture ? Faut-il répartir la durée de croissance à part égale ou est-il préférable de privilégier l'une des deux cultures ?

L'analyse faite dans cette fiche permet de proposer des clés de réussite pour le choix de la date de récolte de la première culture et la date d'implantation de la seconde.

I. INFLUENCES DE LA TEMPERATURE ET DU RAYONNEMENT SUR LE RENDEMENT

La croissance et le développement des couverts sont influencés directement par la température et le rayonnement reçus par le couvert au cours de sa période de culture :

- **La température** influence la vitesse de croissance et le développement des végétaux (croissance en taille)
- **Le rayonnement** influence le gain de poids sec d'un couvert (biomasse aérienne)



INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE RENDEMENT

La production de biomasse est liée à la quantité de chaleur accumulée par le couvert, représentée par le cumul des degrés-jours. Plus le cumul de degrés-jours est important et plus la biomasse produite par la culture est importante (Figure 4 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

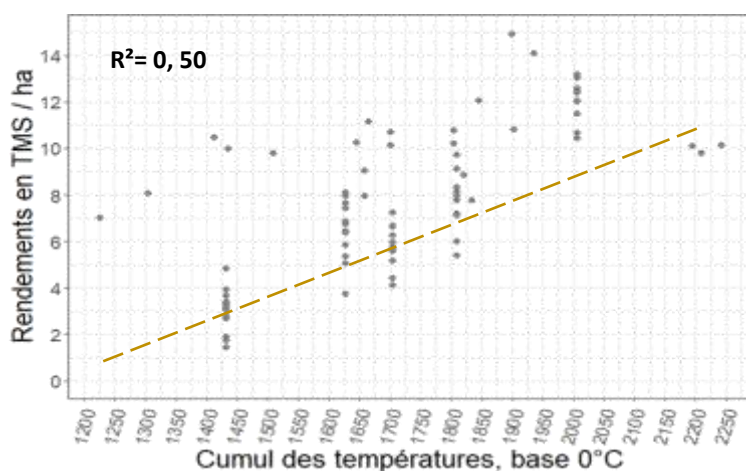


Figure 4 : Rendements de la première culture en fonction du cumul de températures du semis à la récolte

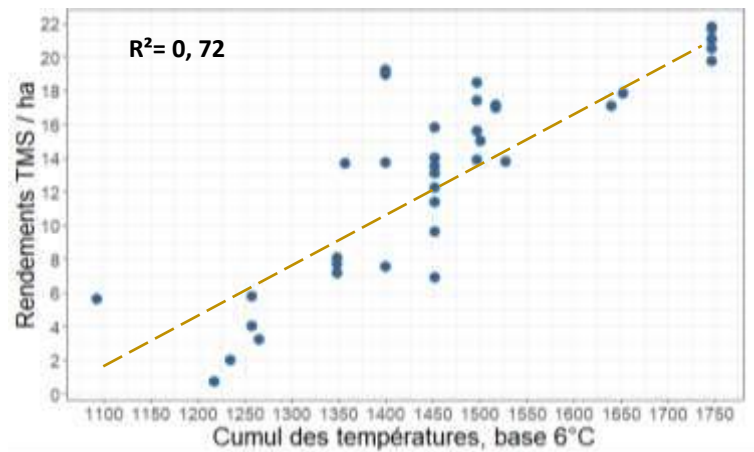


Figure 5 : Rendements de la seconde culture en fonction du cumul de températures du semis à la récolte

Le coefficient de détermination R^2 , qui exprime le niveau de corrélation linéaire entre deux variables, a été calculé pour préciser la relation entre le rendement et le cumul de températures pour les deux cultures.

- Pour la seconde culture, le R^2 est proche de 1. Il y a donc une bonne corrélation linéaire entre les deux variables rendement – cumul de températures (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).
- Pour la première culture, le R^2 vaut 0,5. Il indique une plus faible corrélation entre les deux variables : la variabilité des rendements est plus importante pour un même cumul de températures (Figure 4).

Ces différences s'expliquent par le jeu de données.

En effet, en plus de contenir les données des essais pluriannuels, le jeu de données pour la 1^{ère} culture contient également les données issues de cinq essais factoriels. Dans ces essais, plusieurs espèces et variétés ont été testées dans un même contexte pédoclimatique. Donc, pour un même cumul de températures, il y a une variabilité de biomasse liée au facteur « espèces/variétés » (cf. fiche « Choisir les espèces à planter »). Cette variabilité de rendement pour un même cumul se retrouve moins pour la deuxième culture pour lequel il y a moins d'essais factoriels (2 essais).



Un cumul de températures supérieur s'explique par un cycle cultural et/ou des températures supérieures. Ce dernier facteur ne pouvant pas être influencé, puisqu'il dépend uniquement du contexte climatique, il est uniquement possible de jouer sur la durée du cycle cultural pour favoriser la production de biomasse.

Vous avez dit « Somme de degrés-jours » ?

La somme de degrés-jours, ou cumul de Degrés Jours de Croissance, représente l'accumulation par une plante d'une quantité de chaleur quotidienne durant une période donnée. Plus ce cumul est élevé, plus la culture dispose de ressources de chaleur, permettant la croissance de la végétation.

Le calcul des degrés-jours est basé sur le principe physiologique que la croissance et le développement des plantes cesseront en dessous d'un seuil désigné comme température de base (T_b), différente selon les espèces (*dans nos calculs : pour la première culture, $T_b = 0^\circ\text{C}$; pour le maïs et le sorgho en deuxième culture, $T_b = 6^\circ\text{C}$*).

$$\sum_{j=1}^j = \sum_{i=1}^j (T^{\circ}\text{moyenne} - T^{\circ}\text{base})i$$

Ainsi, le temps thermique (somme de degrés jours) permet de représenter les besoins de chaleur assurant la croissance d'un couvert.

INFLUENCE DU RAYONNEMENT GLOBAL INCIDENT SUR LE RENDEMENT

Vous avez dit « *Rayonnement global incident* » ?

Le rayonnement global incident est l'énergie lumineuse parvenant au sol grâce à la lumière du soleil durant la journée. Elle comprend les radiations directes provenant du soleil et diffusées par l'atmosphère. Les rayonnements incidents permettent un accroissement de la biomasse totale, soit un gain en poids total, d'où la nécessité de disposer d'une certaine quantité de ressources lumineuses. Le cumul de rayonnements incidents correspond à la somme du rayonnement journalier durant le cycle de la culture.

La production de biomasse est liée à la quantité d'énergie lumineuse accumulée par le couvert, représentée par le cumul des rayonnements incidents.

Plus les rayonnements accumulés sont importants, plus la biomasse produite est importante (dans la gamme de valeurs des cumuls de rayonnements étudiée).

Le coefficient de détermination R^2 a été calculé pour représenter la relation entre le rendement et cumul de rayonnements (Figure 6 et Figure 7). Il est proche de 1 pour les deux cultures, indiquant qu'il y a bien une corrélation linéaire entre les facteurs.

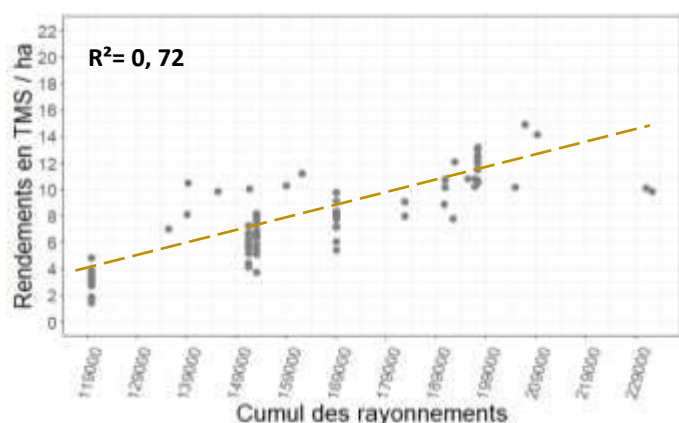


Figure 6 : Rendements de la première culture en fonction du cumul de rayonnements incidents

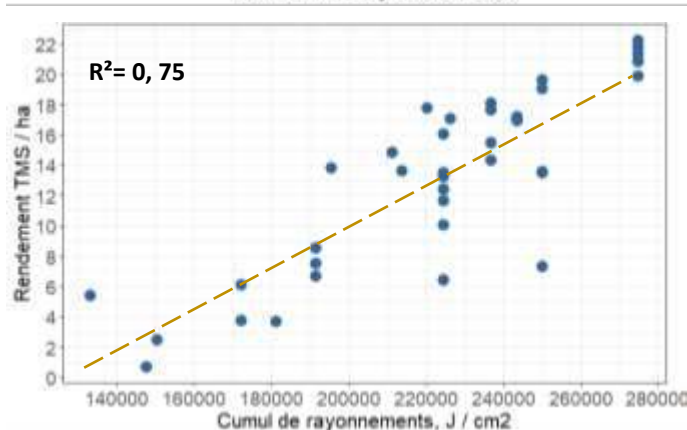


Figure 7 : Rendements de la seconde culture en fonction du cumul de rayonnements incidents



Un cumul de rayonnements supérieur s'explique par un cycle cultural et/ou des rayonnements plus intenses. Ce dernier facteur ne pouvant pas être influencé, puisqu'il dépend du contexte climatique, il est uniquement possible jouer sur la durée du cycle cultural pour favoriser la production de biomasse.



Il est nécessaire de maximiser la durée du cycle cultural des deux cultures pour produire davantage de biomasse, en permettant ainsi aux cultures d'acquérir un maximum de chaleur et de rayonnements incidents.

II. REPARTIR LA PERIODE CULTURALE D'UN AN ENTRE LES DEUX CULTURES

Pour maximiser les rendements de la première et de la deuxième culture, il serait nécessaire d'allonger chacun de leur cycle cultural afin d'augmenter les cumuls de températures et de rayonnements reçus. Or, la production successive des deux cultures contraint à restreindre leur durée de cycle par rapport à une conduite en culture principale (seule) afin de les mener sur une année seulement et ainsi limiter les effets sur la culture alimentaire suivante et précédente.

Cette période d'un an doit donc être répartie entre les deux cultures avec comme objectif de maximiser le cumul de biomasse.

Cette répartition doit se faire en prenant en compte (Figure 8) :

- **La date de récolte de la culture précédente pour le semis de la première culture.**

Si le semis de la première culture peut être fait précocement à l'automne, ce n'est pas à cette période de l'année que le gain en biomasse se réalise principalement pour la première culture. De plus, un semis trop précoce est risqué en termes de gel si la culture est à un stade trop avancé comme en montaison. Le gain en biomasse se fera principalement en sortie d'hiver et au printemps. Il est à noter que l'effet de la date de semis de la première culture sur son rendement final n'a pas été étudié dans les essais mis en place. Le semis avait lieu de fin septembre à début novembre dans les essais menés (du 29 septembre au 09 novembre).

- **Une date de récolte butoir de la deuxième culture entre mi-septembre et mi-octobre** pour permettre l'implantation de la culture alimentaire suivante sans trop la pénaliser si c'est une culture d'hiver. Il est à noter que, même s'il s'agit d'une culture de printemps permettant ainsi une récolte plus tardive de la deuxième culture, ce n'est pas à cette période que le gain en biomasse est optimal pour cette culture. En effet, dès la fin de l'été et à l'automne, les ressources lumineuses sont décroissantes ainsi que les températures. Le gain principal en biomasse se réalise pendant la période estivale. De plus, la récolte de cette deuxième culture ne peut pas être trop tardive pour bénéficier de conditions de récolte correctes (humidité du sol à la récolte) et ainsi éviter des tassements au passage de l'ensileuse. Sachant que plus la récolte est tardive, plus les risques de tassement augmentent (précipitations plus fréquentes et importantes).
- **La date de semis de la deuxième culture** doit également être défini pour qu'elle atteigne un taux de matière sèche de 32 % à la récolte pour permettre une bonne conservation au silo.

Il convient alors de chercher à jouer sur la date de récolte de la première culture et donc de semis de la deuxième pour remplir ces différentes conditions et maximiser le cumul de biomasse.

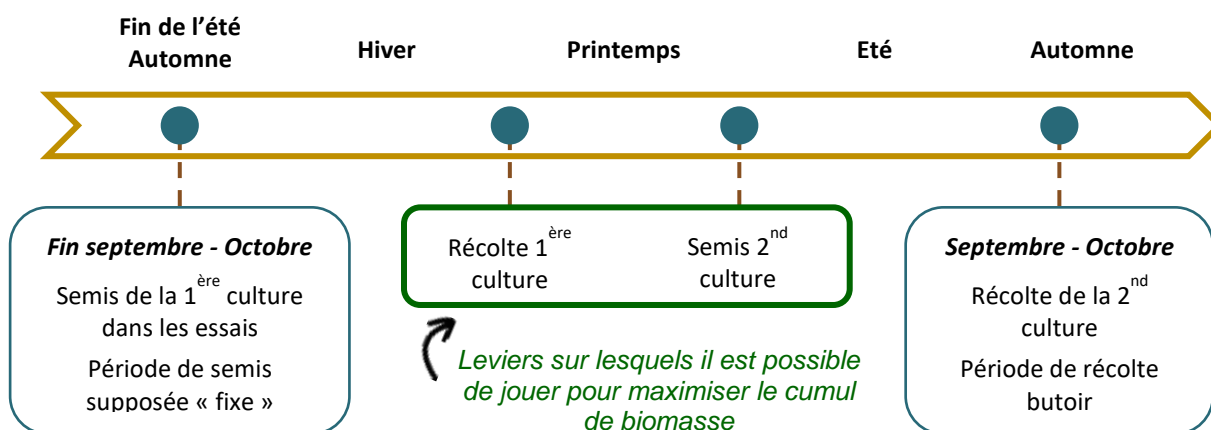


Figure 8 : Leviers pour jouer sur la durée du cycle cultural des deux cultures

DATE DE RECOLTE MAXIMISANT LA BIOMASSE DE LA PREMIERE CULTURE

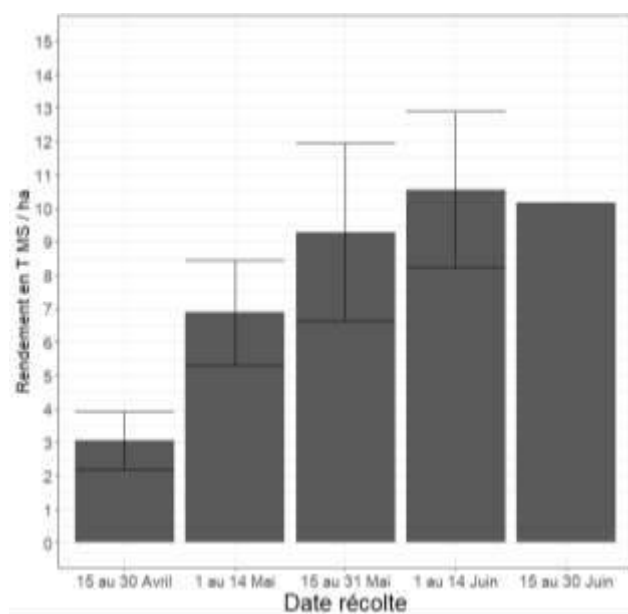


Figure 9 : Rendement moyen de la première culture en fonction de sa date de récolte

Plus la date de récolte est tardive, plus les rendements de la première culture augmentent jusqu'à atteindre un plateau (Figure 9).

Une récolte précoce, entre mi-avril et fin avril, entraîne une production de biomasse faible, entre de 2 et 4 T MS/ha. En revanche, les niveaux de biomasse atteints, avec une récolte fin mai-début juin, sont bien plus satisfaisants (8-13 T MS/ha).

Ainsi, entre mi-avril et mi-juin, décaler la date de récolte d'une céréale immature de 15 jours permet un gain moyen de 3 TMS/ha.

Récolter vers fin mai - début juin permet de maximiser la biomasse de la première culture mais cela peut avoir des conséquences sur l'implantation de la deuxième culture et donc sur sa production de biomasse. Il convient alors de regarder le rendement de la deuxième culture en fonction de sa date de semis.

DATE DE SEMIS MAXIMISANT LA BIOMASSE DE LA DEUXIEME CULTURE

Différentes dates de semis de la deuxième culture (en considérant les espèces de maïs et sorgho) furent testées dans les expérimentations pluriannuelles avec une période de récolte comprise entre mi-septembre et mi-octobre (Figure 10).

Les dates de semis les plus précoces (courant mai) permettent d'atteindre les rendements les plus élevés, grâce à un cycle cultural plus long. Les rendements atteints pour cette période de semis vont de 7 à 22 T MS/ha avec une moyenne de 15 T MS/ha.

De nombreux facteurs, autre que la date de semis, expliquent cette variabilité de rendements, notamment les conduites culturales, espèces, et contextes pédoclimatiques différents, puisque les résultats sont issus des essais annuels et pluriannuels des différentes plateformes d'essai.

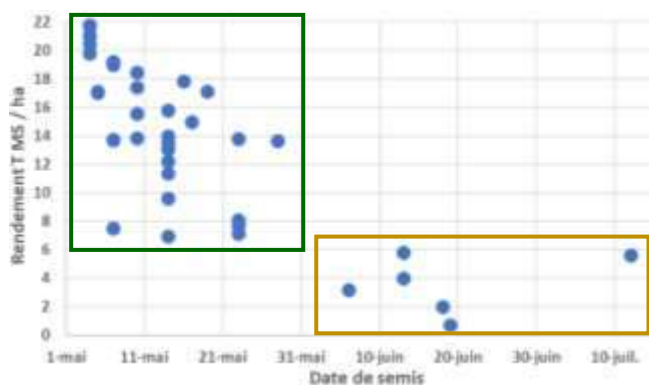


Figure 10 : Rendements de la deuxième culture en fonction de la date de semis

A l'inverse, les semis les plus tardifs (courant juin-juillet) ne permettent pas de dépasser les 6 T MS/ha avec un rendement moyen de 4 T MS/ha. Cela s'explique par la durée du cycle culturale réduite et les conditions hydriques limitantes (sol sec, implantation difficile). Le peuplement est hétérogène, la maturité n'est pas atteinte (taux matière sèche faible) et la biomasse finale est assez faible.

Selon ces premiers résultats, **tout contexte pédoclimatique confondue, la date de semis optimale pour maximiser la biomasse de la deuxième culture est début mai.**

Il est à noter qu'un semis en avril n'a pas été testé dans le projet car laissant peu de temps à la première culture.



Date de semis optimale par secteur géographique

Pour compléter et préciser ces résultats d'essai sur la date de semis de la deuxième culture, des calculs ont été réalisés pour **définir une période de semis optimale de la seconde culture par secteur géographique et ainsi prendre en compte les différences climatiques.**

- Méthode -

Ce calcul a été réalisé en fixant deux contraintes :

- Un taux de matière sèche de 32 % à atteindre à la récolte pour une bonne conservation.
Pour ce faire, il est nécessaire de cumuler en moyenne 1500 °CJ pour un maïs ou un sorgho pour atteindre ce stade. Il s'agit d'un cumul de températures à acquérir moyen qui varie en fonction des espèces, des variétés, de leur précocité, etc.
- Une date de récolte butoir estimée entre la mi-septembre (15/09) et la mi-octobre (15/10) pour permettre l'implantation de la culture alimentaire d'hiver dans de bonnes conditions sans la pénaliser.

Ce calcul a été réalisé pour les trois secteurs géographiques correspondants aux trois plateformes pluriannuelles du réseau. Les données météorologiques des secteurs étudiées ont ainsi été prise en compte. Il s'agit des données acquises sur les stations proches des plateformes d'essais au cours des dix dernières années par Agri4cast :

- Station d'Aizecourt-Le-Haut pour le secteur de Aizecourt-le-Haut (80)
- Station de Beauvais UniLaSalle pour le secteur de Beauvais (60)
- Station de Le Hérie-la Viéville pour le secteur de Landifay (02)
- Station de Luchy pour le secteur de Catenoy (60), toutes proches des lieux des essais.

source : <https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/dataportal/index.aspx>

Le calcul a été réalisé comme suit :

- Pour chaque secteur et chaque année de 2009 à 2019, une date de semis a été déterminée à partir d'une date butoir au 15 septembre, de telle sorte que le cumul des températures (en base 6°C) atteigne 1500°C entre la date de semis et la date butoir.

Date de semis?	$\sum_{i=1}^j (T^{\circ} \text{moyenne} - T^{\circ} \text{base}) i = 1500^{\circ}\text{C}$	Date de récolte au 15 /09
----------------	--	---------------------------

- La date de semis optimale pour un secteur correspond à la moyenne des 10 dates de semis calculées (pour les 10 années climatiques utilisées).
- Le même procédé est réalisé avec une date butoir au 15 octobre.

Cela permet de déterminer une période de semis optimale pour récolter le maïs ou le sorgho au taux de matière souhaité avec une récolte entre le 15/09 et le 15/10 pour chaque secteur.

Date de semis optimale par secteur géographique

- Résultats -

Tableau 1 : Période de semis de la deuxième culture par secteur géographique

Date de semis optimale calculée	Secteur Le Hérie-la-viéville (02)	Secteur Beauvais et Catenoy (60)	Secteur Aizecourt-le-Haut (80)
Pour une récolte au 15 septembre	28 avril	11 avril	25 avril
Pour une récolte au 15 octobre	29 mai	23 mai	26 mai

Pour les trois secteurs géographiques concernés, la période de semis idéale s'étend sur environ quatre semaines.

C'est dans le secteur de Beauvais que le semis doit être le plus précoce, pour permettre un cycle de culture plus long, du fait des températures plus fraîches, avec un semis dès le début de la deuxième décennie d'avril, pour une récolte au 15 septembre.

L'Aisne et la Somme sont des secteurs un peu plus chauds, où le semis peut être plus tardif et peut s'effectuer vers la fin avril, pour une récolte au 15 septembre.

Par ailleurs, quel que soit le secteur, pour une récolte le 15 octobre, le semis peut s'effectuer vers la fin de mai.



Ce calcul a uniquement pris en compte un stade de maturité à atteindre à la récolte et un temps thermique nécessaire pour l'atteindre. Il n'intègre pas la production de biomasse.

Or, les rayonnements incidents sont plus favorables aux cultures au printemps qu'à l'automne. En effet, le cumul de rayonnements est plus important en mai qu'en septembre - octobre (intensité des rayonnements et durée du jour plus longue)

Ainsi, le décalage de la date de semis à fin mai, tout en décalant sa date de récolte à l'automne afin d'atteindre un taux de matière sèche de 32 % MS, conduit à une réduction des ressources lumineuses acquises par la culture qui impacte directement la production de biomasse. Avec nos résultats, on peut estimer la perte de biomasse à environ 3 à 5 T MS/ha pour un semis dans la troisième décennie de mai par rapport à un semis fin avril à début mai.



La période de semis de la deuxième culture s'étend en moyenne de fin avril à fin mai.

Si un semis fin mai permet d'atteindre la maturité recherchée et un certain niveau de rendement tout de même satisfaisant, il est néanmoins préférable de semer fin avril - début mai pour garantir le niveau de maturité recherché et maximiser la production de biomasse.

DATES DE SEMIS DE LA 1^{ÈRE} CULTURE ET DE RECOLTE DE LA 2ND CULTURE : LE BON COMPROMIS POUR MAXIMISER LE CUMUL DE BIOMASSE

En considérant la période idéale de récolte de la première culture et celle de semis de la deuxième culture, cette partie s'attache à définir un compromis entre les deux et présente les niveaux de biomasse atteints.

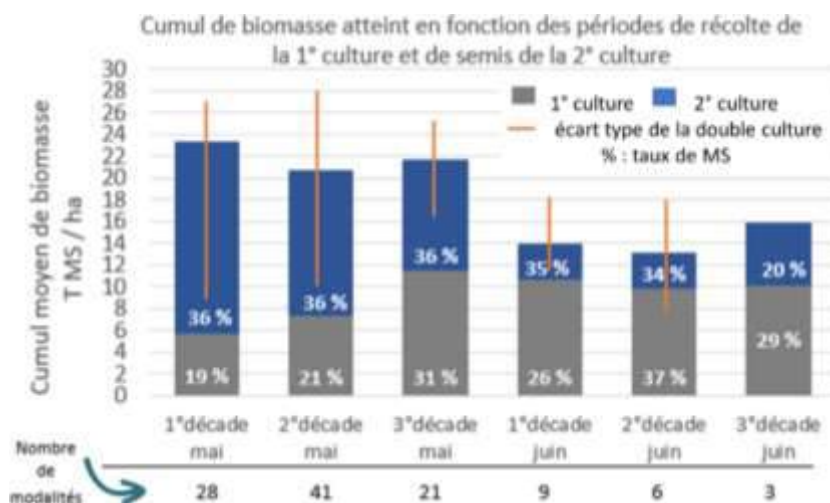


Figure 11 : Cumuls de biomasse atteints en fonction de la période de récolte de la première culture suivie du semis de la deuxième culture

Les niveaux de biomasse atteints avec la double culture dans les essais vont de 13 à 24 T MS/ha en fonction de la période de récolte et de semis (Figure 11). Les cumuls sont présentés par décade et par mois en considérant que le semis de la deuxième culture suit directement la récolte de la première culture.

Les meilleurs cumuls (21 à 24 T MS/ha) sont atteints avec une période de récolte/semis courant mai. Les plus faibles en juin (14 TMS/ha en moyenne).

Les cumuls de biomasse avec une récolte/semis en avril ne sont pas présentés sur ce graphique car la deuxième culture ne fut jamais semée en avril dans les essais du projet comme évoqué précédemment.

La variabilité des résultats est également à prendre en compte. Elle est représentée par les écarts-types (traits verticaux orange). Par exemple, avec une récolte/semis durant la deuxième décade de mai (soit du 11 au 20 mai), les cumuls de biomasse ont pu atteindre les 28 TMS/ha. Ils ont également pu être beaucoup plus faibles, de l'ordre des 10 TMS/ha seulement, pour cette même période. Cela s'explique par les différents contextes pédo-climatiques et les différentes conduites culturales (essais sur plusieurs plateformes pendant plusieurs années).



Récolter la première culture puis semer la deuxième culture vers mi-mai est un bon compromis. Il permet d'atteindre des quantités de biomasse de 8 TMS / ha pour les céréales immatures et de 10 à 15 TMS / ha pour le maïs/sorgho, soit un cumul moyen de biomasse de 20 TMS / ha avec la double culture. Le mois de juin, dans les contextes agronomiques et pédo-climatiques testés, est trop tardif et entraîne des niveaux de productions beaucoup plus faibles.

Réussir l'implantation de la 2nd culture : les modalités

La phase d'implantation est une étape déterminante dans la réussite d'une culture puisqu'un retard et une hétérogénéité de levée entraînent un retard de croissance et favorisent le développement des adventices, et impactent donc le rendement obtenu.

Si les modalités d'implantation de la première culture, la céréale immature, ne semblent pas poser de questions particulières (préconisations identiques à des céréales récoltées à maturité), l'implantation de la deuxième culture soulève des questions techniques liées aux conditions de semis délicates à cette période (faible humidité résiduelle du sol, résidus de cultures, ...).

Ainsi, la question de l'implantation de la deuxième culture sera abordée ici. Pour les modalités d'implantation de la céréale immature, vous pouvez vous référer aux préconisations des organismes de conseil de votre région pour l'implantation de céréales classiques.

I. MODALITES D'IMPLANTATION TESTEES DANS LES ESSAIS

Différents itinéraires techniques culturales ont été réalisés dans le cadre des essais annuels et pluriannuels pour le maïs et le sorgho.

Concernant le maïs

Sur la plateforme de Beauvais, chaque année, le maïs a été implanté selon deux modalités :

- Une modalité **avec travail du sol profond** : labour puis passage de la herse rotative, semis au semoir monograine suivi d'un roulage
- Une autre modalité **avec travail du sol réduit** : strip-till où seuls les rangs de semis sont travaillés puis semis au semoir monograine suivi d'un roulage

A noter que la date de semis des deux modalités de travail est la même. Il n'y a donc pas d'écart au niveau des conditions climatiques (températures, rayonnements incidents, pluviométrie). Le reste de l'ITK est également le même permettant bien de comparer uniquement le facteur « mode d'implantation ». Ces deux modalités ont ainsi pu être comparées sur la différence de levée, de croissance, d'homogénéité de la parcelle, de production de biomasse, etc.

LE JEU DE DONNEES « MAÏS »

Les résultats présentés portent sur données issues du suivi des 18 parcelles de maïs de la plateforme de Beauvais entre 2017 et 2019 : 6 parcelles de maïs par année, dont 3 en strip-till et 3 avec labour. Les indicateurs comparés entre les deux modalités sont la production de biomasse du maïs, le taux de levée et le salissement des parcelles.

Concernant le sorgho

Il était présent sur deux plateformes aux contextes pédoclimatiques différents : Le Hérie-la-Viéville dans l'Aisne et Aizecourt-Le-Haut dans la Somme.

Trois modes d'implantation différentes ont été testées :

- Implantation par **semis direct** [Aizecourt-le-Haut]
- Implantation en **TCS** (techniques culturales simplifiées : avec réalisation d'un ou plusieurs déchaumages) [Aizecourt-le-Haut]
- **Semis après labour et plusieurs travaux du sol** [Le Hérie-la-Viéville]

Ces implantations ayant été faites sur des années et des plateformes différentes, les données ne permettent pas de faire l'objet d'une évaluation du le facteur « mode d'implantation » *toutes choses égales par ailleurs*. Les retours d'expérience des pilotes des plateformes seront présentés



II. EFFETS DU MODE D'IMPLANTATION SUR LA CULTURE DE MAÏS

SUR LE RENDEMENT DU MAÏS

Il ressort des essais conduits que, en tendance, les maïs ont un rendement en moyenne supérieur avec une implantation avec labour (rendement moyen de 17,8 TMS/ha pour les parcelles en labour contre de 15,5 TMS/ha en strip-till) (Figure 12).

Une implantation avec labour sécurise davantage la réussite de la culture (moins de variabilité de rendement et de valeurs basses)

Une implantation avec strip-till permet d'atteindre des niveaux de rendement aussi élevé qu'avec labour (jusqu'à 22 TMS/ha) mais également beaucoup plus faible, voire des échecs complets d'implantation. On observe notamment une valeur extrême de 0 TMS/ha : il s'agit en fait d'une parcelle dont la levée fut très faible et hétérogène, favorisant un développement important des adventices. La parcelle fut donc broyée avant la fin de son cycle, durant l'été, donc non récoltée.

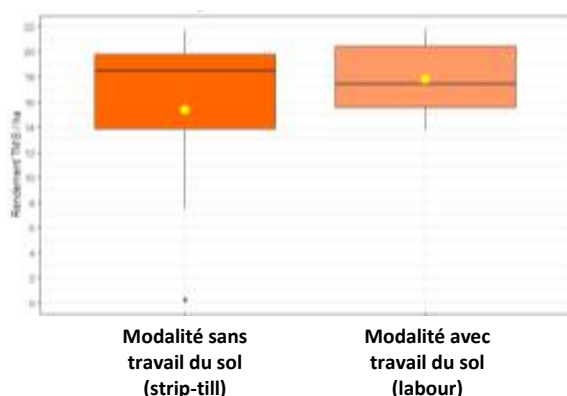


Figure 12 : Rendements des parcelles de maïs de Beauvais en fonction de la modalité d'implantation

SUR LA LEVÉE DU MAÏS

L'un des facteurs explicatifs de la biomasse en moyenne plus faible des modalités en strip-till est une moins bonne levée du maïs. En effet, le taux de levée en strip-till est de 83% contre 88% en moyenne pour les parcelles en labour (Figure 13). De plus, la dispersion des valeurs des taux de levée est très importante en strip-till : de 37% à 110% par rapport aux modalités en labour. La réussite de la levée des parcelles en strip-till paraît assez aléatoire.

Une implantation avec labour semble donc sécuriser davantage cette phase de levée, grâce notamment à une préparation du lit de semences. En effet, une moins bonne qualité du lit de semence peut principalement expliquer ces résultats pour les parcelles en strip-till, à savoir :

- La structure du sol en surface, plus motteuse
- La présence de résidus de culture du précédent à la surface du sol
- Le chevelu racinaire du précédent parfois dense
- Les repousses du précédent

Ces éléments peuvent induire un mauvais contact sol-graine et/ou créer des obstacles à la levée qui engendrent des difficultés de levée : levée retardée, longue et échelonnée entraînant une levée plus faible et hétérogène (impact direct sur le peuplement).

Les conditions climatiques sèches peuvent venir accentuer ces difficultés de levée (sol sec, notamment après une première culture et un manque de pluviométrie).

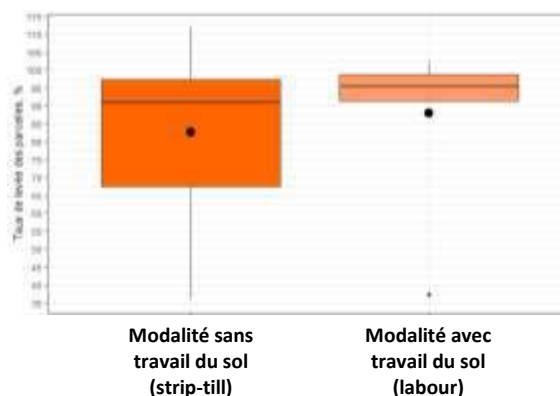


Figure 13 : Taux de levée des parcelles de maïs de Beauvais en fonction de la modalité d'implantation

SUR LE SALISSEMENT

Un autre facteur pouvant expliquer une différence de rendement entre les modalités d'implantation est un salissement différent des parcelles. Le travail du sol est, en effet, un levier mécanique de gestion des adventices qui concurrencent la culture et impactent son développement.

Le salissement des parcelles a été évalué sur les parcelles avec la note Barralis. L'effet du travail du sol sur la note Barralis est représenté sur la Figure 14 et la Figure 15.

Le salissement d'une parcelle peut évoluer au cours du cycle de culture, notamment en fonction du développement de la culture (couverture du sol), des périodes de levée des adventices et des interventions de désherbage. Les notes peuvent donc varier dans le temps.

Les notes Barralis reprises dans ces graphiques sont celles attribuées en début de cycle par les pilotes des plateformes, quand les cultures sont les plus sensibles à la concurrence des adventices.

Vous avez dit « Note Barralis » ?

C'est une note globale d'abondance d'adventices d'une parcelle. Elle se définit à partir de l'échelle Barralis qui distingue 6 classes de densité (d) :

+	$d < 0,1$ plante/m ²
1	$0,1 < d < 1$ plante/m ²
2	$1 < d < 3$ plantes/m ²
3	$3 < d < 20$ plantes/m ²
4	$20 < d < 50$ plantes/m ²
5	$50 < d < 500$ plantes/m ²

On observe une **plus forte variabilité des notes de salissement** avec les implantations au strip-till (Figure 14) :

- 20% des parcelles en strip-till enregistrent des notes Barralis les plus fortes (5 et 6) tandis qu'aucune de ces notes a été attribuée à une parcelle en labour.

A noter : ces notes extrêmes ont été attribuées en 2019, soit trois années après la réduction du travail du sol sur ces parcelles, évoquant un salissement des parcelles avec un travail réduit (semis direct de la majorité des cultures, ou en strip-till pour les cultures sarclées).

- On observe également les notes les plus faibles en strip-till : 40% des parcelles avec des notes de 1 et 2 contre 30% des parcelles labourées avec des notes de 2 (pas de note de 1).

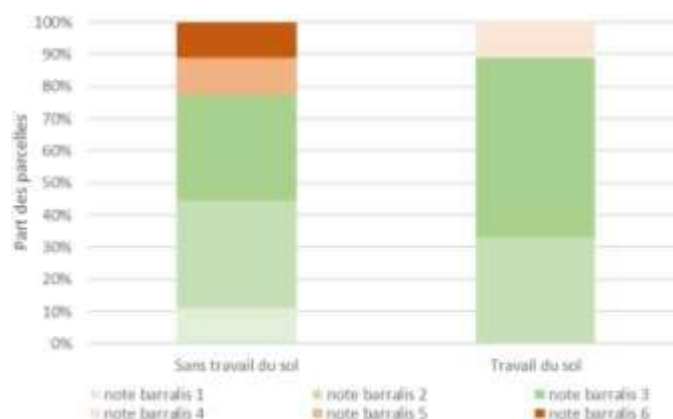


Figure 14 : Salissement des parcelles de maïs de Beauvais en fonction de la modalité d'implantation

Les parcelles avec les salissements les plus importants ont-elles les biomasses les faibles ?

Les parcelles avec les salissements les plus importants (note barralis de 5 et 6) sont bien celles avec les plus faibles rendements (Figure 15). Le salissement très important (note de 6) a d'ailleurs conduit à un broyage du maïs avant la fin de son cycle du fait de son faible développement et du risque de montée à graines des adventices.

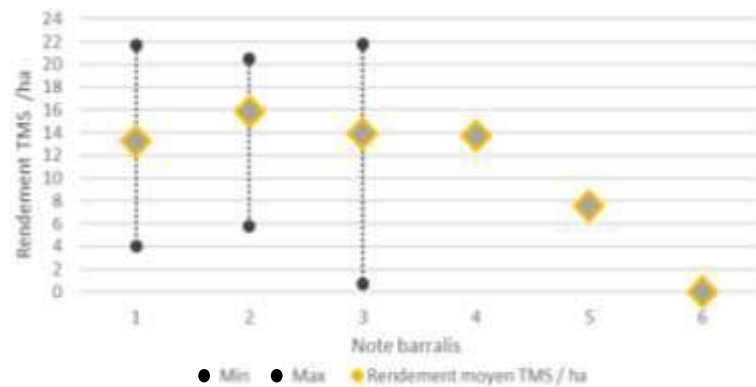


Figure 15 : Rendements des parcelles de maïs de Beauvais en fonction de leur salissement



En résumé sur les modalités d'implantation du maïs

Le labour sécurise davantage le rendement du maïs car il semble favoriser une meilleure et plus régulière levée du maïs et permet une meilleure maîtrise du salissement des parcelles (notamment des repousses du précédent). Toutefois, en prenant bien en compte ces points de vigilance, le strip-till peut permettre de gagner du temps et de l'énergie (cas où le semis est réalisé en un seul passage avec le strip-till, cas non étudié ici).

III. RETOURS D'EXPERIENCES DES PILOTES DES PLATEFORMES

« RETOUR D'EXPERIENCE DE JULIEN GUIDET ET D'OLIVIER REY - UNILASALLE BEAUVAIS - »

Pour l'implantation du maïs en strip-till :

- ⊕ La levée est retardée de quelques jours et échelonnée, induisant une hétérogénéité des stades.
- ⊕ L'importance des résidus de culture du précédent accentue la perte de pied. Parfois deux passages de strip-till sont à envisager pour gérer les résidus et le chevelu racinaire très dense.
- ⊕ Les repousses du précédent sont plus importantes qu'en labour et concurrencent le maïs.
- ⊕ Le salissement de la parcelle peut être plus important : les parcelles se salissent plus rapidement lorsque la culture est plus longue à lever et le peuplement réduit.
- ⊕ Cependant, en non travail, la fertilité biologique semble améliorée.

Certains points de vigilance en non travail sont à bien prendre en compte : la levée et le peuplement, la gestion des repousses et des résidus, et l'hétérogénéité ...

« RETOUR D'EXPERIENCE DE NICOLAS JULLIER (CA AISNE) ET DE MATTHIEU PREUDHOMME (CA SOMME) »

- ⊕ L'implantation du sorgho demande un lit de semence très fin et un sol bien réchauffé.
- ⊕ Les besoins en eau du sorgho sont les plus importants lors de la levée. Une fois l'implantation réussie, le sorgho est plus vigoureux que le maïs même en conditions stressantes.
- ⊕ Dans les sols qui le permettent, privilégier le labour pour éviter les problèmes de repousse du précédent. Dans les sols plus argileux, privilégier le strip-till ou le semis direct.
- ⊕ Apporter l'azote dès le semis pour qu'il soit valorisé dès les premières pluies.

Choisir les espèces à implanter

Différentes espèces et variétés de premières et deuxièmes cultures ont été étudiées pour afin de déterminer celles qui permettent de produire davantage de biomasse dans les conditions de la double culture, en prenant ainsi en compte les spécificités de celle-ci : cycle de culture raccourci, date de récolte/semis, succession de deux cultures dans un temps plus court ...

Les essais ont été conduit au sein d'un même contexte pédoclimatique et avec un itinéraire technique identique. Ils permettent donc d'étudier spécifiquement le facteur « espèce – variété ».

L'analyse des données obtenues dans ces essais permet de mettre en avant dans cette fiche les espèces à privilégier pour la double culture dédiée dans les Hauts-de-France permettant de maximiser la production de biomasse.

I. CHOISIR SA CEREALE IMMATURE

DES DONNEES ISSUES D'ESSAIS MENES EN 2019

Les résultats présentés dans cette partie sont issus des essais factoriels qui ont été menés à Catenoy (Oise) en 2018-2019 sur la comparaison de différentes espèces et variétés de céréales immatures, seules ou en mélange avec des légumineuses. L'essai a été implanté le 4 octobre et toutes les modalités ont reçu 140 unités d'azote en deux fois (40 uN le 27/02 et 100 uN le 26/03).

Dans ces essais, la production de biomasse des différentes modalités est comparée à différentes dates de récolte (02/05, 13/05 et 27/05). Les données présentées ci-dessous sont celles pour une récolte mi-mai, en lien avec la période optimale de récolte identifiée précédemment.

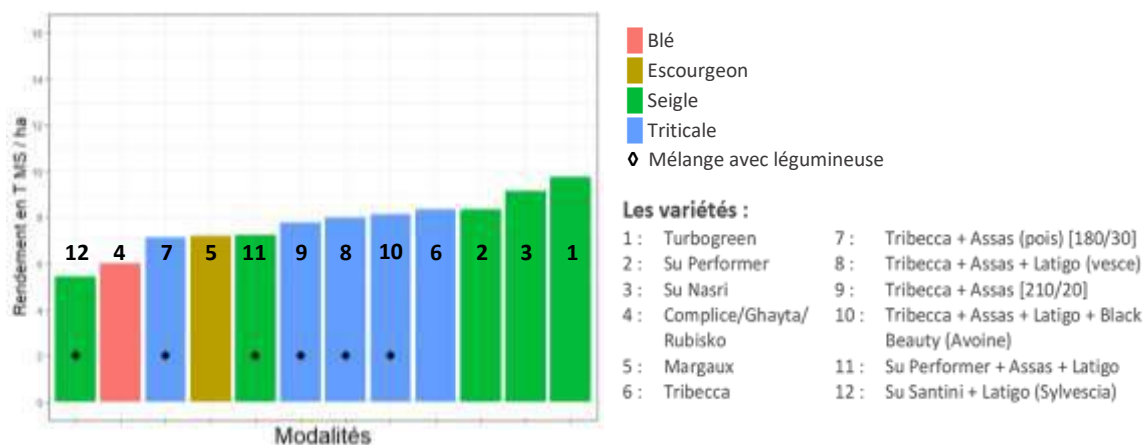


Figure 16 : Rendements par modalité pour différentes espèces testées - récolte le 13 mai

Les espèces

- Les espèces de seigle et de triticale présentent des potentiels de production de biomasse supérieurs pour une date de récolte à la mi-mai.
- Le blé et l'escourgeon sont plus tardifs et présentent des rendements moindres. Pour produire autant de biomasse que le seigle et le triticale, ces espèces ont besoin d'un cycle cultural plus long et donc d'une date de récolte plus tardive
- Il en est de même pour les légumineuses, très peu développées à cette période. La part des légumineuses, en association avec le seigle et le triticale, est faible dans le rendement final (16% en moyenne).

Les variétés

Dans les essais, l'effet variété a été regardé uniquement pour le seigle. Une supériorité de la variété lignée Turbogreen a été observée par rapport aux variétés hybrides testées (SU Performer et SU Nasri).



RETOUR D'EXPERIENCE DE NICOLAS JULIER (CA AISNE)



Le seigle

- Comparées à un seigle hybride, les variétés de seigle lignée et forestier peuvent produire davantage de biomasse grâce à leurs hauteurs de végétation plus importantes (jusque 2,2 m – 2,5 m contre 1,6 m).
- Cependant, ces variétés sont beaucoup plus sensibles à la verse, pouvant entraîner des pertes de biomasse jusque 2 TMS/ha.
- Un seigle hybride sera plus régulier en production de biomasse mais il a l'inconvénient d'avoir un coût de semence plus important.
- Un seigle ligné est un peu plus précoce qu'un seigle hybride (de 4 à 5 jours) et encore plus qu'un seigle forestier mais se montrera légèrement plus sensible aux maladies.

Le triticale

- Le choix de la variété se fera davantage sur sa tolérance face aux maladies (notamment la jaunisse et/ou la rouille jaune).

Comparaison triticale – seigle

- Le triticale est moins sujet à la verse que le seigle.
- Le triticale est plus sensible que le seigle au gel, qui avec des gelées tardives (après stade épi 1cm) peut entraîner des pertes de biomasse.

L'Escourgeon

- Le choix de la variété se fera pour sa résistance aux maladies en premier lieu puis pour sa production de biomasse.

POUR ALLER PLUS LOIN SUR LE CHOIX DES ESPECES

Pour une date de récolte plus précoce (fin avril)

Le rendement du triticale et du seigle est bien supérieure aux autres espèces (le rendement moyen du seigle est de 3,8 TMS/ha, celui du triticale de 3 TMS/ha contre un rendement moyen de 1,5 à 2 TMS/ha pour un blé ou un escourgeon). Les légumineuses sont quasiment absentes.

Pour une récolte plus tardive (fin mai)

La différence entre les espèces s'estompe. Les mélanges de seigle associé à des légumineuses deviennent intéressants avec les atouts agronomiques supplémentaires liés à la présence des légumineuses (diversité spécifique, meilleure colonisation racinaire du sol, structure du sol favorisé, fixation de l'azote atmosphérique...). L'escourgeon atteint des niveaux de production intéressants mais c'est une espèce sensible aux maladies et aux viroses. Le blé présente quant à lui toujours la biomasse la plus faible.



Le seigle et le triticale permettent les meilleures productions de biomasse pour une récolte autour du 15 mai avec des rendements allant jusqu'à 10 TMS/ha. Ces espèces présentent des caractéristiques agronomiques intéressantes : une rusticité vis-à-vis des ravageurs et des maladies, une couverture rapide du sol ainsi qu'un système racinaire bien développé.

II. CHOISIR SA DEUXIEME CULTURE

DES DONNEES ISSUES D'ESSAIS MENES EN 2019



Les résultats présentés dans cette partie sont issus des essais factoriels qui ont été menés à Catenoy en 2019 sur la comparaison de différentes variétés de maïs et de sorgho. L'essai a été implanté le 14 mai (en lien avec la période optimale de semis), récolté le 9 septembre et 60 unités d'azote ont été apportés sur les 8 modalités de l'essai. La conduite culturale est simplifiée : aucun autre intrant n'a été apporté. Le semis s'est réalisé après un déchaumage, un labour et le passage d'une herse rotative.

Au cours de l'essai, les rayonnements ont été excellents ainsi que le cumul de températures acquis par les cultures qui répond tout à fait aux besoins de ces deux espèces pour atteindre une maturité de 32 % de matière sèche et produire de la biomasse. En revanche, les précipitations ont été faibles lors des stades les plus critiques de développement pour les deux cultures (de mai à juillet).

Tableau 2 : Conditions météorologiques du semis à la récolte (mai à septembre 2019)

	<p>Cumul de rayonnements incidents excellents (222 828 J/cm²) : + 17 000 J / cm² par rapport à la moyenne décennale</p> <p>Pluviométrie : 127,6 mm (pluviométrie particulièrement faible entre mai et juillet : stress hydrique)</p>
	<p>Cumul de températures du semis à la récolte : 2186,7 °CJ</p>

MAÏS OU SORGHO ?

- ① Supériorité en moyenne du sorgho par rapport au maïs : la biomasse moyenne des différentes modalités de sorgho est de 14 TMS/ha contre 10 TMS/ha en moyenne pour les modalités de maïs.
- ② Le taux de matière sèche des sorghos est en moyenne supérieur au maïs. Le taux de matière sèche des maïs est compris entre 30 et 32 % tandis que celui des sorghos est compris entre 32 et 40 %.
- ③ Un mélange de maïs et de sorgho a également été testé (au semis : 100 000 grains/ha pour le maïs et 250 000 grains/ha pour le sorgho). Il présente une production intermédiaire, par rapport aux espèces pures, de 13 TMS/ha avec 4 TMS/ha pour le maïs et 9 TMS/ha pour le sorgho. Cependant, il est difficile de conclure avec une seule modalité testée et de la comparer aux autres modalités d'espèces pures.

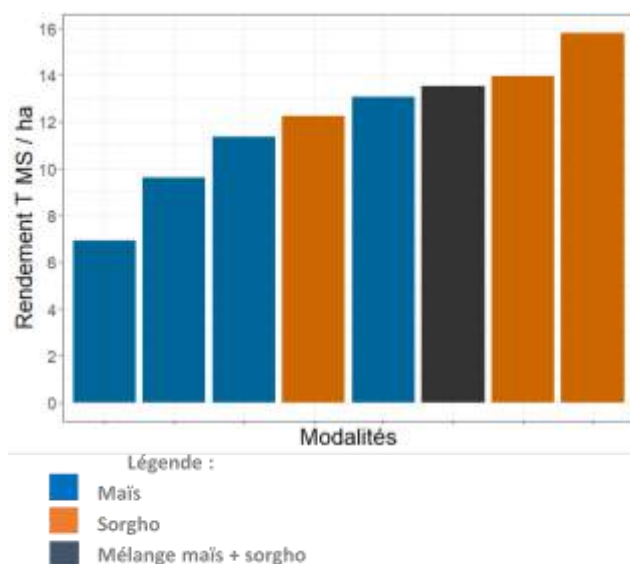


Figure 17 : Rendements des modalités entre le maïs et le sorgho (semis au 14 mai, récolte au 09 septembre)

Une meilleure tolérance du sorgho face au stress hydrique

Le sorgho présente une meilleure tolérance au stress hydrique (meilleure capacité d'adaptation par rapport au maïs et culture moins exigeante en eau) (ARVALIS, 2017). Il présente un système racinaire performant et plus dense qui lui permet de capter et d'utiliser avec plus d'efficacité l'eau du sol. De plus, lors d'un stress hydrique, la croissance du sorgho ralentit voire s'arrête mais n'est pas pénalisée. En effet, dès l'apparition des premières pluies, la croissance du sorgho reprend. Son développement est alors plus tardif mais la culture n'est pas trop impactée. Bien entendu, le sorgho a tout de même des besoins en eau durant son cycle de culture, par exemple notamment pour pouvoir valoriser l'azote. Ses besoins en eau sont primordiaux lors de son implantation (besoin d'eau mais le sol doit être bien réessuyé) et entre le stade de gonflement et d'épiaison (ARVALIS, 2017).

CHOISIR SA VARIÉTÉ DE MAÏS ET DE SORGHO

Quelle que soit l'espèce de maïs ou de sorgho, les variétés les plus productives sont les variétés les moins précoces (Figure 18 et Figure 19 -Tableau 3 et Tableau 4).

Le choix variétal doit donc être un compromis entre le potentiel de production de biomasse et les besoins pour atteindre la maturité à la récolte (objectif de 32 % MS) en fonction du contexte pédoclimatique et de la date de semis. Par exemple, les variétés les moins précoces produisent plus de biomasse mais dans les secteurs les plus froids, il faut veiller à atteindre la maturité souhaitée à la récolte.

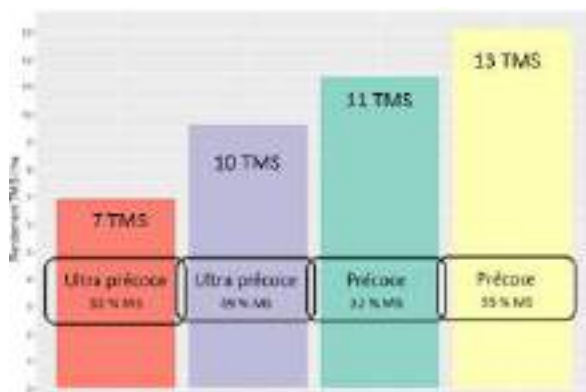


Figure 18 : Rendement en fonction de la variété de maïs

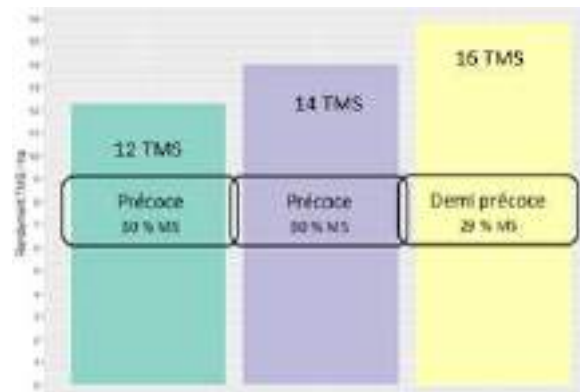


Figure 19 : Rendement en fonction de la variété de sorgho

Vous avez dit « Précocité du maïs ou du sorgho » ?

La précocité exprime la durée de développement de la plante, du semis à la récolte.

Plus un maïs/sorgho est précoce, plus son cycle est rapide et moins il a besoin de degré-jour pour arriver au stade de maturité souhaité à la récolte.

La classification est la suivante : très précoce, précoce, demi précoce, demi tardif ou tardif.

Tableau 3 : Précocité et caractéristiques des variétés de maïs testées dans l'essai de 2019 à Catenoy

Variétés de maïs	Précocité	Production	Semis – récolte
Oxxgood (RGT)	Ultra précoce (indice 160 – 180)	Fourrage Méthanisation	1320 à 1330 °CJ Floraison précoce
Duxxbury (RGT)	Ultra précoce (indice 140 – 170)	Fourrage Méthanisation	1260 à 1280 °CJ Floraison précoce
Holdus (KWS)	Précoce (indice 250 – 270)	Maïs grains Très grand potentiel de rendement	1715 à 1740 °CJ
Kalideas (KWS)	Précoce (indice 250 – 270)	Fourrage Méthanisation Potentiel de rendement élevé	1450 à 1475 °CJ

Tableau 4 : Précocité et caractéristiques des variétés de sorgho testées dans l'essai de 2019 à Catenoy

Variétés sorgho	Précocité	Production
Sammos (KWS)	Précoce	Mono-coupe : ensilage / fourrage
Swingg (RGT)	Précoce	Mono-coupe : ensilage / fourrage
Amiggo(RGT)	Demi - Précoce	Mono-coupe : ensilage / dérobée (méthanisation) (production fourragère rapide)

Le sorgho présente un meilleur potentiel de production de biomasse par rapport au maïs en condition de stress hydrique.

Les variétés les moins précoces ont un potentiel de rendement supérieur pour un même cycle de culture.

Toutefois, le choix de la variété est à adapter en fonction de la date de semis et du secteur géographique pour être sûre d'atteindre le niveau de maturité suffisant.



Le sorgho : mono-coupe ou multi-coupe ?

Les sorghos font l'objet d'une typologie catégorisée selon l'usage. On y retrouve la catégorie des **monocoupes** (ensilage) et des **multicoupes** (pâture, ensilage, enrubannage, affouragement en vert).

Sorgho mono-coupe

Le sorgho mono-coupe est divisé en trois catégories : les sorghos grains (récolte principale pour les grains, à plus importante valeur énergétique), les sorghos sucriers (récolte en plante entière pour ensilage ou possibilité de valorisation énergétique) et les sorghos fibre/biomasse (dédié à la valorisation énergétique uniquement - potentiel de production de biomasse le plus important).

Les sorghos grains/sucriers sont caractérisés par de bonnes valeurs d'unité fourragère et par une hauteur de végétation de 2 à 3 mètres. Les sorghos fibres/biomasses ont quant à eux une hauteur de végétation encore plus élevée, des potentiels de rendement encore plus importants mais sont caractérisés par de faibles valeurs d'unité fourragère (faible valeur alimentaire s'expliquant par une plus importante lignification). Le cycle de croissance de ces trois types de sorgho est plus long que le sorgho multi-coupe : il s'étale sur plusieurs mois avec un cumul de 1500 °CJ nécessaire en moyenne selon la précocité.

Sorgho multi-coupe

Il existe deux types de sorgho multi-coupe : le type Sudangrass et le type hybride (Sudangrass x Sucrier).

Le type Sudangrass est adapté pour le pâturage en vert, plus particulièrement destiné aux petits ruminants : il est fin. Son tallage est plus important et il est assez précoce. Le type hybride est également adapté pour le pâturage en vert mais aussi pour l'ensilage. Il est plus vigoureux et plus tardif. Pour le pâturage en vert, il est plutôt destiné aux gros ruminants : il est plus grossier.

Le premier cycle de croissance s'étale de 40 à 60 jours pour ces deux types de sorghos, pour permettre une première coupe (de 3 à 4 TMS/ha). En général, deux à cinq coupes sont réalisables de juin à octobre, selon les précipitations et la date de semis principalement : capacité de tallage et de repousse très importante. Il faut attendre en moyenne 30 jours entre deux coupes.

Potentiel de production
de 15 à 25 TMS/ha pour le
mono-coupe à la récolte

Potentiel de production
de 12 à 15 TMS/ha pour le
multi-coupe
obtenu en 4 à 5 coupes

Ce que nous enseigne l'essai de Catenoy - 2019

Pour des semis de sorgho assez tardifs en saison, le multi-coupe paraît intéressant puisqu'il atteint la maturité recherchée très rapidement avec un cycle de croissance rapide d'environ deux mois, tandis qu'il faut quatre à cinq mois au mono-coupe pour atteindre cette même maturité. Cependant, le rendement reste limité en une coupe (soit un seul cycle de croissance), il est de 3 à 4 TMS/ha : il faudra ainsi plusieurs coupes pour atteindre le même rendement qu'un sorgho mono-coupe. Cela demande ainsi du temps et a un coût économique.



La fertilisation azotée de la double culture

La nutrition azotée est un facteur majeur dans la croissance des végétaux.

Un déficit en azote est un facteur limitant la croissance et donc la production de biomasse d'une plante. Pour assurer une croissance optimale de la culture, il faut donc satisfaire ses besoins en azote. Ses besoins peuvent être couverts par l'azote du sol (reliquat d'azote après la culture précédente + minéralisation de l'azote au cours du cycle cultural) et par un apport d'azote minéral ou organique.

A l'inverse, un excès d'azote peut avoir des impacts négatifs sur la croissance de la plante et sur l'environnement (pertes d'azote).

Le raisonnement de la fertilisation azotée est donc crucial d'autant que l'azote est un élément qui pèse très lourd dans les émissions de gaz à effet de serre.

Que ce soit sur la première ou la deuxième culture, des apports azotés ont été réalisés par les pilotes des plateformes. Ils ont été raisonnés en fonction des reliquats azotés et des estimations de besoin des cultures. La fertilisation de la double culture a soulevé de nombreuses questions dans le cadre des essais menés. Bien qu'elles n'aient pu être approfondies dans le projet, elles sont présentées ici.

Fertilisation de la première culture

- Les besoins azotés des céréales sont bien connus mais qu'en est-il d'une céréale récoltée immature : les besoins sont-ils plus faibles si on ne va pas à la maturité et avec des objectifs de qualité différente ? De combien ?
- Dans le cas d'une céréale associée à une ou des légumineuses : quels sont les besoins de l'association ? Comment raisonner les apports pour permettre le développement des différentes espèces sachant qu'un apport trop important risque d'être défavorable au développement des légumineuses et au fonctionnement de leurs nodosités (fixatrices d'azote atmosphérique) et qu'à l'inverse un manque d'azote sera préjudiciable à la croissance de la céréale ?

Fertilisation de la deuxième culture

- Des références sont disponibles sur les besoins unitaires du maïs et du sorgho ensilage mais cela impose de réaliser un bilan azoté pour estimer la dose à apporter et de réaliser un reliquat dans un laps de temps très court. La deuxième culture étant semée dans la foulée de la récolte de la première.
- Comment prendre en compte la fourniture du sol au cours de leur cycle cultural dans le calcul de la dose à apporter ? Quelle quantité d'azote sera fournie par minéralisation des résidus de la première culture ? A quelle période cet azote sera-t-il disponible par rapport à la cinétique d'absorption du maïs/sorgho ?

A l'échelle de la double culture

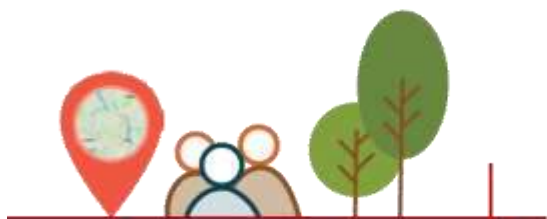
- Quel compromis fait-on entre potentiel de production de biomasse et impacts environnementaux pour ces deux cultures non alimentaires dont les attentes en termes d'impacts environnementaux sont encore plus exigeantes que pour les cultures alimentaires ?
- D'un point de vue réglementaire, une des cultures de la double culture doit être déclarée comme culture dérobée. Ce qui implique des contraintes réglementaires plus importantes que les cultures alimentaires en termes de doses maximales d'azote à apporter sur la culture dérobée (Tableau 5).

Tableau 5 : Calculs des plans prévisionnels de fumure azotée de la Chambre d'agriculture des Hauts-de-France - novembre 2019

• Cas des autres fourrages dérobés ou annuels et cultures à vocation énergétique		
Culture	Dose plafond	Dose plafond
Méteil grain ou fourrage	85 kg N/ha 50 kg N/ha	En culture principale ou culture dérobée à récolte de printemps En culture dérobée à récolte d'automne
Luzerne fourragère, luzerne déshydratée	100 kg N/ha	Sous forme d'apports de produits organiques (fertilisation minérale interdite)
Ray Grass Italien	125 kg N/ha	En culture dérobée
Céréales immatures (triticale, épeautre, seigle....)	150 kg N/ha 60 kg N/ha	En culture principale ou culture dérobée à récolte de printemps En culture dérobée à récolte d'automne
Sorgho fourrager	125 kg N/ha	En culture dérobée
Mais fourrage	125 kg N/ha	En culture dérobée (en culture principale, méthode du bilan)
Autres cultures fourragères annuelles	125 kg N/ha	
Autres dérobées fourragères sans légumineuses	60 kg N/ha	
Légumineuses pures sauf luzerne	0 kg N/ha	Fertilisation azotée interdite
Fourragères porte-graine : ray grass anglais, ray grass d'Italie, ray grass hybride, fétuque élevée, fétuque rouge...	170 kg N/ha	Pour plus de précisions, voir la note de la FNAMS (dernière version de mars 2019)

(Chambres d'Agriculture Hauts-de-France, 2019)





Thème 2 – Maximiser la production de méthane

Cette partie fournit des clés de réussite pour maximiser la production de méthane de la double culture à partir de l'analyse exploratoire des résultats issus des plateformes expérimentales du projet Réseau de sites démonstrateurs.

Cette partie s'attache à répondre aux questions suivantes :

Comment est calculée la production de méthane à l'hectare ?

Qu'est ce qui influence la production de méthane ? Comment la maximiser ?

Quelles espèces et variétés utiliser pour maximiser la production de méthane ?

Vous avez dit « Potentiel méthanogène d'un végétal » ?

Une plante est constituée d'eau, de matière minérale et de matière organique. La matière organique est constituée de différentes fractions : la matière organique soluble, la lignine, la cellulose et l'hémicellulose. Le potentiel méthanogène dépend principalement de cette composition biochimique : lors du processus de méthanisation, la part en matière organique diminue et c'est cette fraction qui se transforme en méthane.

La teneur et la composition de cette matière organique (MO) varient en fonction :

- ⊕ Du stade de la culture
- ⊕ De l'espèce
- ⊕ De la variété
- ⊕ Des conditions climatiques (stress hydrique, températures, rayonnements ...)

La Figure 20 représente la composition d'un végétal et son évolution au cours du procédé de méthanisation.

La valeur du potentiel méthanogène d'une culture peut être évaluée en laboratoire à partir d'un échantillon du végétal. Cet échantillon est placé dans un bioréacteur reproduisant les conditions anaérobiques du processus de méthanisation. Cette valeur est exprimée en $m^3 CH_4 / T MS$.

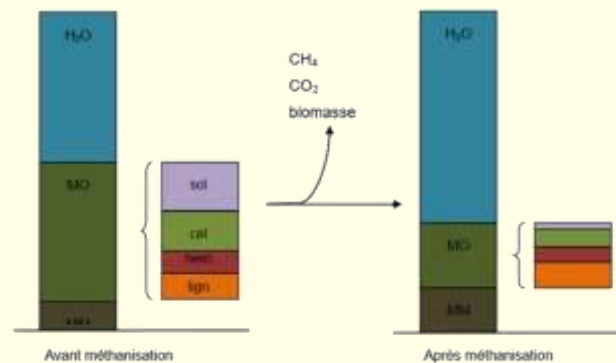


Figure 2 : Schéma de principe de l'évolution de la matière organique au cours du procédé de méthanisation. Avec sol : matière organique soluble ; cel : cellulose ; hem : hémicellulose ; lign : lignine.

Figure 20 : Composition d'un végétal et évolution de cette composition au cours du procédé de méthanisation (ADEME, 2009)

Vous avez dit « Production de méthane d'une culture » ?

Le potentiel méthanogène ne doit pas être confondu avec la production de méthane, dont il est l'une des principales composantes.

En effet, la production de méthane traduit la **quantité de méthane qui peut être produite par hectare de culture**. Elle est définie par deux composantes : le rendement de la culture et le potentiel méthanogène. Elle est exprimée en $m^3 CH_4 / ha$ et se calcule comme suit :

$$\begin{aligned}
 \text{Production de méthane} & \left(\frac{m^3 CH_4}{ha} \right) \\
 & = \text{rendement biomasse} \left(\frac{T MS}{ha} \right) \times \text{potentiel méthanogène} \left(\frac{m^3 CH_4}{T MS} \right)
 \end{aligned}$$

Les leviers pour maximiser la production de méthane

Maximiser la production méthane peut se faire en jouant sur le rendement et/ou sur le potentiel méthanogène de la culture (cf. page 33).

Il convient alors de se demander si ces deux facteurs contribuent de la même façon à la production de méthane par la culture et quels sont les leviers techniques permettant de maximiser cette production de méthane par hectare de culture.



DES DONNEES ISSUES DE L'ENSEMBLE DES ESSAIS DU RESEAU

Les résultats présentés dans cette fiche ont été obtenus à partir des données issues de l'ensemble des plateformes du réseau au cours de trois années d'essai (2017 – 2019). Elles portent sur les premières et deuxième cultures des doubles cultures testées.

I. RELATION ENTRE LE RENDEMENT ET LA PRODUCTION DE METHANE

La production de méthane a été étudiée en fonction du rendement de chaque parcelle pour chacune des deux cultures de la double culture (Figure 21). Le coefficient de détermination R^2 a été calculé pour préciser le sens et l'intensité de la corrélation linéaire entre ces deux variables. Celui-ci est de 0,82, donc proche de 1.

Ainsi, la production de méthane est corrélée positivement au rendement. Le rendement détermine bien la production de méthane : en augmentant la production de biomasse, on augmente la production de méthane.

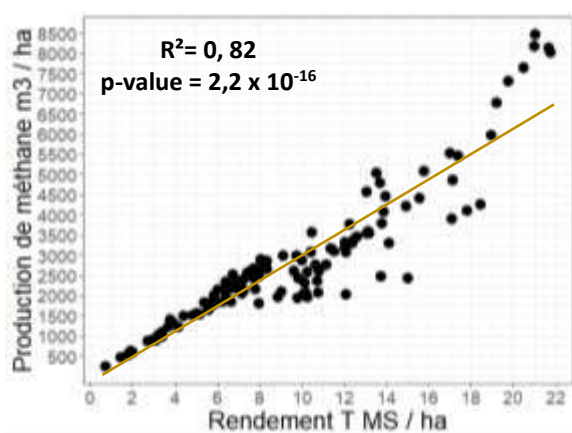


Figure 21 : Production de méthane en fonction du rendement

II. RELATION ENTRE LA PRODUCTION DE METHANE ET LE POTENTIEL METHANOGENE

La relation entre production de méthane et potentiel méthanogène a également été étudiée en suivant la méthode évoquée au paragraphe précédent (Figure 22). Il en ressort un coefficient de détermination R^2 proche de 0.

La production de méthane à l'hectare n'est donc pas corrélée au potentiel méthanogène. Une augmentation du potentiel méthanogène ne conduit pas forcément à une augmentation de la quantité de méthane produite à l'hectare.

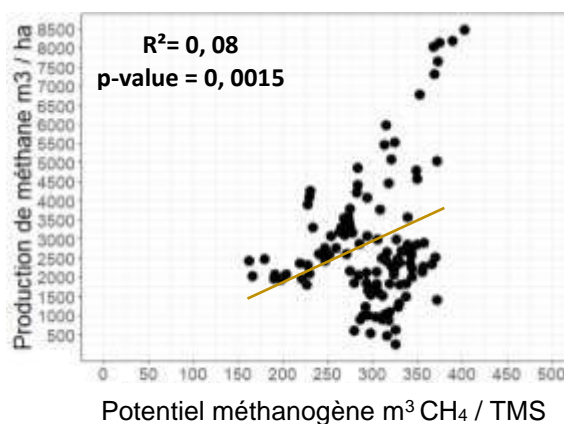


Figure 22 : Production de méthane en fonction du potentiel méthanogène

Sur les figures ci-dessus, chaque point représente le rendement d'une culture et sa production de méthane associée, sur une plateforme d'essai pour une année (premières et deuxième cultures confondues).



La production de méthane est corrélée à la production de biomasse et non au potentiel méthanogène. Afin de maximiser la production de méthane à l'hectare, il est donc conseillé d'essayer de maximiser le rendement au travers des choix de conduite culturale.

III. MAXIMISER LA PRODUCTION DE METHANE DE LA DOUBLE CULTURE DEDIEE

PRODUCTION DE METHANE DE CHAQUE CULTURE

Dans nos essais, la production de méthane de la première culture varie entre 500 à 4210 m³ CH₄/ha et celle de la deuxième culture entre 450 à 8500 m³ CH₄/ha (Figure 23). **Les valeurs de production de méthane des cultures sont donc assez variables, notamment pour la deuxième culture.**

La production de méthane moyenne de la première culture est de 2225 m³ CH₄ / ha et de 4500 m³ CH₄ / TMS pour la deuxième culture. Ainsi, **la production de méthane est plus importante pour la deuxième culture que pour la première culture.**

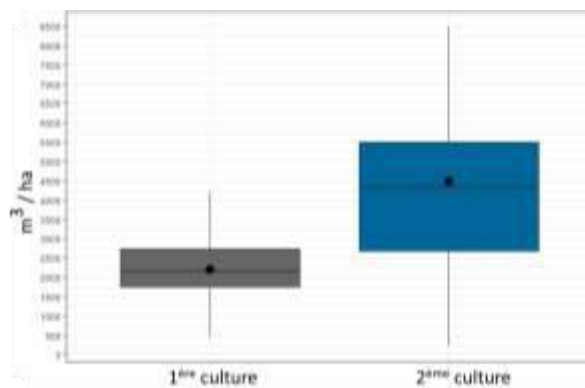


Figure 23 : Production de méthane atteinte par culture à la récolte

Pourquoi la deuxième culture permet-elle des productions de méthane supérieures à celles de la première culture ?

Rendement potentiels

Comme vu précédemment, le rendement détermine davantage la production de méthane que le potentiel méthanogène. Or, en TMS/ha, les potentiels de production de biomasse d'une deuxième culture de maïs ou sorgho sont plus importants que ceux des céréales immatures cultivées en première culture.

Dans les essais du réseau, le rendement maximal obtenu pour un maïs ou un sorgho est de 22 TMS/ha alors qu'il est de 15 TMS/ha pour les céréales immatures (Figure 25).

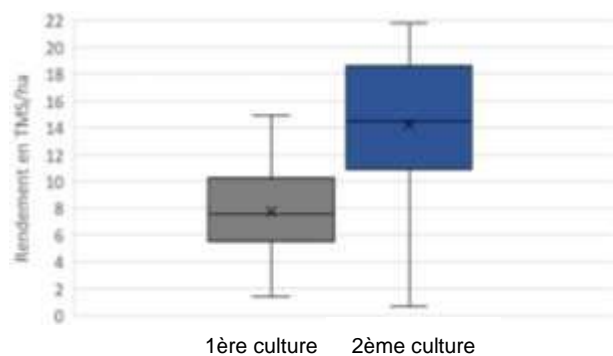


Figure 25 : Production de biomasse par culture

Potentiels méthanogènes

Toutes espèces confondues, les potentiels méthanogènes des deux cultures sont en moyenne assez proches bien qu'il y est une légère supériorité du potentiel méthanogène de la deuxième culture. En effet, le potentiel méthanogène moyen de celle-ci est de 310 m³CH₄/TMS contre 290 m³ CH₄/TMS pour la première (Figure 24).

Toutefois, au regard de la variabilité des potentiels intra-espèces, cet écart moyen de 20 m³ CH₄/TMS entre les deux cultures n'est pas significatif. En revanche, en termes de distribution des valeurs, la deuxième culture présente davantage de valeurs élevées.

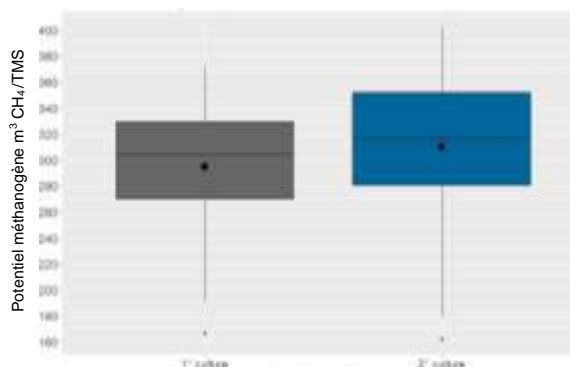


Figure 24 : Potentiel méthanogène par culture



Le fait que les productions de méthane de la deuxième culture soient supérieures par rapport à celles de la première culture s'explique donc par des potentiels méthanogènes supérieurs, même si la différence moyenne entre les deux types de culture est peu marquée, et surtout par un potentiel de production de biomasse bien supérieur.

Ainsi, dans un objectif de maximisation de la production de méthane de la double culture, il convient de privilégier la réussite de la 2nd culture.

Potentiels méthanogènes des espèces de céréales immatures

La production de méthane est corrélée à la biomasse et non au potentiel méthanogène. Afin de la maximiser, il convient donc de préférentiellement choisir des espèces pour leur potentiel de production de biomasse plutôt que pour leur potentiel méthanogène. Toutefois, des espèces et/ou des variétés pourraient concilier les deux atouts.

C'est dans cette optique que les potentiels méthanogènes de plusieurs espèces et variétés de céréales, seules ou en mélange avec des légumineuses ont été comparés dans un essai factoriel. Il en ressort que la différence de potentiel méthanogène est très faible entre les quatre espèces de céréales pour une même date de récolte. Ils varient entre 305 à 355 LCH₄/kg MS pour des taux de matière sèche compris entre 20 et 25 % (Figure 27). Ainsi, **il n'y a pas d'effet « espèce » pour une même date de récolte sur le potentiel méthanogène, dans la gamme testée.**

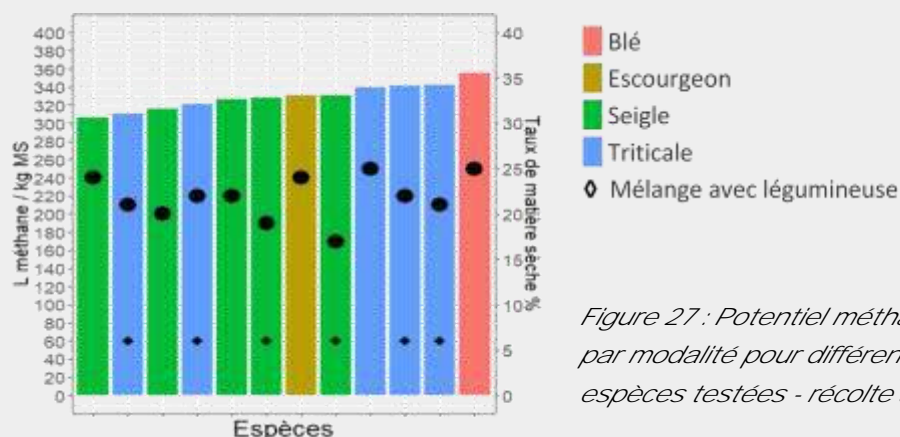


Figure 27 : Potentiel méthanogène par modalité pour différentes espèces testées - récolte au 13 mai

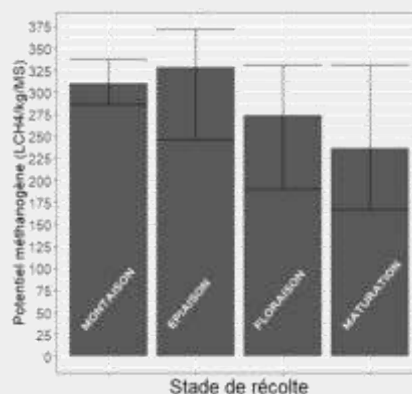
Par ailleurs, selon une étude de l'ADEME (2009), le stade de récolte des végétaux a une influence sur la valeur du potentiel méthanogène, en lien avec la modification de la composition biochimique de la plante. C'est pourquoi, dans le cadre du projet, différentes dates de récolte ont été testées et par là différents stades de récolte. Les résultats indiquent des **potentiels méthanogènes en moyenne supérieures pour des récoltes aux stades montaison et épiaison** (stades atteints entre fin avril et mi-mai) (Figure 26).

Figure 26 : Potentiels méthanogènes moyens en fonction du stade de récolte

Pour aller plus loin

L'ensemble des résultats sur la comparaison des espèces à différentes dates de récolte et différents stades de récolte est disponible dans notre guide technique dédiée à la production de CIVE.

<http://www.agro-transfert-rt.org/filabiom/outils/production/cive/>



Potentiels méthanogènes d'une deuxième culture de maïs ou sorgho

Les potentiels méthanogènes des espèces et des variétés de deuxième cultures testées dans cet essai factoriel varient entre 270 et 370 L CH₄/kg MS (Figure 28). Dans la gamme testée, la différence de potentiel est faible entre les espèces de maïs et sorgho. En effet, en moyenne, le potentiel méthanogène du maïs est de 300 LCH₄/kg MS et de 310 LCH₄/kg MS pour le sorgho.

En revanche, les résultats de l'essai mettent en avant que l'effet intraspécifique (variété) est plus important que l'effet interspécifique (espèce).

Par ailleurs, l'effet du stade de récolte sur le potentiel méthanogène a également été regardé dans l'essai. Cet effet a été étudié au travers du taux de matière sèche et en prenant l'hypothèse qu'un taux de matière sèche plus élevé équivaut à un stade de maturité plus avancé. Dans la gamme testée, aucun lien n'est ressorti entre le potentiel méthanogène et le taux de matière sèche et donc avec le stade de récolte.

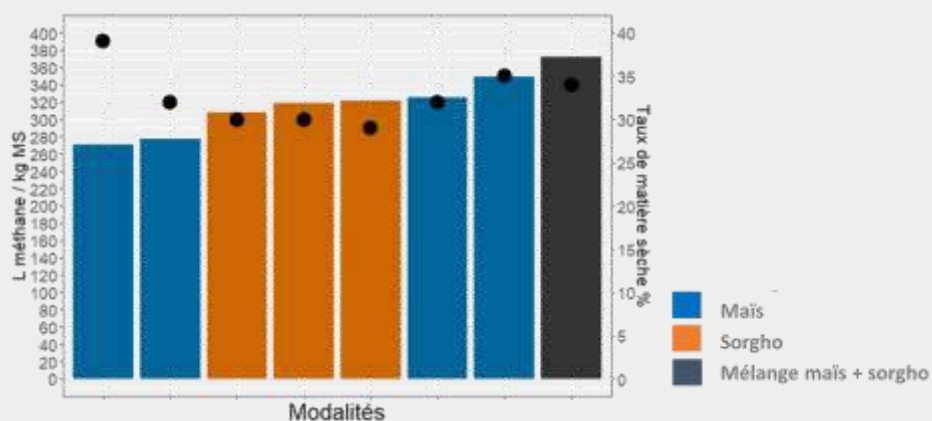


Figure 28 : Potentiel méthanogène pour les modalités de maïs et sorgho
- semis au 23 mai et récolte au 09 septembre -

Il est important de noter que les taux de matière sèche ne sont pas toujours représentatifs du stade de la culture. En effet, en conditions de stress hydrique et de fortes chaleurs, le dessèchement de la plante s'accélère et son taux de matière sèche peut alors être élevé sans que son stade soit aussi avancé. Ici, seuls les taux de matière sèche sont présentés car les stades de culture à la récolte n'ont pas fait l'objet d'un suivi spécifique.



PRODUCTION DE METHANE A L'ECHELLE DE LA DOUBLE CULTURE

Le paragraphe précédent met en avant que, **pour maximiser la production de méthane, il vaut mieux favoriser la réussite de la deuxième culture.** En effet, celle-ci présente des potentiels de production de méthane supérieurs par rapport à une première culture de céréales immatures, notamment grâce à un potentiel de production de biomasse supérieur.



Ce résultat est à mettre en parallèle avec ceux présentés dans le Thème 1 de ce guide et notamment que, pour maximiser le rendement de la deuxième culture, il faut assurer son implantation et semer précocement, tout en préservant le potentiel de biomasse de la première culture. Un semis de la deuxième culture dans la première décade de mai semble être un bon compromis pour remplir ces objectifs. Ce compromis permet de récolter les céréales immatures avec une biomasse suffisante et de semer la deuxième culture de maïs ou de sorgho le plus précocement possible. Il engendre néanmoins potentiellement une perte de biomasse pour la céréale immature. En moyenne, une perte de 3 TMS/ha pour une récolte plus précoce de 15 jours a été estimée. Mais cette perte de biomasse, et donc de méthane, est largement compensée par la production de méthane supplémentaire par la culture de maïs ou de sorgho.

Pour maximiser la production de méthane, favorisez la deuxième culture

Les cultures de maïs ou de sorgho ont un potentiel de production de méthane à l'hectare supérieur grâce à un potentiel de production de biomasse (et un potentiel méthanogène) supérieur comparé à une céréale immature produite en première culture.

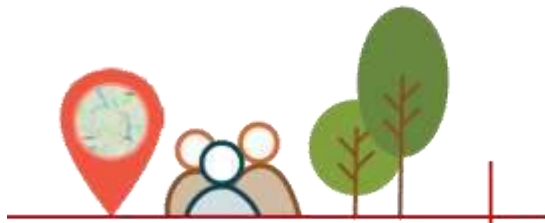


Optimisez l'implantation de la deuxième culture en semant durant la première décade de mai

Cette période est préconisée car elle permet tout de même de ne pas trop pénaliser la récolte de la céréale immature.

Privilégiez la production de biomasse plutôt que le potentiel méthanogène dans vos choix culturaux (choix des espèces, des variétés et dans l'itinéraire technique).

Le potentiel méthanogène dépend d'un ensemble de facteurs difficiles à maîtriser (en dehors, par exemple, des variétés qui peuvent être plus spécialisées pour la méthanisation).



Thème 3 – Impacts agro-environnementaux

La double culture, en permettant de produire et d'exporter des quantités importantes de biomasse, soulève des questions sur les impacts de cette production et exportation massive sur l'agrosystème.

Cette partie présente les impacts agro-environnementaux de la production de doubles cultures au travers de différents indicateurs relatifs à l'eau, l'azote, le carbone, le phosphore et le potassium. L'impact sur la culture suivante dans un rotation y est également étudié. L'ensemble des résultats présentés sont issus des essais menés sur les plateformes expérimentales du projet Réseau de sites démonstrateurs.

Les exportations de phosphore et de potassium

Tableau 6 : Exportations de phosphore et de potassium de différentes cultures

	Blé, colza, orge Grains	Betterave sucrière	Double culture Plante entière
Exportation de P ₂ O ₅	40 à 45 kg/ha	55 à 70 kg/ha	65 à 180 kg/ha
Exportation de K ₂ O	30 à 50 kg/ha	160 à 240 kg/ha	250 à 640 kg/ha

Les quantités moyennes de phosphore (P) et de potassium (K) exportées par les doubles cultures (exemples du triticale - pois suivi d'un sorgho et du seigle suivi d'un maïs) ont été comparées à des cultures classiques : du blé, de l'orge et du colza (grains exportés et pailles restituées) et de la betterave sucrière (Tableau 6).

Il en ressort que **l'exportation de phosphore et de potassium de la double culture est bien supérieure à celle des autres cultures**, notamment pour le potassium. La différence d'exportation de phosphore et de potassium est la plus marquée entre les céréales-colza (exportation uniquement des grains) et la double culture (exportation plante entière).



Comparaison aux céréales et au colza

Les exportations plus conséquentes de phosphore et de potassium de la double culture par rapport aux grains de céréales et de colza s'expliquent principalement par une exportation de biomasse supérieure, en TMS/ha. En effet, l'exportation moyenne pour une double culture est de 20 TMS/ha tandis qu'elle est comprise entre 4 et 10 TMS/ha lors d'une récolte de grains de blé, d'orge ou de colza.

Les exportations conséquentes de potassium par la double culture, en comparaison aux céréales et colza s'expliquent également par le type d'exportation. En effet, dans le premier cas, c'est la plante entière (tiges + feuilles + grains) qui est exportée de la parcelle tandis que dans le second cas, seul les grains le sont.

A noter que même en exportant les pailles de céréales et de colza, le rendement « plante entière » de ces cultures est bien plus faible (2 - 5 TMS/ha) que celui de la double culture. Ainsi, même dans ce cas une quantité moindre de potassium serait exportée.

Vous avez dit « Exportation de P et K » ?

Lorsqu'une culture est exportée, quelle que soit sa forme, des éléments minéraux sont exportés avec elle. C'est notamment le cas du phosphore (sous forme de P₂O₅) et du potassium (sous forme de K₂O). L'exportation de ces minéraux, c'est-à-dire la quantité de P₂O₅ et de K₂O exportée par hectare, varie selon :

- ❖ **La teneur**, à savoir la quantité de l'élément dans une unité de biomasse. Elle dépend du type de culture (espèce) et du type d'exportation (grain, paille, plante entière...).
- ❖ **La quantité de biomasse exportée.**

$$\begin{aligned}
 & \text{Exportation} \left(\frac{\text{kg P}_2\text{O}_5}{\text{ha}} \text{ ou } \frac{\text{kg K}_2\text{O}}{\text{ha}} \right) \\
 & = \text{Rendement} \left(\frac{\text{TMS}}{\text{ha}} \right) \\
 & \times \text{Teneur} \left(\frac{\text{kg P}_2\text{O}_5}{\text{TMS}} \text{ ou } \frac{\text{kg K}_2\text{O}}{\text{TMS}} \right)
 \end{aligned}$$

Comparaison à la betterave sucrière

Les exportations supérieures de phosphore de la double culture par rapport à la betterave s'expliquent par une teneur en phosphore des racines de betterave bien inférieure. Elle est en moyenne de 1.1 kg P/TMS, contre 2.4 kg P/TMS pour les céréales immatures et 2 kg P/TMS pour le sorgho.

Concernant le potassium, les exportations de la double culture sont bien supérieures à la betterave. Ce résultat ne s'explique pas par la quantité de biomasse exportée car leurs rendements en TMS/ha sont proches. En effet, il est en moyenne de 20 TMS/ha pour la double culture et de 25 TMS/ha pour une betterave. La différence s'explique donc plutôt par les teneurs. Les teneurs en potassium des céréales immatures sont plus élevées par rapport à la teneur en potassium de la betterave sucrière. A titre d'exemple, les teneurs enregistrées dans les essais en 2018 et 2019 sont de 18 kg K/TMS pour les céréales immatures de seigle et de triticales et de 13 kg K/TMS pour le sorgho ensilage alors que celle de la betterave sucrière est de 7.2 kg K/TMS.



Au-delà de la teneur en P et K de la plante, la quantité de biomasse exportée conditionne fortement les exportations.

Teneurs en P et K des plantes

La teneur en P et K varie entre les organes d'une plante d'une même espèce et entre les espèces. Le potassium est majoritairement présent dans les parties végétatives, c'est-à-dire dans les tiges et les feuilles, à l'inverse du phosphore qui est lui majoritairement présent dans les grains.

L'exportation de plante entière ou de résidus (ensilage, pailles + grains) conduit donc à des exportations importantes de potassium.

Par contre, les résidus de culture exportent une relativement faible quantité de P par rapport aux parties récoltées (grain) du fait de leur teneur en P plus faible.

Par ailleurs, il n'y a pas de lien direct entre l'exigence d'une culture et la teneur en P et K dans cette culture. L'exigence d'une culture vis-à-vis du P ou du K désigne sa réaction en situation de déficience en cet élément nutritif.

« La notion d'exigence n'est pas reliée à la quantité ou à la rapidité de prélèvement par les plantes de P et K. Elle exprime la résultante d'un ensemble de mécanismes impliqués dans le prélèvement des minéraux dans le sol et leur utilisation dans la plante, dont l'articulation d'ensemble n'est pas encore totalement élucidée. » (COMIFER, 2019)



La double culture, composée de deux cultures récoltées en plante entière, exporte des quantités importantes de potassium et de phosphore, ce qui peut conduire à diminuer la biodisponibilité de ces éléments dans le sol et ainsi en impacter la fertilité.

Il faut donc veiller à prendre en compte dans le plan fumure ces exportations plus conséquentes de P et K pour les compenser par des engrais minéraux ou organiques.

Compenser les exportations de PK avec du digestat ?

Dans le processus de méthanisation, le phosphore et le potassium ne sont pas dégradés. Ainsi, les quantités de P et K apportées par un approvisionnement en double culture du méthaniseur sont disponibles dans le digestat.

Impacts sur le rendement de la culture suivante : le cas du blé

Les scénarios testés sur les plateformes pluriannuelles du réseau



Sur chacune des plateformes du réseau ont été testés un, voire plusieurs, systèmes de culture prédominants dans les Hauts-de-France et déclinés en plusieurs scénarios selon un gradient croissant de production de biomasse : scénario *témoin*, *alimentaire prioritaire* et *biomasse prioritaire*.

A partir des données issues des plateformes de Landifay (02) et La Ferme 3.0 (80), les rendements des blés après double culture des systèmes *biomasse prioritaire* ont été comparés aux rendements des blés implantés derrière une culture dite témoin, comme un colza ou une betterave, des systèmes *témoin* et *alimentaire prioritaire*.

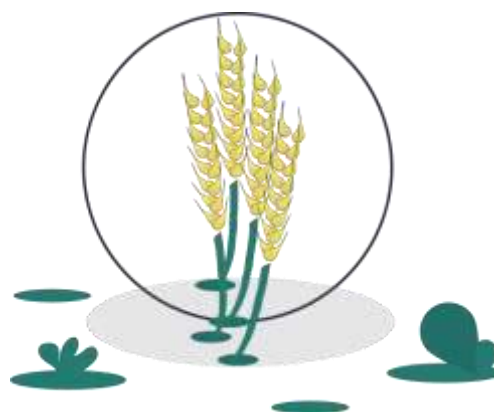
Dans les 10 cas de comparaison du blé ayant un précédent double culture avec un blé ayant un précédent colza, on observe des écarts de rendement de 0 à - 40 qx/ha. Dans 8 cas sur 10, on observe une perte de rendement du blé après double culture par rapport au colza et en moyenne, le blé derrière la double culture présente un rendement inférieur de 17 qx/ha.

Dans les 8 cas de comparaison du blé ayant un précédent double culture avec un blé ayant un précédent betterave, des écarts allant de +14 à -50 qx/ha ont été observés. Dans 6 cas sur 8, on observe une perte de rendement du blé après double culture par rapport à la betterave. Et, dans 2 cas, un rendement supérieur. En moyenne, le blé derrière la double culture présente un rendement inférieur de 15 qx/ha.

La variabilité des pertes est fonction des contextes pédoclimatiques (type de sol et année).

Des éléments observés dans les essais agronomiques ont permis de formuler des hypothèses expliquant ces potentiels pertes de rendement du blé derrière une double culture :

- ① **Un tassement du sol** a pu être observé après certaines récoltes de maïs ou de sorgho lié au passage de l'ensileuse sur un sol humide lors de mauvaises conditions météorologiques pour cette récolte.
- ① **Une date de semis du blé assez tardive** : la récolte de maïs ou de sorgho a pu être tardive et/ou les conditions non optimales pour semer le blé par la suite, retardant son semis.
- ① **Un appauvrissement du sol** suite à l'exportation importante de potassium et de phosphore et potentiellement d'autres minéraux avec la double culture.
- ① **L'enchaînement de trois, voire quatre, graminées dans la rotation** est également à noter (céréale immature, maïs ou sorgho puis blé et quatre graminées si la culture précédente la double culture est une céréale par exemple).



Etat de la réserve hydrique en entrée d'hiver avec la production d'une double culture dédiée

Dans les systèmes de culture à production de biomasse élevée, la question de la consommation en eau se pose. En effet, les cultures à production de biomasse importante sont souvent identifiées comme de grandes consommatrices de cette ressource.

Nous avons cherché à savoir si tel avait été le cas dans nos essais, en quantifiant le niveau de remplissage de la réserve hydrique en entrée hiver, suite à la double culture, en comparaison aux cultures qu'elles remplacent (colza, blé et escourgeon). Les résultats de l'étude sont présentés dans cette fiche.

Le niveau de remplissage, exprimé en pourcentage, s'obtient en comparant la réserve hydrique en entrée hiver, mesurée lors du reliquat entrée hiver, à la réserve totale du sol en entrée hiver (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Un niveau faible de remplissage peut traduire :

- Une consommation en eau importante des cultures étant donné que les cultures ont reçu le même niveau de précipitation sur chaque année,
- Un risque de réserve hydrique non reconstituée pour la culture suivante,
- Un risque de diminution de la recharge de la nappe.

Vous avez dit « réserve hydrique » ?

La réserve hydrique correspond à la quantité d'eau qui peut être contenue dans les pores du sol, pour un volume de sol donné. On considère ici tous les pores du sol, même ceux pour lesquels l'eau n'est pas accessible pour la plante. Si on retranche cette dernière, on obtient alors la réserve utile du sol (Duchaufour, 2001).

Les données obtenues dans le cadre du projet Réseau de sites démonstrateurs montrent que les niveaux de remplissage de la réserve en eau en entrée hiver derrière les doubles cultures ne sont pas alarmants en comparaison des cultures qu'elles remplacent (ici colza, blé, escourgeon). Cependant, leurs consommations en eau peuvent être importantes et, combinées à une succession d'hivers et de printemps secs, elles peuvent mener à un seuil critique, qui n'apparaît pas ici (Figure 30).

Figure 30 : Niveaux de remplissage de la réserve hydrique pour les doubles cultures et les cultures qu'elles remplacent

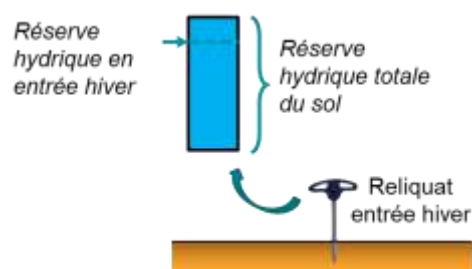
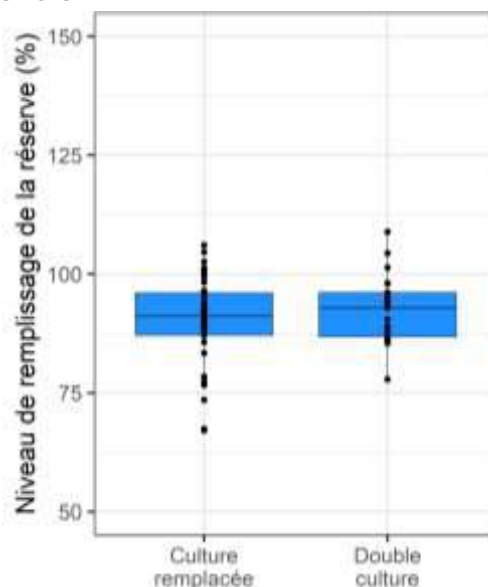


Figure 29 : Principe de détermination du niveau de remplissage de la réserve hydrique



DONNEES UTILISEES

Les niveaux de remplissage de la réserve hydrique présentés ici ont été obtenus sur la base des reliquats mesurés en entrées hivers 2017, 2018 et 2019, représentant les campagnes culturales 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019.



La perte d'azote par lessivage

L'augmentation de la quantité de biomasse produite peut parfois s'accompagner d'une utilisation accrue d'intrants azotés. L'azote, s'il est mal valorisé par les plantes dans leur croissance, créant un surplus, peut être perdu dans les différents compartiments de l'atmosphère (Anglade Bertholon, 2015). Il peut notamment se retrouver dans les eaux souterraines, qui seront captées pour l'eau potable. En cas de présence trop importantes d'azote, elles devront être traitées, sa présence étant dangereuse pour la santé humaine (Velthof et al., 2011).

Afin d'identifier le risque de pertes de cet élément suite aux doubles cultures, la quantité d'azote lessivé sur la période hivernale suivant les doubles cultures a été calculée. Ce processus a lieu au cours de l'hiver, sous l'effet des précipitations hivernales et l'absence de prélèvement par la végétation, c'est pour cela qu'on s'intéresse surtout à ce qui perdu sur les périodes hivernales. Une quantité élevée traduit un système de culture à risque vis-à-vis de l'azote (apports > besoins, apports mal valorisés, absence de couverture automnale...) et est souvent liée à des reliquats entrée hiver élevés.

Vous avez dit « Pertes d'azote par lessivage » ?

Lors de la période hivernale, les précipitations importantes et les faibles besoins hydriques des cultures entraînent le drainage de l'eau vers les nappes phréatiques. En traversant le sol, l'eau entraîne l'azote minéral qu'il contient et se concentre en nitrates, on parle alors de lessivage (Cohan, 2008). Pour limiter la pollution de l'eau drainée, on cherche à réduire au maximum la quantité d'azote minéral contenue dans le sol en entrée hiver. Une des solutions possible est l'implantation de cultures intermédiaires dites « pièges à nitrates », avant cette période (Constantin J et al., 2017) .

En comparaison des cultures qu'elles substituent dans la rotation (céréales et colza dans le cadre de nos essais), les doubles cultures ne présentent pas plus de pertes d'azote minéral par lessivage au cours de l'hiver qui suit. On peut donc penser que l'azote est bien valorisé par les deux cultures, s'il est apporté au bon moment et dans les bonnes conditions.

Néanmoins, certaines parcelles dans certaines situations ont présenté des reliquats entrée hiver élevés, sans que ce niveau soit alarmant, mais assez pour interpeller. Des travaux complémentaires restent à mener pour déterminer si ces reliquats élevés proviennent d'une quantité d'azote apportée pour la fertilisation qui serait trop importante et donc mal valorisée. Une autre hypothèse à tester serait liée à la minéralisation des résidus de la première culture. Leurs teneurs en carbone et azote laissent à penser que leur minéralisation se fera au moment de la période automnale, pouvant expliquer ces reliquats élevés.

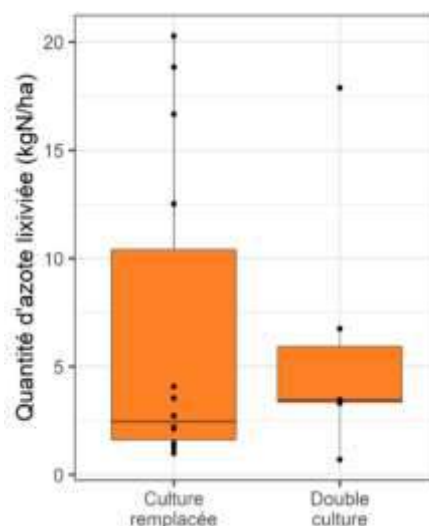


Figure 31: Quantité d'azote lessivée sur la période hivernale pour les doubles cultures et les cultures qu'elles remplacent

Méthode et données employées

Les quantités d'azote lessivé ont été estimées par modélisation avec le modèle STICS (Brisson et al., 2008), sur les périodes hivernales 2017-2018 et 2018-2019, en considérant un sol nu sur cette période. Ce choix se justifie par le peu de croissance végétale sur cette période. Les données d'entrées de la simulation (reliquat entrée hiver, données sol et climat) sont issues des essais de Landifay et de la Ferme 3.0.

Les contributions aux entrées de carbone humifié

Le carbone est impliqué dans la croissance des plantes qui le puisent de l'atmosphère via la photosynthèse. Ce carbone est ensuite restitué au sol via les résidus de culture (mais aussi les produits résiduels organiques) et incorporé à la matière organique via le processus d'humification. La matière organique subit elle-même une dégradation qui entraîne des sorties de carbone, qui sont influencées par le climat et le type de sol. Selon le principe du bilan humique, ces entrées et sorties de carbone déterminent si le stock va augmenter ou diminuer (Hénin & Dupuis, 1945) : les entrées doivent être supérieures aux sorties pour qu'il y ait stockage. Selon Chenu et al. (2014), il vaut mieux chercher à maximiser les entrées de carbone qu'à réduire les sorties pour éviter le déstockage.

En comparaison des cultures qu'elles substituent dans la rotation (céréales, colza dans le cadre de nos essais), les doubles cultures, de par leurs résidus racinaires importants, peuvent apporter autant de carbone humifié que les résidus de céréales (racines, chaumes et pailles). Néanmoins, le colza (avec pailles restituées) permet des entrées de carbone humifié plus importantes. Ainsi, dans une rotation où le colza est conservé, l'introduction d'une double culture contribue à augmenter le stock de carbone du sol, et d'autant plus si la biomasse produite est importante (Figure 32).

POUR ALLER PLUS LOIN

Le guide intitulé « **Concilier exportation de biomasse et stockage de carbone** » montre comment l'augmentation de la production et de l'exportation de biomasse d'un système de culture pour alimenter ces filières peut influencer l'évolution du stock de carbone du sol pour différents cas-types, et propose des clés de réussite pour guider les acteurs agricoles dans la conception de systèmes de culture pour la bioéconomie favorisant le stockage de carbone. Vous pouvez le retrouver sur le site internet dédié à la démarche FILABIOM :

<http://www.agro-transfert-rt.org/filabiom/outils/production/carbone/>

Vous avez dit « **stocker du carbone** » ?

Le stockage de carbone est l'augmentation du stock de carbone dans le sol et gravite autour de deux enjeux. Chercher à augmenter le stock de carbone du sol va permettre à l'agriculteur de maintenir voire améliorer la fertilité de son sol, et donc sa capacité à produire de la biomasse (Fardeau, 2015). L'augmentation du stock de carbone va permettre aussi compensées des émissions anthropiques de CO₂, et donc de permettre de participer à la lutte contre le changement climatique (Arrouays et al., 2002).

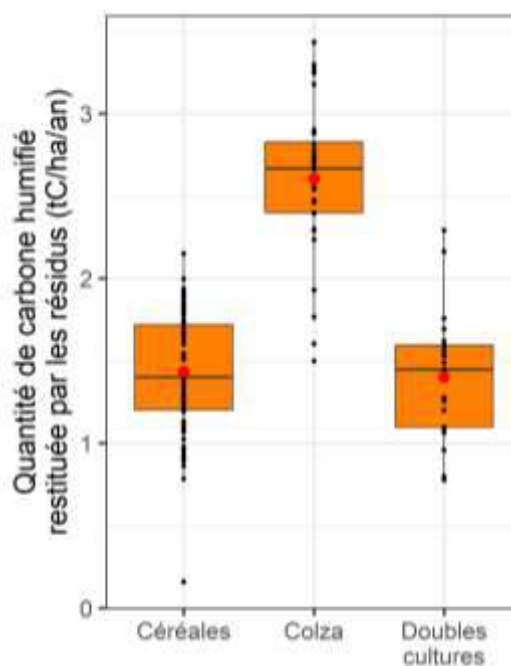


Figure 32 : Entrées de carbone humifié permises par les résidus des doubles cultures dédiées

Méthode et données employées

Les quantités de carbone humifié restituées présentées ci-dessous ont été obtenues à partir des biomasses et teneurs mesurées au champ (sur les plateformes expérimentales du projet) en ce qui concerne la biomasse aérienne. La quantité de carbone humifié issue de la biomasse souterraine a été déterminée à partir de l'outil SIMEOS-AMG (Clivot et al., 2019).

L'ensemble des documents cités dans ce document sont accessibles depuis le site internet
de la démarche FILABIOM

www.agro-transfert-rt.org/filabiom/



Ressources graphiques utilisés : Undraw (<https://undraw.co/>)

Conception graphique du document : Carine Czeryba et Lucile Godard– Agro-Transfert RT

Bibliographie

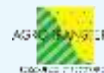
- ADEME. (2009). *Méthanisation agricole et utilisation de cultures énergétiques en codigestion*. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/methanisation-agricole-cultures-energetiques-codigestion-etude-2009.pdf>
- Anglade Bertholon, J. (2015). *Agriculture biologique et qualité des ressources en eau dans le bassin de la Seine : caractérisation des pratiques et applications territorialisées*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J. ., Jayet, P. a., Soussana, J.-F., & Stengel, P. (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre: Stocker du carbone dans les sols agricole. *Expertise Scientifique Collective INRA*, 332.
- ARVALIS. (2017). *Attention au stress hydrique entre gonflement et épiaison*. <https://www.arvalis-infos.fr/attention-au-stress-hydrique-entre-gonflement-et-epiaison-@/view-12737-arvarticle.html>
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2008). *Conceptual basis, formalisations and parameterisation of the STICS crop model*. [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=zrYiCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Brisson+N,+Launay+M,+Mary+B,+Beaudoin+N+\(2008\)+Conceptual+basis,+formalisations+and+parameterization+of+the+stics+crop+model.+Quae,+Versailles&ots=JxEc5DvTqP&sig=hYnp5-ZndIMkDCiNiyzR](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=zrYiCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Brisson+N,+Launay+M,+Mary+B,+Beaudoin+N+(2008)+Conceptual+basis,+formalisations+and+parameterization+of+the+stics+crop+model.+Quae,+Versailles&ots=JxEc5DvTqP&sig=hYnp5-ZndIMkDCiNiyzR)
- Chambres d'Agriculture Hauts-de-France. (2019). *Référentiel pour le calcul des plans prévisionnels de fumure azotée*. https://hautsdefrance.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Hauts-de-France/029_Inst-Hauts-de-France/Environnement-et-territoires/Eau_sol/Directive_nitrate/REFERENTIEL_AZOTE_NOV_2019-compressé.pdf
- Chenu, C., Klumpp, K., Bispo, A., Angers, D., Colnenne, C., & Metay, A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*, 37(May 2017), 23–37. <http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2013.816363>
- Cohan, J.-P. (Arvalis). (2008). Le lessivage du nitrate - Une affaire de drainage naturel. *Perspectives Agricoles*, 347. https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/15/53/3e/4e/347_3977327602231528993.pdf
- COMIFER. (2019). *La fertilisation P-K-Mg : les bases du raisonnement*. https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/COMIFER_RAPPORT_fertilisation_15102019.pdf
- Constantin J, Beaudoin N, Meyer N, Crignon R, Tribouillois H, Mary B, & Justes E. (2017). Concilier la réduction de la lixiviation nitrique, la restitution d'azote à la culture suivante et la gestion de l'eau avec les cultures intermédiaires. *Innovations Agronomiques*, 62, 59–70.
- Duchaufour, P. (2001). Introduction à la science du sol Sol, végétation, environnement. In Dunod (Ed.), *Paris, 2001 pour la 6ème édition*. https://www.unitheque.com/Livre/dunod/Sciences_sup/Introduction_a_la_science_du_sol-7505.html
- Fardeau, J.-C. (2015). Des indicateurs de la fertilité des sols. *Étude et Gestion Des Sols*, 22, 77–100.
- Hénin, S., & Dupuis, M. (1945). Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales Agronomiques*, 19–29.
- MAAF. (2016). *Une stratégie bioéconomie pour la France*.
- Velthof, G., Barot, S., Bloem, J., Butterbach-Bahl, K., de Vries, W., Kros, J., Lavelle, P., Olesen, J. E., & Oenema, O. (2011). Nitrogen as a threat to European water quality. *The European Nitrogen Assessment*, 495–510. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511976988.024>

Ce document a été réalisé dans le cadre du projet *Réseau de sites démonstrateurs*.

Ce projet visait à faciliter la mise en place des projets de la bioéconomie, ancrés sur les territoires, durables et pérennes dans les Hauts-de-France.

Coordination de l'ouvrage

Charlotte JOURNEL
Agro-Transfert Ressources et Territoires
<http://www.agro-transfert-rt.org/> - cjournal@agro-transfert-rt.org



Réalisation et rédaction

Sophie DECAUX
Arthur QUENNESSON
Justine LAMERRE
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Avec l'appui de l'ensemble des partenaires du projet Réseau de sites démonstrateurs et en particulier de

Matthieu PREUDHOMME
Chambre d'agriculture de la Somme

Virginie METERY
Chambre d'agriculture des Hauts-de-France

Nicolas JULLIER
Chambre d'Agriculture de l'Aisne

Julien GUIDET
UniLaSalle

Sophie WIERUSZESKI
Chambre d'agriculture de l'Oise

Lucile GODARD
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Audrey WARIN
Chambre d'agriculture de l'Oise

Hélène PREUDHOMME
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Publication Janvier 2021

Projet soutenu financièrement de 2015 à 2020 par le FEDER, le FNADT au titre de l'initiative « territoire catalyseurs d'innovation » et la région Hauts-de-France



Projet coordonné par Agro-Transfert Ressources et Territoires avec comme partenaires :

