

**Concilier stockage de
carbone et production
de biomasse pour les
filières de la bioéconomie**

Sommaire

La démarche FILABIOM	3
Stocker du carbone dans les systèmes de culture pour la bioéconomie.....	4
Les plateformes expérimentales du projet Réseau de sites démonstrateurs	5
Partie 1 : Stockage de carbone dans différents systèmes de culture pour la bioéconomie.....	6
Comprendre le stockage de carbone et ses enjeux.....	7
Définition et enjeux du stockage de carbone.....	7
Le principe du bilan humique	8
Focus sur les entrées et sorties de carbone	9
Les entrees.....	9
Les sorties	9
Simuler l'évolution du stock de carbone	10
Résultats de différents systèmes pour la bioéconomie	11
Cas d'étude I : système céréalier-oléagineux sur cranette sur craie	15
Cas d'étude II : système céréalier-oléagineux sur sable limoneux.....	17
Cas d'étude III : Système betteravier sur limon profond.....	19
Cas d'étude IV : Système polyculture-élevage sur argile à silex.....	21
Ce que l'on peut retenir de ces cas d'étude.....	23
Partie 2 : Aide au choix pour concilier exportation de biomasse et stockage de carbone	24
Exporter ses couverts sans déstocker	26
Double culture : remplacer le bon terme.....	27
Focus sur les digestats de méthanisation.....	28
Les digestats, un produit organique variable	28
Quantité de carbone humifié apportée par les digestats	28
Bibliographie.....	30

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.

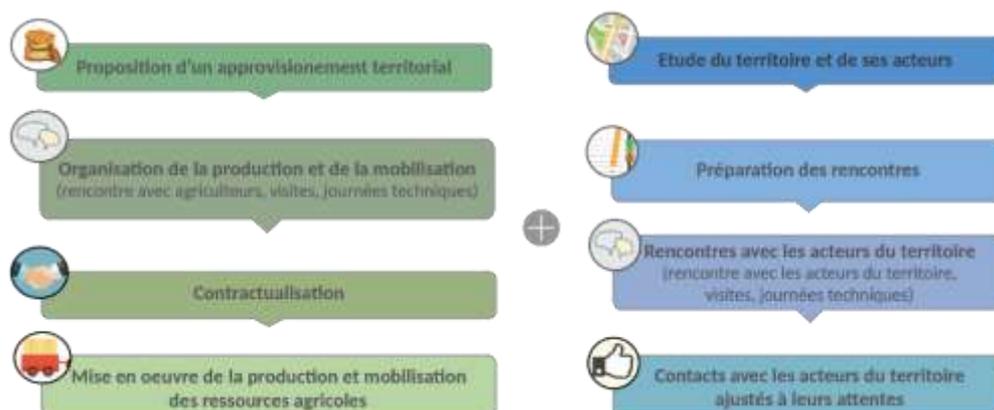


Figure 1 : La démarche FILABIOM

Le guide *Concilier stockage de carbone et production de biomasse pour les filières de la bioéconomie* porte sur le volet de la mise en œuvre concrète de la filière d'approvisionnement en biomasse agricole. Il 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 avez dit « Bioéconomie » ?

La bioéconomie englobe l'ensemble des activités économiques, dont la méthanisation, utilisant les bioressources (biomasse agricole, forestière,...) comme matières premières (MAAF 2016).

A qui s'adresse ce guide ?

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

Aux structures accompagnant techniquement ces agriculteurs

Exemples : *chambres d'agriculture, coopératives agricoles, instituts techniques, bureaux d'études ...*

Stocker du carbone dans les systèmes de culture pour la bioéconomie

L'un des objectifs des systèmes de culture pour la bioéconomie est de chercher à atteindre un niveau de production et d'exportation de biomasse plus élevé à l'hectare que dans les systèmes de culture actuels, pour limiter la concurrence sur les terres agricoles entre les valorisations alimentaires et non-alimentaires. Cette biomasse pour la bioéconomie peut être produite via différents leviers, dont :

- La valorisation des co-produits (pailles),
- L'utilisation des périodes d'interculture pour produire des Cultures Intermédiaires à Vocation énergétique (CIVE) courtes ou longues,
- Une modification de la rotation pour intégrer une/des cultures dédiées de type double culture biomasse : une céréale immature suivie d'une culture de printemps à production de biomasse élevée (maïs ou sorgho par exemple).

Vous avez dit « CIVE » ?

Il s'agit d'une Culture Intermédiaire à Vocation Énergétique, implantée spécifiquement pour produire de l'énergie (ADEME 2013). Les CIVE courtes sont implantées en été et récoltées à l'automne tandis que les CIVEs longues sont implantées à l'automne et récoltées au printemps.

Le carbone est le constituant principal de la biomasse végétale. Les plantes le captent dans l'air, où il est présent sous forme de dioxyde de carbone (CO₂), via la photosynthèse. Le CO₂ est également le principale gaz à effet de serre d'origine anthropique, dont la concentration atmosphérique a fortement augmenté ces dernières décennies, contribuant ainsi au réchauffement climatique. Lorsque les résidus végétaux (racine, pailles, etc.) retournent au sol, le carbone qu'ils contiennent est en partie incorporé dans la matière organique du sol, ce qui permet de le séquestrer pour une durée plus ou moins longue. Augmenter le stock de carbone organique des sols permet ainsi de lutter contre le réchauffement climatique, tout en augmentant la fertilité des sols. Il est donc important d'évaluer les effets de l'augmentation de l'exportation de biomasse sur le stock de carbone organique du sol. Cela amène notamment à formuler les questions suivantes :



- Quel est l'impact de l'augmentation de la quantité de biomasse exportée sur la quantité de biomasse restituée au sol, et donc sur le stock de carbone du sol, dans ces systèmes de culture ?
- Jusqu'à quel niveau d'exportation de biomasse peut-on aller et quels choix privilégier pour limiter les impacts sur le stockage de sol voire éviter de déstocker du carbone ? Faut-il privilégier un export de CIVE ou de paille ? à quelle fréquence ?
- Peut-on compenser ces exportations par un apport de digestat ?

Ce guide se propose de montrer comment l'augmentation de la production et de l'exportation de biomasse pour alimenter les filières peut influencer l'évolution du stock de carbone dans le sol pour différents cas-types, ainsi que de guider le choix pour la conception de systèmes de culture pour la bioéconomie, favorisant le stockage de carbone.

Il se découpe en deux parties :

- Comprendre l'évolution du stock de carbone dans différents systèmes de culture pour la bioéconomie
- Guider au choix de modifications de rotations pour concilier exportation de biomasse et stockage de carbone



Les plateformes expérimentales du projet Réseau de sites démonstrateurs

Pour répondre aux questions posées plus haut, ce guide s'appuie sur les résultats obtenus par l'expérimentation de systèmes de culture pour la bioéconomie, menée dans le cadre du projet « Réseau de sites démonstrateurs »¹. Trois plateformes expérimentales réparties dans les départements de l'Aisne, de la Somme et de l'Oise et gérées respectivement par la Chambre d'Agriculture de l'Aisne, de la Somme et UniLaSalle Beauvais ont accueillies ces expérimentations de 2015 à 2020. Elles étaient situées respectivement à Aizecourt-le-Haut (Ferme 3.0, 80), Landifay (02) et Beauvais (60).



Figure 2 : Plateformes d'expérimentation agronomique du projet « Réseau de sites démonstrateurs »

Leurs objectifs :

- ① Concevoir et tester des systèmes de culture pour alimenter les filières de la bioéconomie
- ① Evaluer leurs performances agronomiques, environnementales et économiques
- ① Montrer la capacité des Hauts-de-France à produire des agro-ressources

Les systèmes testés ont été conçus en se basant sur les principaux systèmes de culture picards et leurs enjeux : céréaliers-oléagineux (SCOP), betteraviers, pommes de terre-légumes et polyculture-élevage. Ils ont ensuite été déclinés en plusieurs scénarios selon un **gradient d'exportation de biomasse**, en utilisant différents leviers (exportation des pailles, utilisation des intercultures pour implanter des CIVE, réaliser trois cultures en deux ans, etc.). On retrouvait donc :

- ① un scénario *témoin*, comme système de culture de référence, avec des pratiques optimisées ;
- ① un scénario *alimentaire prioritaire*, dans lequel les cultures alimentaires sont conservées, les leviers de production de biomasse étant les exports de paille et les CIVE ;
- ① un scénario *biomasse prioritaire*, dans lequel certaines cultures alimentaires ont été substituées par des doubles cultures dédiées, dans le but de maximiser la production.

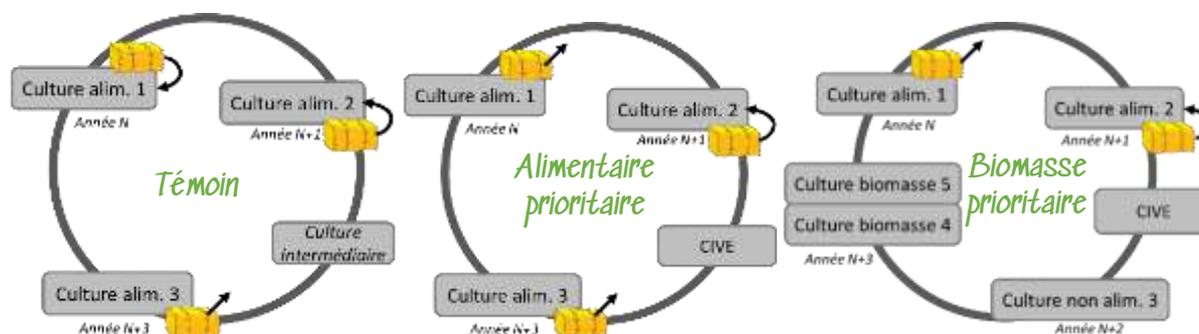


Figure 3 : Déclinaison des systèmes de culture selon un gradient d'exportation de biomasse

¹ Projet soutenu financièrement de 2015 à 2020 par le FEDER, le FNADT au titre de l'initiative « Territoires catalyseurs d'innovation », la Région Hauts-de-France



Partie 1: Stockage de
carbone dans différents
systèmes de culture pour
la bioéconomie

Comprendre le stockage de carbone et ses enjeux

Le stock de carbone du sol varie au cours du temps sous l'effet d'un certain nombre de facteurs. La dynamique d'augmentation du stock est nommée *stockage*, alors que la diminution de ce stock est appelée *déstockage*. L'objet de cette partie est de vous permettre de comprendre les enjeux autour du stockage et donc également ceux du déstockage de carbone dans les sols. La description de ces processus permettra d'identifier les leviers d'action possibles.

DEFINITION ET ENJEUX DU STOCKAGE DE CARBONE

Lors de leur croissance, les plantes captent le CO₂ de l'atmosphère via le processus de photosynthèse. Ce carbone est intégré dans leur biomasse comme constituant des tissus. Il est ensuite restitué au sol par la biomasse végétale qui ne sera pas exportée, et en partie intégré au **stock de carbone organique** du sol.

Le **stockage de carbone**, c'est-à-dire l'augmentation du stock de carbone dans le sol, gravite autour de deux enjeux :

- maintenir, voire améliorer la fertilité du sol,
- compenser en partie les émissions anthropiques de CO₂.

La question de la **fertilité des sols** est cruciale pour l'agriculteur car il s'agit de son outil de travail. Le stock de carbone est directement lié à la fertilité des sols, de par son lien étroit avec la quantité de matières organiques présente dans le sol (celle-ci est constituée environ pour moitié de carbone). La **matière organique** a de nombreux liens avec les propriétés du sol :

- elle augmente la stabilité structurale du sol et donc sa capacité à « résister » à l'érosion (Duparque et al. 2007) ;
- elle est directement liée à l'activité biologique et donc la « vie du sol » (Chambre d'Agriculture Occitanie 2011) ;
- sa minéralisation permet de fournir des éléments minéraux nécessaires à la croissance des plantes.

Le sol est considéré comme un « puits » de carbone qui peut être utilisé pour séquestrer du CO₂, en augmentant la quantité de carbone stockée dans les sols (Arrouays et al. 2002). On parle de **séquestration de carbone** lorsqu'il y a un retrait net de CO₂ de l'atmosphère, c'est-à-dire au travers de la comptabilisation des émissions de CO₂ qui ont été générées par la pratique mise en œuvre pour augmenter le stock de carbone du sol (Pellerin et al. 2019a). En ce sens, les notions de stockage et de séquestration sont bien distinctes.

Le présent guide s'intéresse à la dynamique du stock de carbone (stockage ou déstockage) sous l'effet de la mise en production des systèmes de culture pour la bioéconomie. Les résultats sont présentés à l'échelle du système de culture pour un type de sol donné. Ils permettent ainsi d'avoir une approche « parcelle ». L'objet de ce guide est de généraliser des clés de réussite favorisant le stockage de carbone dans ces systèmes.

Vous avez dit « *stock de carbone* » ?

Le stock de carbone organique est calculé à partir de la teneur en carbone organique, mesurée au laboratoire à partir d'un échantillon de sol, et de la masse de terre fine correspondant à cette teneur (Duparque et al. 2007). Il correspond donc à une masse de carbone tandis que la teneur correspond à une concentration de carbone. Ainsi, pour un même stock de carbone, on peut avoir deux teneurs différentes, ceci étant lié à la porosité du sol et sa teneur en cailloux.

Vous avez dit « *fertilité du sol* » ?

D'un point de vue agronomique, on peut définir la fertilité d'un sol cultivé par sa capacité à fournir les éléments nutritifs, l'eau et l'oxygène nécessaires à la croissance de la plante, et donc à assurer la production (Fardeau 2015).

POUR ALLER PLUS LOIN : L'ECHELLE TERRITORIALE

L'étude environnementale du projet d'approvisionnement en double cultures de l'unité de méthanisation CBVER a permis de proposer des pistes de réflexion dans la mise en place concrète de la filière grâce l'étude des conséquences de la production de double culture sur le stockage de carbone à l'échelle du territoire.

ABC'Terre est une méthode spatialisée quantifiant, à l'échelle territoriale, les impacts des pratiques agricoles sur les variations à long terme des stocks de carbone organique (C org) de la couche superficielle des sols.

<http://www.agro-transfert-rt.org/abc terre/>

LE PRINCIPE DU BILAN HUMIQUE

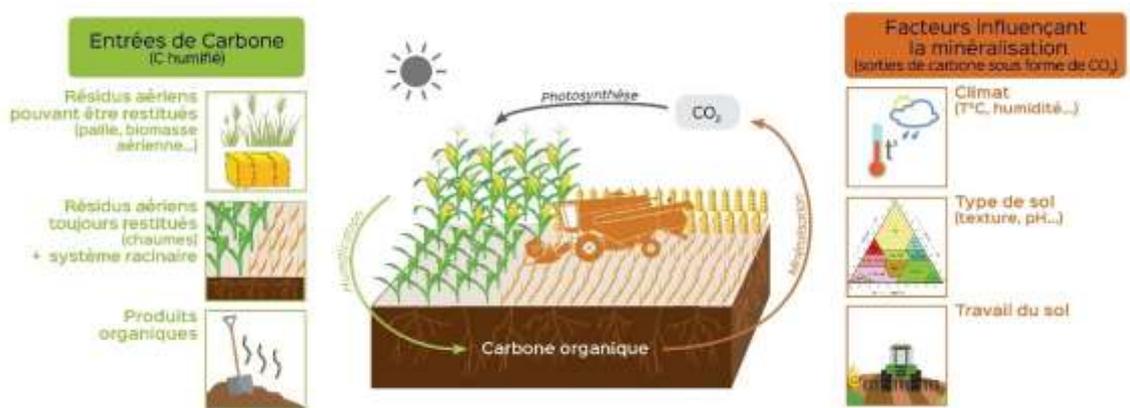


Figure 4 : Principe du bilan humique

La Figure 4 présente le principe du bilan humique. Décrit par Hénin and Dupuis (1945), il permet de prévoir l'évolution du stock de carbone organique d'un sol, en s'appuyant sur le bilan des entrées et des sorties de carbone.

Les entrées de carbone sont dues aux résidus de cultures (aériens, racinaires, cultures intermédiaires) et aux produits organiques apportés sur la parcelle. On parle de carbone humifié pour désigner la fraction qui sera réellement stabilisée dans la matière organique du sol à la fin du processus de décomposition, sous l'action des microorganismes du sol (le reste retournant dans l'atmosphère sous forme de CO₂).

Les sorties de carbone se font sous forme de CO₂ via la minéralisation de la matière organique, elle-même due à l'activité biologique du sol. Cette dernière est influencée principalement par **le stock de carbone organique**, le climat et le type de sol.

L'équilibre de ces deux flux va déterminer la dynamique du stock :

- Si les entrées de carbone sont supérieures aux sorties, il y a stockage de carbone.
- A l'inverse, des sorties de carbone supérieures aux entrées entraînent un déstockage.

Les entrées de carbone humifié dans les systèmes de culture sont le facteur que l'on peut influencer par les choix de rotation et de pratiques. Les sorties de carbone par minéralisation sont surtout liées aux conditions pédoclimatiques et donc peu influençables. Il apparaît ainsi plus efficace de jouer sur les entrées que sur les sorties pour séquestrer du carbone (Chenu et al. 2014). De plus, des travaux récents ont montré que le faible impact du travail du sol sur la minéralisation permettait de comparer les systèmes sur la base des entrées de carbone humifié (Clivot et al. 2019).

Vous avez dit « teneur en carbone » ?

La teneur en carbone organique est obtenue après analyse d'un échantillon de terre au laboratoire. Plusieurs méthodes existent pour quantifier cette teneur, notamment les méthodes Anne (oxydation par voie humide) et Dumas (oxydation par voie sèche) La teneur en matière organique n'est pas directement mesurée, elle sera calculée à partir de la teneur en carbone organique, à laquelle un coefficient est appliqué, variant en fonction du laboratoire (en général 1.72) (Duparque et al. 2007).



LES ENTREES

Dans les systèmes de culture, les entrées de carbone sont sous la forme de résidus de culture, et d'apports de produits résiduels organiques (PRO).

Leurs quantités vont être les premiers facteurs déterminants de la quantité de carbone humifié apportée, c'est-à-dire qui intègre la matière organique du sol.

Cependant, **la qualité de cette biomasse ou du PRO**, c'est-à-dire sa composition physico-chimique, aura également un impact non négligeable sur la quantité de carbone humifié. Cette qualité peut être évaluée simplement par le rapport C/N (ratio carbone-azote). Les microorganismes du sol, ou biomasse microbienne, acteurs de la décomposition des résidus et PRO et de leur transfert vers la matière organique du sol ont besoin d'azote pour pouvoir assurer leur croissance, et ce autant qu'il faudra pour maintenir leur propre C/N d'équilibre (Lemaire and Nicolardot 1997). Ainsi, les résidus et PRO à C/N faible ont une teneur en azote élevée (par exemple les cultures intermédiaires), et donc une décomposition sera rapide, l'énergie nécessaire

étant disponible pour les microorganismes du sol (Duparque et al. 2007).

La quantité de carbone humifié par les résidus de culture et PRO est ainsi représentée par **le coefficient isohumique (k₁)**, le taux d'humification, qui est propre à chaque culture et type de biomasse (aérien et souterrain), et chaque type de PRO. Il s'agit de la quantité d'humus apporté par unité de carbone contenue dans le produit frais (Duparque et al. 2007). Les k₁ des résidus aériens sont directement liés au C/N (Justes, Mary, and Nicolardot 2009).

La décomposition d'un résidu ou PRO va permettre non seulement d'humifier une partie de son carbone, mais aussi de libérer de l'azote dans la solution du sol. Ce phénomène va être conditionné non seulement par la disponibilité de l'azote dans le produit dégradé (son C/N), mais aussi dans le milieu pour assurer le fonctionnement de la biomasse microbienne. Pour les résidus à C/N élevés (faible teneur en azote), tels que les pailles de céréales, leur décomposition engendrera un phénomène d'immobilisation, aussi appelé « faim d'azote ».

LES SORTIES

Les sorties de carbone sont principalement déterminées par le **type de sol, la température et l'humidité du sol**. Les argiles sont des minéraux connus pour permettre de stabiliser les matières organiques (MO) du sol, permettant un ralentissement de leur minéralisation (Pellerin et al. 2019b). La présence de calcaire dans le sol tend aussi à insolubiliser les MO et réduire leur minéralisation (Pellerin et al. 2019b). Température et humidité du sol ont également un impact sur la minéralisation (Duparque et al. 2007) : plus la température est élevée, plus la minéralisation augmente et celle-ci est maximale lorsque l'humidité est à la capacité au champ. Des travaux récents ont montré que l'arrêt du labour avec la

mise en place d'un travail superficiel ou même d'un semis direct auront peu d'impacts sur la minéralisation de la MO et donc sur l'évolution du stock de carbone organique à volume de sol équivalent (Mary et al. 2020). En effet, le principal effet lié à la réduction du travail du sol sera l'accumulation de la MO en surface, améliorant les propriétés de cette couche de sol. Cependant, si la réduction du travail du sol s'accompagne d'une augmentation de la couverture végétale du sol, comme cela peut être le cas en agriculture de conservation des sols, cela va entraîner une augmentation des entrées de carbone dans le sol et contribuer à augmenter le stock de carbone organique du sol.

SIMULER L'ÉVOLUTION DU STOCK DE CARBONE

Le stock de carbone du sol évolue de façon très lente et une modification de stock ne sera visible que plusieurs années après une modification de pratique ou de rotation. Il apparaît ainsi pertinent de simuler son évolution à l'aide de modèles afin de prévoir l'effet des modifications sur le stock et ainsi d'aider à la décision.

L'outil [SIMEOS-AMG²](#), développé par Agro-Transfert RT et l'INRAE permet, sur la base du principe du bilan humique AMG (Andriulo, Mary, and Guerif 1999; Clivot et al. 2019), d'évaluer l'évolution du stock de carbone d'un système de culture dans un contexte pédoclimatique donné sur le long terme. Les entrées de carbone humifié via les résidus de culture (aériens et souterrains) et les potentiels

apports de PRO sont comparées aux sorties correspondant à la minéralisation annuelle du carbone du sol afin d'évaluer l'équilibre de ce bilan. L'évolution du stock de carbone organique (Corg) est déterminée par le solde des entrées et sorties de Corg intégré dans le temps par l'équation de calcul de SIMEOS-AMG (Figure 5). La quantité de carbone humifié restituée au sol est différente en fonction des cultures et de la gestion des résidus. La quantité de carbone minéralisé annuellement dépend du climat, des caractéristiques du sol (teneurs en argile et CaCO₃, pH, C/N) et du stock de carbone actif. Les résultats présentés dans la suite de ce guide ont été obtenus avec cet outil de calcul. Les simulations sont réalisées sur une période de 30 ans.

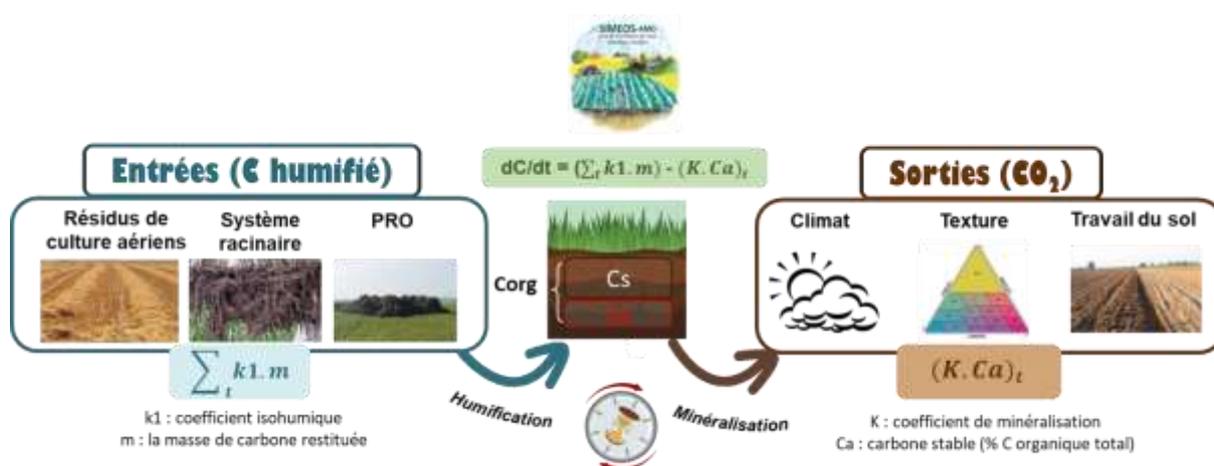


Figure 5 : Principe de calcul de l'outil Simeos-AMG

POUR ALLER PLUS LOIN : UTILISER SIMEOS-AMG SUR VOTRE EXPLOITATION

L'outil SIMEOS-AMG est disponible en version « démo » pour simuler l'évolution de l'état organique d'un sol (stock et teneur) dans un contexte donné. Des formations peuvent être réalisées sur demande. Pour cela il vous suffit de vous rendre ici, et de contacter !

<http://www.simeos-amg.org/>



² Version 1.3, 2020

Résultats de différents systèmes pour la bioéconomie

Dans le cadre du projet « Réseau de sites démonstrateurs », un certain nombre de systèmes de culture pour la bioéconomie ont été imaginés et testés. Fort du retour d'expérience permis par ces expérimentations, les partenaires du projet ont pu définir un certain nombre d'hypothèses pour paramétrer les simulations de l'évolution du stock de carbone de tels systèmes dans différents types de sols des Hauts-de France. Les résultats de ces systèmes sont présentés ci-dessous.

Comment les systèmes ont-ils été choisis et définis ?

Systèmes étudiés

Les différents systèmes de culture et leurs types de sol présentés ici sont inspirés de systèmes de culture testés en conditions réelles dans le cadre du projet « Réseau de sites démonstrateurs ».

Types de sol retenus

Les parcelles d'expérimentation ont des compositions granulométriques et des stocks de carbone initiaux différents entre elles, et donc une évolution attendue différente pour un même système de culture. Le choix a donc été fait de rattacher chaque système de culture et ses déclinaisons en systèmes pour la bioéconomie à un type de sol (le plus proche possible du type de sol sur lequel le système a été testé) dont le paramétrage est issu du livrable de Persyst pour la Picardie (Tavares et al. 2015), et complété par l'expertise d'Annie Duparque. Leurs caractéristiques sont précisées dans le tableau suivant.



Tableau 1 : Caractéristiques des types de sols retenus

Type de sol/ Paramètre	Argile à silex	Crannette sur craie	Limon moyen profond	Sable limoneux
Charge volumique en cailloux (%)	30	33	0	0
MO initiale (%)	3.2	2.7	2	1.7
Argile (%)	30	14	19	9
Calcaire (%)	1.5	60	0.4	0.4
C/N	9.5	9.5	9.5	9.5
Densité apparente intrinsèque (g/cm ³)	1.3	1.2	1.4	1.4
pH	7.5	8.5	7.5	7

Rendements considérés

Afin de paramétrer les simulations, le choix a été fait de définir des hypothèses de rendements « réalistes » au lieu des rendements obtenus dans le cadre des expérimentations, de façon à s'affranchir des biais d'expérimentation. En effet, l'essai étant surtout centré sur la faisabilité technique de la mise en place des leviers pour augmenter l'exportation de biomasse, différentes pratiques furent testées tout au long des essais de façon à trouver celle qui permettrait d'obtenir la meilleure réussite. Des échecs culturels dans le cadre des essais ont donc pu avoir lieu.

Les rendements des **cultures « connues »** ont été définis sur la base des travaux de paramétrage de Persyst pour la Picardie (Tavares et al. 2015) incluant l'effet de fréquence de retour de la culture et l'effet précédent. Cependant, le choix a été fait de ne pas inclure d'effet d'itinéraire technique, notamment lié à l'azote, car les itinéraires ne sont pas encore stables. Ces rendements en fonction du type de sol et du système de culture sont présentés dans le tableau suivant. Les rendements de céréales sont exprimés pour une humidité de 15%. Les rendements de colza sont exprimés pour une humidité de 9%.



Tableau 2 : Rendements moyens des cultures "connues" par type de sol, issus de Persyst, utilisés pour les simulations

Système	Culture	Argile à silex	Crannette sur craie	Limon moyen profond	Sable-limoneux
SCOP	Colza de blé (qx/ha)	34	33.5	45.3	32
	Colza d'escourgeon ou orge de printemps (qx/ha)	32.5	32	43.8	30.5
	Blé de colza (qx/ha)	81.5	82.5	96.5	71.5
	Blé de double culture (qx/ha)	78.5	79.5	93.5	68.5
	Escourgeon (qx/ha)	79.5	80	93.4	71.5
	Orge de printemps (qx/ha)	65	59.8	72.5	56
Betteraves	Betterave sucrière (t/ha)	80	80	93	82.5
	Colza hiver (qx/ha)	35.5	35	46.8	33.5
	Blé de betteraves et colza (qx/ha)	81.5	82.5	96.5	71.5
	Blé de double culture (qx/ha)	78.5	79.5	93.5	68.5
	Orge de printemps (qx/ha)	68	62.8	75.5	59
	Pois protéagineux (qx/ha)	45	40.5	49.5	39.15
Polyculture-élevage	Betterave fourragère (t/ha)	79.2	79.2	92.07	81.675
	Blé et colza (qx/ha)	81.5	82.5	96.5	71.5
	Blé de double culture (qx/ha)	78.5	79.5	93.5	68.5
	Colza hiver (qx/ha)	35.5	35	46.8	33.5

Les rendements des **CIVE et doubles cultures** ont été définis par les pilotes des expérimentations des essais systèmes, lors d'un atelier. Il leur a été demandé de définir pour chaque culture, dans chaque système de culture et dans chaque type de sol, les bornes minimum, maximum (hors extrêmes) et un type de distribution (centrée, centrée gauche ou centrée droite) pour pouvoir définir un rendement moyen. Les valeurs retenues par type de sol pour les différentes cultures « innovantes » en fonction du type de sol et du système de culture sont présentées dans le tableau suivant.



Tableau 3 : Rendements moyens (tMS/ha) des cultures "innovantes" par type de sol, issus des ateliers, utilisés pour les simulations

Système	Culture	Argile à silex	Crannette sur craie	Limon moyen profond	Sable-limoneux
SCOP	Avoine + légumineuses	1.7	1.6	3	1.6
	Maïs ensilage	11.2	5.8	13	6.5
	Ray-grass+trèfle	4.7	4.7	5.8	4.8
	Sorgho ensilage	9.2	6	13.2	7.5
	Triticale+pois	9	8	11.2	9
Betteraves	Avoine + légumineuses	1.5	1.4	2.8	1.7
	Moutarde +trèfle	2.1	1.9	3	1.9
	Seigle	11.4	9.8	11.5	10.2
	Sorgho ensilage	6.1	5.1	13.2	6.2
Polyculture-élevage	Blé immature	6.8	6.5	10	6.8
	CID ³ 1	3	4	6.5	4.5
	CIVE1/CIVE2	4	4	8.5	5
	Maïs ensilage	13	10.8	17.2	12
	Méteil	8.8	7.1	12.2	8.3
	cid 2 (ray-grass+colza)	1.2	1.2	2.5	1.7

Comment lire les résultats suivants ?

Pour chacun des systèmes, les éléments suivants sont présentés :

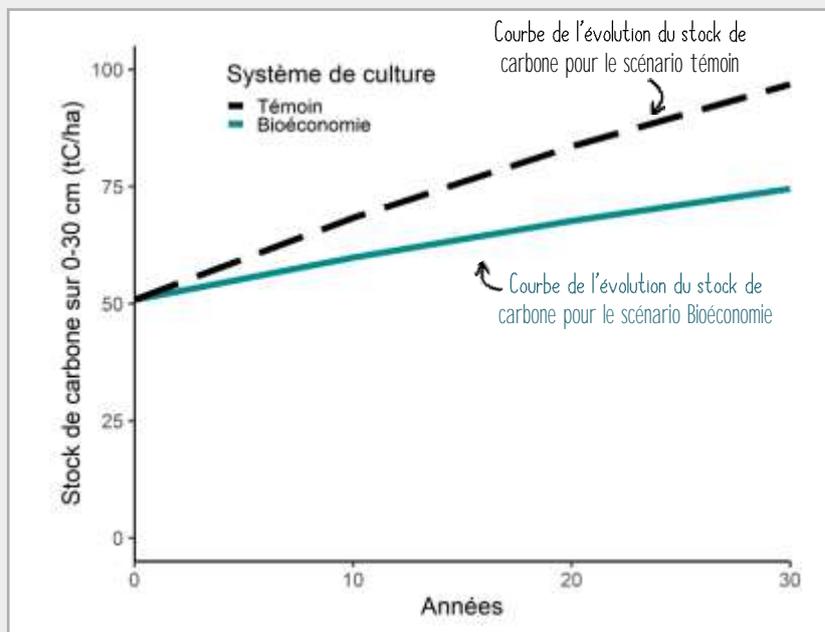
- 🕒 Type de sol pour lequel la simulation est réalisée
- 🕒 Rotation initiale et rotations modifiées (scénarios bioéconomie)
- 🕒 Evolution du stock de carbone pour les rotations (initiale et modifiées)
- 🕒 Explication de l'évolution du stock sur la base des entrées de carbone et sorties de carbone



³ CID : Culture intermédiaire dérobée

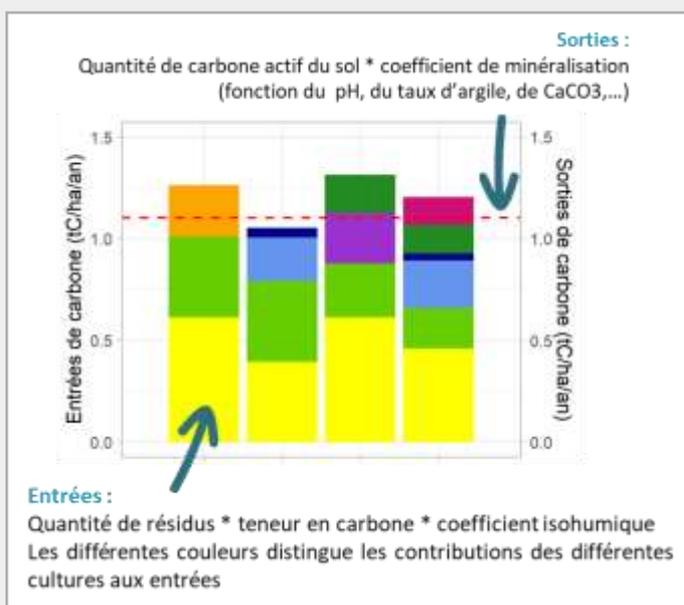
Lire les graphiques de l'évolution du stock de carbone

Dans chaque graphique de l'évolution du stock de carbone (obtenue avec SIMEOS-AMG), les différentes courbes représentent les différents scénarios d'un même système de culture, permettant leur comparaison.



Lire les graphiques des entrées et sorties de carbone

Dans chaque graphique, les barres représentent les entrées de carbone humifiées de chaque système de culture et les lignes représentent les sorties de carbone, au temps initial de la simulation avec SIMEOS-AMG. Cette présentation des résultats est inspirée des sorties du projet « SOLÉBIOM » (2015-2018).



Etant donné que le stock de carbone résulte du bilan des entrées et des sorties :

- ① Si la ligne des sorties est au-dessus de la barre des entrées pour un système, cela signifie que les sorties sont supérieures aux entrées : il y a **déstockage**.
- ② Si la ligne des sorties est en-dessous de la barre des entrées pour un système, cela signifie que les entrées sont supérieures aux sorties : il y a **stockage**.



CAS D'ETUDE I : SYSTEME CERELIER-OLEAGINEUX SUR CRANETTE SUR CRAIE

Dans mon système céréalier-oléagineux, j'envisage trois scénarios de remplacement de l'escourgeon, dont la paille est exportée initialement pour produire plus de biomasse :

- ① **CIVE courte** suivie d'une orge de printemps avec paille exportée
- ① **Double culture dédiée : triticales+pois suivi d'un sorgho.**
- ① Allongement de la rotation pour avoir à la fois une cive courte suivie d'une orge de printemps et d'une double culture.

Est-ce que ces changements auront des conséquences sur le stock de carbone de mon sol à long terme, qui est une **cranette sur craie** ? Je m'attends à augmenter mes quantités de biomasse exportées mais qu'en est-il de la biomasse restituée, va-t-elle diminuer ?



ROTATION, BIOMASSE EXPORTEE ET RESTITUEE

Dans le Tableau 4, on observe que mes quantités de biomasse exportées sont bien augmentées au fur et à mesure des modifications, sauf pour le scénario biomasse prioritaire en 4 ans. Les quantités de biomasse restituées quant à elle ne diminuent pas ou peu, voire augmentent légèrement. Ce résultat

montre qu'augmenter la quantité de biomasse exportée n'entraîne pas forcément une diminution de celle qui sera restituée. Les doubles cultures dédiés permettent en effet de restituer une quantité de biomasse racinaire importante, de par leur temps d'occupation long.

Tableau 4 : Caractéristiques du système céréalier oléagineux sur cranette sur craie

Scénario	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Biomasse totale exportée (tMS/ha/an)	Biomasse totale restituée (tMS/ha/an)
Témoin 3 ans	Colza	Blé	Escourgeon paille exportée		6.6	6.3
Alimentaire prioritaire 3 ans	colza	blé	Cive courte + orge de printemps paille exportée		8	6
Biomasse prioritaire 3 ans	colza	Double culture triticales+pois suivi sorgho	Blé		9	6.6
Biomasse prioritaire 4 ans	colza	Cive courte + orge de printemps paille exportée	Double culture ray-grass+trèfle suivi maïs ensilage	Blé	7.8	6

Vous avez dit « cranette sur craie » ?

Les sols de cranette sur craie sont des sols plutôt argileux et qui présentent une teneur en calcaire élevée, qui leur confère une minéralisation plus lente que d'autres sols (1.11 tC/ha/an). Dans cette étude, on lui attribue une charge en cailloux de 33% et un stock initial de 57 tC/ha.

Vous avez dit « double culture » ?

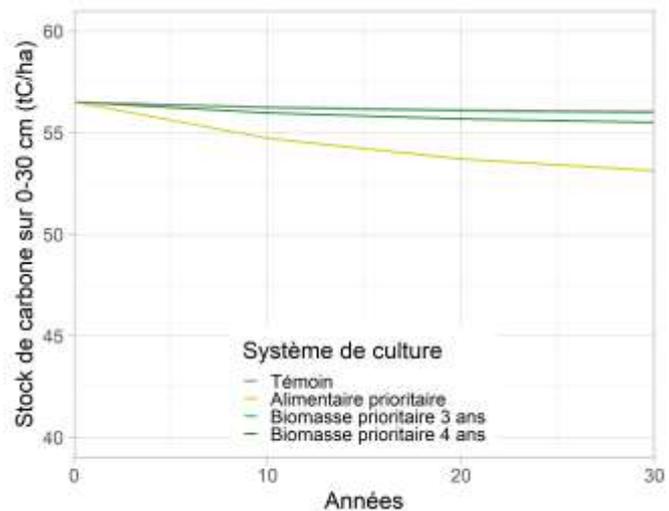
Il s'agit de la production de deux cultures biomasses* en un an, dédiées à une valorisation énergétique. C'est la succession d'une culture d'hiver récoltée précocement au printemps (céréales immatures seules ou en mélange avec des légumineuses), suivie d'une deuxième culture à cycle court (maïs, sorgho...), implantée directement et récoltée en début d'automne.



EVOLUTION DU STOCK DE CARBONE

Le scénario témoin et les deux scénarios biomasse prioritaire sont dans une dynamique légèrement déstockante mais qui est très proche entre les scénarios, et stable. En revanche, les modifications apportées dans le scénario alimentaire prioritaire entraînent une diminution du stock beaucoup plus importante (Figure 6).

Figure 6 : Evolution du stock de carbone pour le système céréalier sur cranette sur craie



DETAIL DES ENTREES ET SORTIES DE CARBONE

Sur la Figure 7, les entrées de carbone sont toutes légèrement inférieures aux sorties, expliquant la dynamique de déstockage, c'est-à-dire de diminution du stock, observée dans le graphique d'évolution (Figure 6).

Les quantités d'entrées de carbone humifiées sont plus faibles dans le scénario alimentaire prioritaire (en lien avec l'exportation de paille de colza), ce qui entraîne un déstockage plus important de ce système par rapport aux autres. En effet, dans ce système, les colzas avec pailles restituées permettent les restitutions de carbone humifié les plus importantes, suivies par les blés d'hiver dont la paille est restituée.

Les doubles cultures montrent également des quantités de carbone humifié importantes, équivalentes voire supérieures aux céréales dont la paille est exportée, malgré des quantités de biomasses exportées bien supérieures.

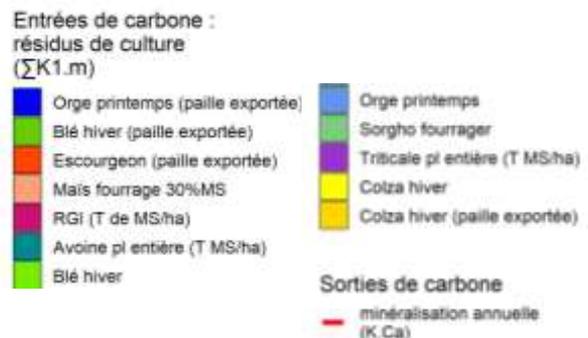
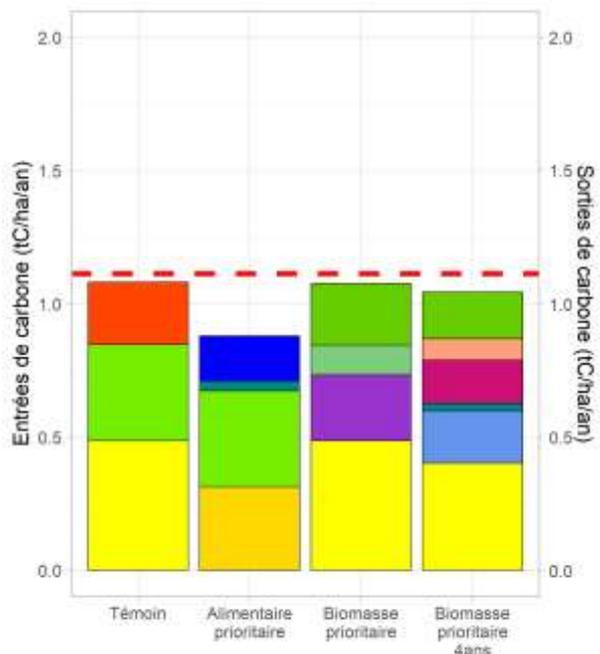


Figure 7 : Graphique des entrées et des sorties de carbone du système céréalier sur cranette sur craie



CAS D'ETUDE II : SYSTEME CERELIER-OLEAGINEUX SUR SABLE LIMONEUX

Vous avez dit « *sable limoneux* » ?

Qu'advient-il de l'évolution du carbone si je réalise les mêmes modifications dans mon système céréaliier-oléagineux, mais sur une parcelle avec un type de sol différent, ici un sable limoneux profond ?



Le sable limoneux profond présente une teneur faible en argile (inférieure à 10%), et une teneur en calcaire faible, amenant à un taux de minéralisation annuelle assez élevée (1.36 tC/ha/an). Dans cette étude, on lui attribue un stock initial de 42 tC/ha.



ROTATION, BIOMASSE EXPORTEE ET RESTITUEE

Dans ce cas-type, seul le type de sol a été modifié par rapport à la situation précédente. Les niveaux de rendements en sont impactés, les quantités de biomasse exportées et restituées le sont donc également (Tableau 5). Le potentiel de production

de ce sol étant moins élevé, les quantités de biomasse exportées et restituées le sont également. On observe de plus que les différentes de biomasse restituées sont plus marquées sur ce type de sol.

Tableau 5 : Caractéristiques du système céréaliier oléagineux sur sable limoneux

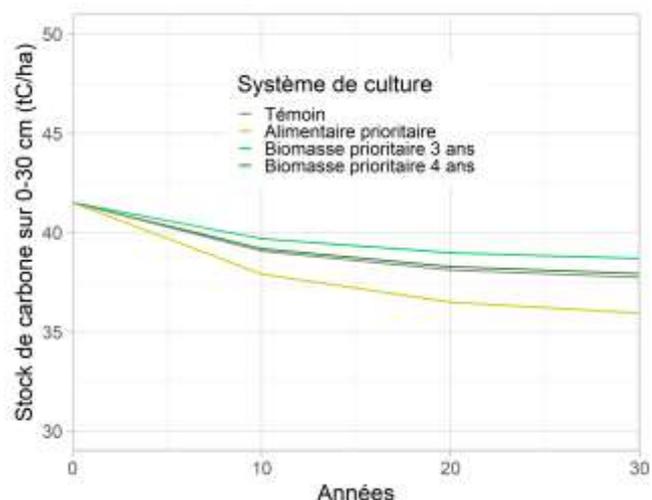
Scénario	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Biomasse totale exportée (tMS/ha/an)	Biomasse totale restituée (tMS/ha/an)
Témoin 3 ans	Colza	Blé	Escourgeon paille exportée		6	5.8
Alimentaire prioritaire 3 ans	colza	blé	Cive courte + orge de printemps paille exportée		7.4	5.6
Biomasse prioritaire 3 ans	colza	Double culture triticale+pois suivi sorgho	Blé		9.4	6.7
Biomasse prioritaire 4 ans	colza	Cive courte + orge de printemps paille exportée	Double culture ray-grass+trèfle suivi maïs ensilage	Blé	7.5	6



EVOLUTION DU STOCK DE CARBONE

Sur ce type de sol, le système céréaliier-oléagineux entraîne pour tous les scénarios testés une diminution du stock de carbone. Cette diminution est encore plus marquée pour le scénario alimentaire prioritaire, comme dans le cas-type précédent (Figure 8).

Figure 8 : Evolution du stock de carbone dans le système céréaliier-oléagineux sur sable limoneux profond





DETAIL DES ENTREES ET SORTIES DE CARBONE

Dans cette situation où le type de sol a été modifié, on peut noter que les sorties de carbone sont plus élevées, et supérieures aux entrées (Figure 9). Ce résultat explique la diminution du stock de carbone dans tous les scénarios.

Les observations et conclusions quant aux entrées de carbone humifiées sont les mêmes que pour la situation précédente, la rotation et les pratiques restant inchangées.

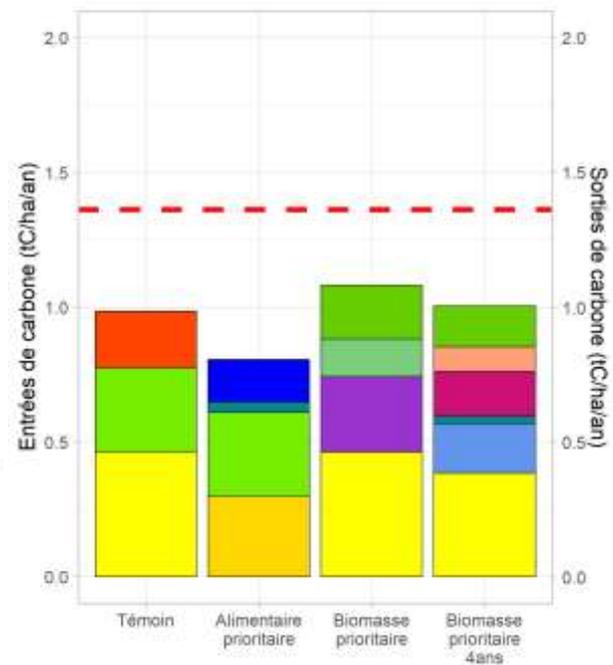


Figure 9 : Graphique des entrées et des sorties de carbone du système céréalier sur sable limoneux profond



CAS D'ETUDE III : SYSTEME BETTERAVIER SUR LIMON PROFOND



Dans mon système betteravier, je souhaiterais modifier ma rotation en deux temps :

- ① Remplacer le blé dont la paille est restituée par **une cive courte** suivie d'une orge de printemps dont la paille sera exportée
- ② Remplacer le colza par **une double culture dédiée : seigle immature suivi d'un sorgho**

Quelle évolution attendre du stock de carbone sur un **limon profond** suite à ces modifications ?

Vous avez dit « *limon profond* » ?

Les limons profonds sont des sols plutôt argileux mais pauvres en calcaire et sans cailloux. Leur minéralisation est assez rapide (1.47 tC/ha/an dans cette étude). Dans cette étude, on lui attribue un stock initial de 49 tC/ha.

Vous avez dit « *seigle immature* » ?

Le seigle immature est implanté à l'automne et récolté avant l'atteinte du stade de maturité, pour une exportation de biomasse « verte ». La récolte doit se faire assez précocement de façon à pouvoir planter la deuxième culture biomasse dans de bonnes conditions.



ROTATION, BIOMASSE EXPORTEE ET RESTITUEE

Comme pour le système céréalier, les modifications dans la rotation induisent une augmentation des quantités de biomasse produites et exportées et ce de manière importante (Tableau 6). La présence de la betterave sucrière ainsi que les potentiels de production plus importants du type de sol

permettent d'atteindre ces résultats. A l'inverse, la quantité de biomasse restituée diminue dans le scénarios biomasse prioritaire de par le remplacement du colza.

Tableau 6 : Caractéristiques du système betteravier sur limon moyen profond

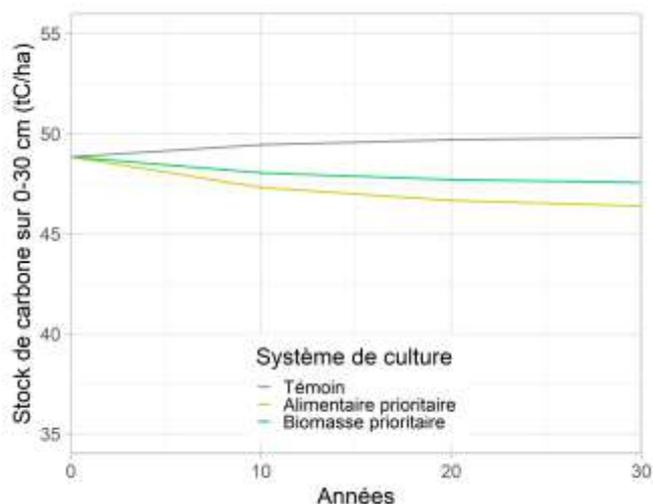
Scénario	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Biomasse totale exportée (tMS/ha/an)	Biomasse totale restituée (tMS/ha/an)
Témoin	Betteraves sucrière	Blé	Colza	Blé	9.8	7.5
Alimentaire prioritaire	Betteraves sucrière	Blé	Colza	Cive courte + orge de printemps paille exportée	12.5	7.5
Biomasse prioritaire	Betteraves sucrière	Blé	Double culture seigle suivi sorgho	Blé	15.8	6.8



EVOLUTION DU STOCK DE CARBONE

Dans ce système et ce type de sol, les modifications apportées entraînent une diminution du stockage de carbone sur le long terme, tandis que le scénario témoin permettait d'augmenter le stock (Figure 10).

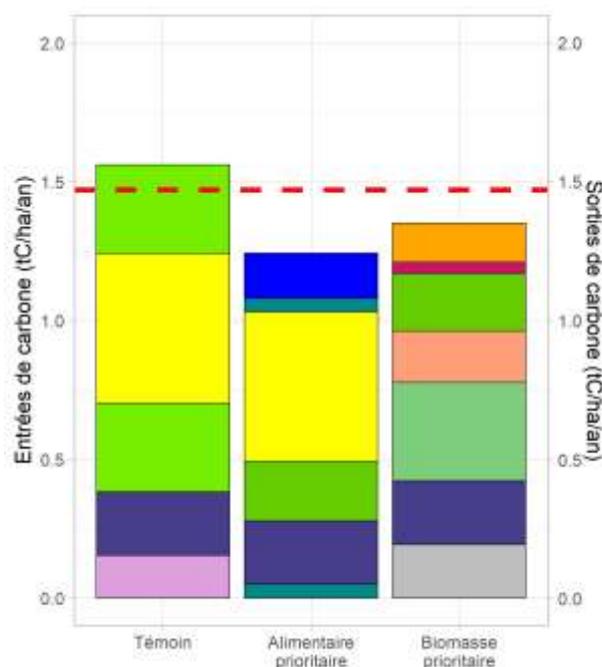
Figure 10 : Evolution du stock de carbone dans le système betteravier sur limon moyen profond



DETAIL DES ENTREES ET SORTIES DE CARBONE

Pour le scénario témoin, les entrées sont supérieures aux sorties, tandis qu'elles sont inférieures pour les scénarios alimentaire et biomasse prioritaire (Figure 11). Ces résultats expliquent l'augmentation du stock de carbone dans le scénario témoin et la diminution dans les deux autres.

En cause, les changements de rotation effectués dans cette rotation qui ont entraîné une baisse des entrées, qui passent alors juste en dessous de la barre des sorties. Dans ce système, les entrées de carbone humifiées sont en effet largement apportées par le colza. Ainsi, son remplacement dans le scénario biomasse prioritaire impacte les entrées totales de ce scénario, qui diminuent. Dans le scénario alimentaire prioritaire, c'est l'export d'une paille supplémentaire et de la biomasse aérienne des couverts qui entraînent la baisse des entrées du carbone humifié.



Entrées de carbone :
résidus de culture
($\Sigma K1.m$)

- Pois protéagineux
- CIVE Moutarde
- Blé hiver (paille exportée)
- Orge printemps (paille exportée)
- CIVE Avoine
- Blé hiver
- Colza hiver
- Sorgho fourrager
- Seigle immature

- Betterave sucrière
- CI Radis fourrager
- CI Moutarde

Sorties de carbone

- minéralisation annuelle (K.Ca)



CAS D'ETUDE IV : SYSTEME POLY-CULTURE-ELEVAGE SUR ARGILE A SILEX



Dans mon système polyculture-élevage, je cherche à **maximiser les exportations de biomasse « verte »** tout en conservant une production de fourrage. Ainsi, j'ai fait le choix de supprimer le colza et les céréales à pailles et d'introduire à la place un méteil, une betterave fourragère et un blé immature, tout en conservant la double culture (dérobée + maïs). De plus, j'ai remplacé les effluents d'élevage par **du digestat brut**.

Quelle modification de l'évolution du stock de carbone attendre de ces modifications ?

Vous avez dit « argile à silex » ?

Les argiles à silex sont des sols très argileux et avec une charge en silex élevée (on considère ici 30%). Ils sont riches en matière organique et peu calcaire. Les stocks élevés considérés dans cette étude (73 tC/ha) entraînent une minéralisation importante (1.59 tC/ha/an).

Vous avez dit « digestat » ?

Les digestats sont des résidus issus des processus de méthanisation, riches en éléments minéraux et qui peuvent être épandues sur les cultures. Selon leur traitement, ils sont sous forme liquide ou solide, plus ou moins riche en azote et carbone.



ROTATION, BIOMASSE EXPORTEE ET RESTITUEE

Dans ce système polyculture-élevage, les modifications du scénario biomasse prioritaire sont plus profondes, entraînant des quantités de biomasse exportée beaucoup plus importantes, cette biomasse étant surtout immature. Il s'agit ici d'un enchaînement de cultures de printemps en remplacement des céréales d'hiver et du colza. Avec

ce scénario, les quantités de biomasse restituées sont fortement impactées, quasiment divisées par deux. Les apports de produits organiques ont également été modifiés dans ce scénario (Tableau 7). Ce cas d'étude est représentatif des modifications qui peuvent être faites dans le cadre du développement de filières de méthanisation.

Tableau 7 : Caractéristiques du système polyculture-élevage sur argile à silex

Scénario	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Produits organiques	Biomasse totale exportée (tMS/ha/an)	Biomasse totale restituée (tMS/ha/an)
Témoin	Colza	Blé	CI + maïs ensilage	Blé paille exp	1 Fumier + 2 lisiers bovins	8.3	8.3
Alimentaire prioritaire	Colza	Blé paille exp	CIVE 1 + maïs ensilage	Blé paille exp	5 digestats sur 4 ans	10.3	7.8
Biomasse prioritaire	CID 2 + Méteil	CIVE 2 + maïs ensilage	CID 1 + betteraves fourragère	Blé immature	5 digestats sur 4 ans	13	4.5

CI : mélange avoine rude + vesce + phacélie

CIVE 1 et CIVE 2 : mélange 5-6 espèces dont céréale C4, triticales, ray-grass pour 50% et 50% légumineuses

CID 1 : mélange 50% triticales et 50% légumineuses

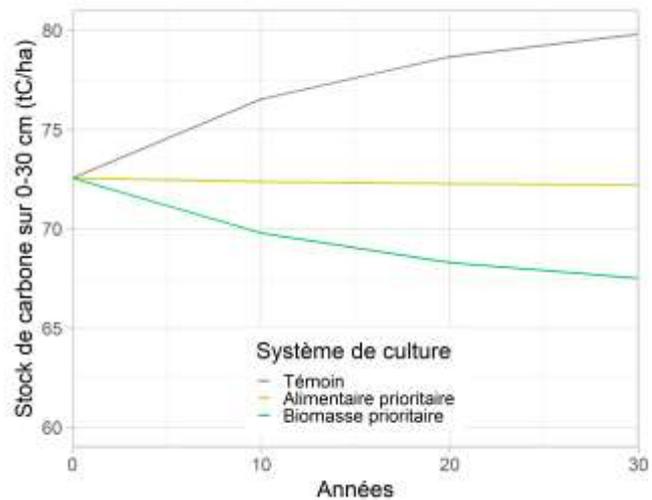
CID 2 : mélange ray-grass + colza fourrager



EVOLUTION DU STOCK DE CARBONE

Le scénario témoin de ce système est très stockant (Figure 12). Les modifications réalisées pour le scénario alimentaire entraînent une modification de cette dynamique, le stock reste alors stable sur la période simulée. Cependant, le scénario biomasse prioritaire présente un déstockage très important.

Figure 12 : Evolution du stock de carbone dans le système polyculture-élevage sur argile à silex



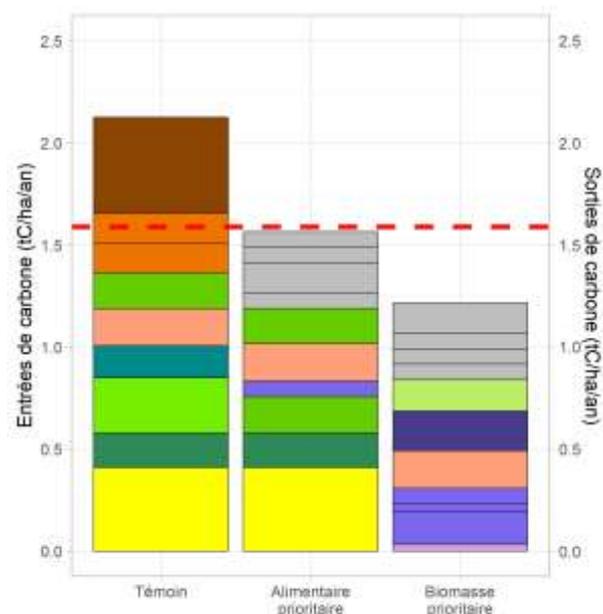
DETAIL DES ENTREES SORTIES DE CARBONE

Ce système présente des entrées de carbone très élevées, jusqu'à deux fois supérieures à celles du système céréalier (Figure 13). Elles sont supérieures aux sorties en ce qui concerne le scénario témoin.

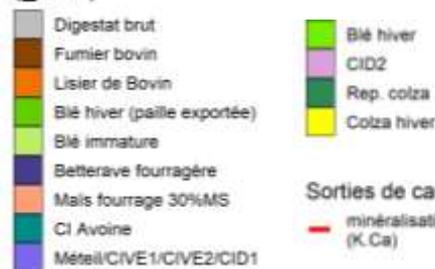
Cependant, les modifications effectuées dans les scénarios alimentaire et biomasse prioritaire ne permettent pas de compenser les sorties également importantes, entraînant une diminution du stock. En effet, quantités de carbone humifiées diminuent de manière importante dans ces scénarios, notamment par le remplacement des fumier et lisiers par les digestats, qui ne permet pas autant d'apports, malgré les apports fréquents.

Dans le scénario biomasse prioritaire, le changement de rotation appuie d'autant plus cet effet : c'est le passage d'un mix de cultures de printemps/cultures d'hiver, à 100% de cultures de printemps qui en est la cause. Les cultures de printemps, à cycle plus courts, ne permettent pas autant de restitution car leur biomasse racinaire et de chaumes est moins importante.

Figure 13 : Graphique des entrées et des sorties de carbone du système polyculture-élevage



Entrées de carbone : résidus de culture ($\sum K1.m$)



CE QUE L'ON PEUT RETENIR DE CES CAS D'ETUDE



- ④ **Le stockage de carbone organique dépend du système de culture et du type de sol** car les cultures et les pratiques varient d'un système à l'autre et les niveaux de rendements sont différents (et donc les quantités d'entrées de carbone), de même que les sorties sont modifiées.
- ④ **Pour un même système de culture, sur différents types de sol, l'évolution va également être différente**, de par, non seulement des sorties de carbone différentes, mais aussi des niveaux de rendements et donc d'entrées de carbone différentes.
- ④ **C'est le changement des niveaux d'entrées de carbone humifié qui détermine la différence entre les scénarios pour un même type de sol :**
 - L'introduction d'une double culture n'a pas forcément été défavorable aux entrées de carbone humifié ;
 - la substitution du colza par une autre culture entraîne une diminution des entrées de carbone humifié ;
 - L'export d'une paille supplémentaire et de la biomasse des couverts engendre une diminution des entrées de carbone humifié ;
 - Le remplacement des fumiers et lisiers par les digestats de méthanisation ne permettent pas de compenser leurs apports de carbone humifié.



L'évolution du stock de carbone étant très variable d'un type de sol à l'autre et d'un système de culture à l'autre, il est donc important d'étudier chaque situation au cas par cas.



Remarque importante

Les résultats présentés dans les cas-types ne sont valables que pour les hypothèses qui ont été formulées, et pour la version de SIMEOS-AMG utilisée pour simuler l'évolution du stock de carbone organique (v1.3). De plus, il existe des incertitudes associées aux paramètres du modèle pour les cultures « innovantes » (CIVE et doubles cultures). Ces résultats doivent donc être associés à leur contexte pour être interprétés.

POUR ALLER PLUS LOIN

Les systèmes testés sur les plateformes du projet Réseau de sites démonstrateurs ont fait l'objet d'une évaluation multicritère. Dans ce guide, seuls les éléments relatifs au carbone sont présentés. L'ensemble des résultats sont présentés dans des guides, librement accessibles depuis le site internet de la démarche [FILABIOM](http://www.agro-transfert-rt.org/filabiom/).

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



Partie 2 : Aide au choix pour concilier exportation de biomasse et stockage de carbone

En fonction du système, de ses niveaux de rendement et du type de sol sur lequel il est implanté, les évolutions du stock de carbone du sol peuvent être très différentes. Chaque contexte est différent et tous ne peuvent être représentés ici.

L'objectif de cette partie est d'apporter des réponses concrètes aux questions qui peuvent se poser quand on souhaite modifier sa rotation pour produire des CIVE ou des doubles cultures, c'est-à-dire augmenter l'exportation de biomasse aérienne de son système de culture, sans dégrader le stock de carbone de son sol.

De manière générale, on voit que les sorties de carbone sont très liées au type de sol et au stock initial. Pour conserver le même stock, les entrées doivent être égales voire supérieures aux sorties de carbone. En effet, **il vaut mieux chercher à maximiser les entrées de carbone qu'à réduire les sorties pour éviter le déstockage** (Chenu et al. 2014).

Il existe plusieurs façons de produire de la biomasse dans un système de culture :

- ① Sans modifier la rotation (ou à la marge) : utiliser les intercultures pour produire des CIVE, exporter les co-produits, valoriser une culture fourragère en non-alimentaire
- ② En modifiant la rotation : remplacer une culture alimentaire/fourragère par une autre culture pour en exporter toute la biomasse aérienne. Il s'agit des doubles culture biomasse.

En fonction de la modification envisagée aux travers de ces différents leviers, différentes questions peuvent se poser. Elles sont traitées dans la partie suivante pour apporter des clés de réussites.



Comment lire les résultats suivants ?

Afin de chercher à maximiser les entrées de carbone, nous allons apprendre à mieux connaître les entrées de carbone humifié de différentes cultures. Ces contributions possibles seront présentées au travers d'un graphique des entrées de carbone humifié pour différentes catégories de culture.

Vous avez dit « *carbone humifié* » ?

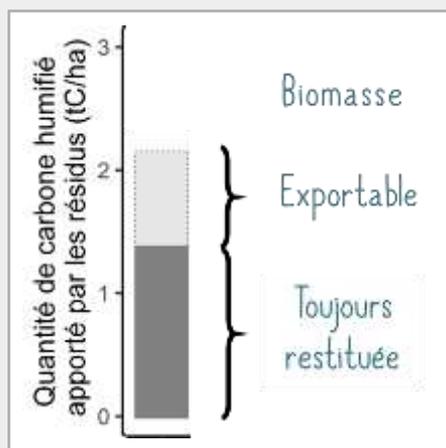
Le carbone dit humifié est issu de la décomposition des résidus de culture par la biomasse microbienne du sol. Il s'agit du carbone de l'humus réellement stabilisé dans la matière organique du sol (Duparque et al. 2007). Le taux d'humification peut être déterminé au laboratoire, en réalisant une incubation dans les conditions contrôlées, afin de mesurer la quantité de carbone du résidu se retrouvant dans la matière organique. Ceci est conditionné par les caractéristiques physico-chimiques du résidu, notamment son rapport C/N. La quantité de carbone humifié pour une culture donnée peut-être calculée de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Carbone humifié} &= \text{Biomasse restituée} \\ &\times \text{teneur en carbone} \\ &\times \text{coefficient d'humification} \end{aligned}$$

Lire les graphiques des entrées de carbone humifié

Dans les graphiques présentés dans la suite de ce guide, le carbone humifié sera représenté, pour différentes cultures, pour deux types de biomasse restituée :

- ① **Celle toujours restituée** : racines et chaumes pour la plupart des cultures et feuilles pour les betteraves
- ① **Celle exportable** : les pailles ou la biomasse aérienne des couverts d'interculture



Les quantités de biomasse exportées choisies comme hypothèses sont précisées dans le Tableau 8. Elles ont été établies sur la base de la méthode présentée dans la première partie de ce guide **en considérant les potentiels de rendement pour un sol de limon moyen profond.**

Tableau 8 : Hypothèses de la quantité de biomasse exportée par culture

Culture	Cive courte	Colza hiver	Blé hiver	Escourgeon	Maïs /sorgho ensilage	Betteraves fourragère/sucrière	Orge de printemps	Pois protéagineux
Biomasse exportée	3	47	96	93	17	93	72	55
Unité	tMS/ha	Qx/ha			tMS/ha	tMB/ha	Qx/ha	

Culture	Triticale plante entière	Raygrass d'italie	Seigle plante entière	Méteil	Blé plante entière
Biomasse exportée	11.2	5.8	11.5	8.5	10
Unité	tMS/ha				

Exporter ses couverts sans déstocker

L'exportation des couverts d'interculture est un levier technique intéressant pour produire de la biomasse sans modifier la rotation. Dans cette partie, nous verrons les conséquences de l'exportation de la biomasse aérienne des couverts sur les entrées de carbone humifié.

Comme tout végétal, la biomasse aérienne des couverts d'interculture contient du carbone. Dans la Figure 14, on note que pour des couverts atteignant une production de biomasse aérienne de 3tMS/ha, la quantité de carbone humifié contenue dans cette biomasse « exportable » est assez importante. Elle est du même ordre de grandeur que les pailles de

céréales (environ 0,5 tC/ha). Les CIVE longues, quant à elles, permettent d'apporter une quantité de carbone humifié importante, de par leur temps d'occupation plus long. Elles vont ainsi avoir le temps de produire une biomasse racinaire importante, presque aussi développée que pour une même espèce menée à maturité.

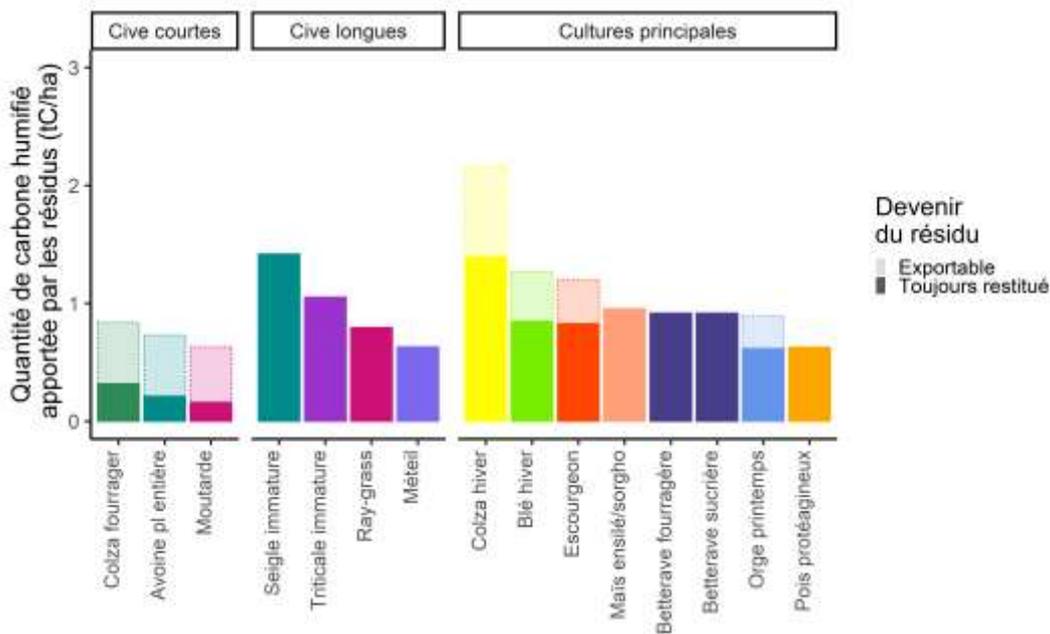


Figure 14 : Quantités de carbone humifié permises par différentes cultures principales et couverts exportés



La restitution d'une paille de céréales supplémentaire dans la rotation permet de compenser, en terme de carbone humifié, ce qui aurait pu être apporté par la biomasse aérienne d'un couvert si celui-ci avait été restitué.



La biomasse aérienne des couverts permet également d'apporter de l'azote, disponible pour la culture de printemps suivante. Sa restitution peut donc permettre de diminuer les apports en engrais minéraux pour les cultures suivantes. On parle alors d'effet « engrais vert » (Constantin J et al. 2017). Selon les mêmes auteurs, la présence de couvert en entrée hiver permet de réduire la quantité d'azote lixivié. **Il donc important de de prendre en compte les impacts à la fois sur le carbone et l'azote pour raisonner le choix entre exporter pailles ou couverts, si la question se présente.**

Double culture : remplacer le bon terme

Un autre levier technique intéressant pour la production de biomasse est l'introduction de doubles cultures dédiées dans la rotation. Les conséquences possibles sur le stockage de carbone de cette modification de la rotation sont présentées dans cette partie.

La Figure 15 nous montre la contribution possible aux entrées de carbone humifiées de différentes céréales immatures, soit la première composante de la double culture dédiée, ainsi que de la deuxième culture, maïs ou sorgho, en comparaison d'autres cultures principales.

On peut y voir que :

- La succession céréale immature et maïs/sorgho peut apporter des quantités de carbone humifié importantes au travers de leurs résidus de culture. C'est le temps d'occupation long qui permet la formation d'une biomasse racinaire importante
- Le colza d'hiver permet les restitutions les plus importantes. Cela explique pourquoi le remplacement du colza dans le système betteravier entraîne une diminution des entrées (Figure 11). A l'inverse, dans le système céréalier, le remplacement de l'escourgeon par la double culture permet des entrées similaires, expliquant les niveaux de stockage identiques dans les deux scénarios *témoin* et *biomasse prioritaire* (Figure 7).

Les résultats présentés sont **valables uniquement pour les quantités de biomasse exportées prises en hypothèses** (Tableau 8), montrant l'importance de garantir la production de biomasse pour atteindre ces résultats.

Afin de garantir le stockage de carbone dans un système où une double culture dédiée sera introduite, il faut donc à la fois :

• Atteindre des niveaux de production de biomasse importantes avec les deux cultures pour garantir des quantités restituées importantes,

• Eviter de remplacer les cultures qui peuvent apporter beaucoup de carbone humifié, telles que le colza.

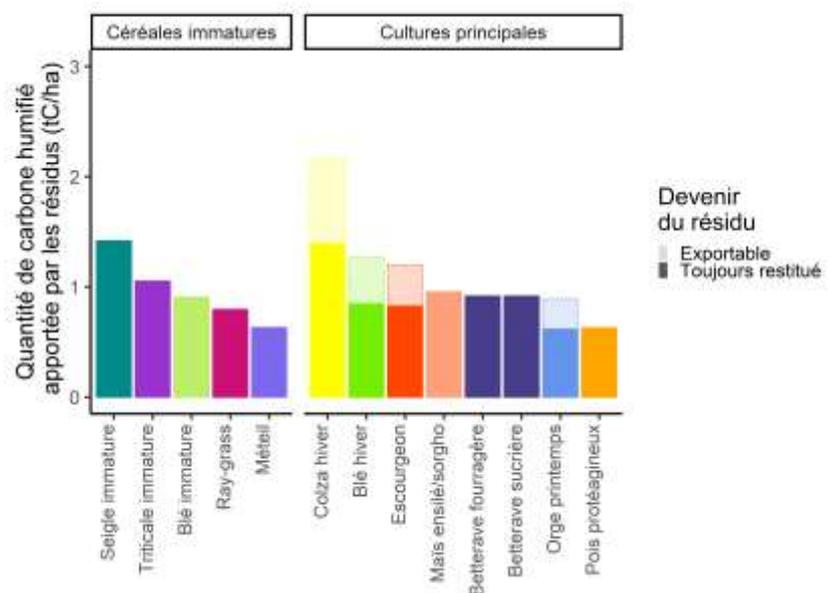


Figure 15 : Quantités de carbone humifié permises par différentes cultures principales et céréales immatures

Focus sur les digestats de méthanisation

Nous avons pu voir dans ce guide que l'exportation importante de biomasse peut-être compatible avec le stockage de carbone. Cependant, dans certains cas, les modifications effectuées sur la rotation et les pratiques peuvent entraîner un stockage moins important. Dans ces cas là, le retour de digestats de méthanisation pourrait permettre de compenser les restitutions moindres. Quelle quantités de carbone attendre des digestats ?

LES DIGESTATS, UN PRODUIT ORGANIQUE VARIABLE

Les digestats peuvent se présenter sous forme brute, directement en sortie de la cuve, ou après séparation de phase sous forme liquide ou solide. Ce digestat est obtenu suite à un processus de digestion anaérobie lors duquel la majorité du carbone est transformé en méthane (CH_4), qui deviendra le biogaz, laissant ce co-produit assez pauvre en matière organique (Doublet et al. 2005). Ce processus dégrade surtout les molécules facilement dégradables, laissant les molécules plus complexes telles que la lignine. La matière organique restant dans le digestat sera donc plus stabilisée, dégradée moins facilement (Reibel and Leclerc 2018).

Les digestats ont par ailleurs une valeur fertilisante intéressante mais très variable. Les teneurs en azote, phosphore et potassium sont *a priori* conservées lors du processus de méthanisation par rapport à la substance entrante. L'azote organique se transforme en azote minéral ammoniacal (Reibel and Leclerc 2018). La composition des digestats est donc très dépendante de la ration du méthaniseur.

Vous avez dit « réglementation d'épandage » ?

Au moment de la rédaction de ce guide, dans les Hauts-de-France, les produits organiques sur dérobées sont à apporter dans la limite de 70kg d'azote efficace par hectare, entre juillet et janvier. L'épandage est possible entre 15 jours avant l'implantation et jusqu'à 20 jours avant sa destruction ou récolte (Chambre d'Agriculture Hauts-de-France 2018).



Les digestats de méthanisation apportent des entrées de carbone humifié supplémentaires là où aucun apport organique n'était présent. Dans l'exemple, leur apport n'est pas aussi important que des fumiers. La dose apportée sur la rotation aura donc un rôle déterminant. Leur introduction dans une rotation, en remplacement de ce produit organique, doit donc être bien étudiée.

QUANTITE DE CARBONE HUMIFIÉ APPORTÉE PAR LES DIGESTATS

La Figure 16 présente les quantités de carbone humifié qui peuvent être apportées par un programme d'épandage composé de 5 digestats bruts ($24 \text{ m}^3/\text{ha}$ par apport) sur 4 ans en comparaison d'un programme composé d'un apport de fumier bovin ($35 \text{ t}/\text{ha}$) et de deux lisiers bovin ($44 \text{ m}^3/\text{ha}$ par apport) également sur 4 ans (cf. cas 3 partie 1). Ces plans d'épandage, respectant la réglementation, sont issus de l'essai système *polyculture-élevage* de la plateforme de Beauvais. Sur ce dispositif expérimental, l'un des objectifs était d'étudier le changement d'orientation du système : usage des effluents d'élevage en méthanisation en contre-partie d'un retour de digestat, à la place d'un épandage direct.

Dans ce cas, les entrées de carbone humifiées sont importantes, grâce au nombre d'apports élevé du digestat, mais un apport unitaire reste moins riche qu'un fumier bovin.

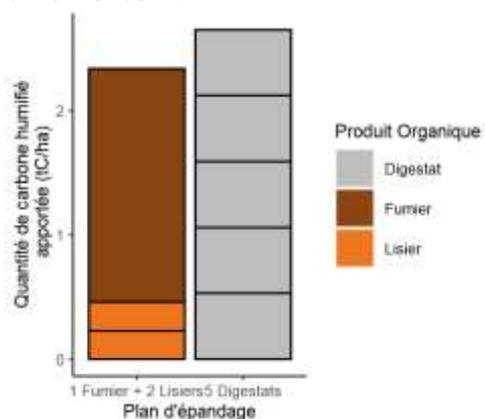


Figure 16 : Quantité de carbone humifié apportée par différents plans d'épandage

Ce que l'on peut retenir !

Pour favoriser le stockage du carbone, il faut **s'assurer que les entrées de carbone humifié sont assez importantes pour compenser les sorties** via la minéralisation.

Les leviers suivants peuvent être utilisés pour maximiser les entrées de carbone dans les systèmes de culture pour la bioéconomie :



- Dans le cas d'une introduction de double culture, **éviter de remplacer les cultures qui peuvent apporter beaucoup de carbone humifié**, telles que le colza.
- Si possible, **favoriser les exports de pailles de céréales aux pailles de colza** qui apportent plus de carbone humifié.
- Si le choix se présente, **préférer les cive longues aux cive courtes** car elles apportent une biomasse racinaire plus importante, d'autant plus si elles sont suivies d'une culture biomasse tel que le maïs ou le sorgho.
- **Le digestat brut apporte du carbone humifié supplémentaire** au système de culture auquel aucun PRO n'est apporté initialement. La plan d'épandage doit être bien étudié pour respecter la réglementation, **mais aussi garantir que les quantités de carbone humifié ne vont pas être trop réduite en cas de remplacement de PRO.**
- **On peut compenser la quantité de carbone exportée via la biomasse aérienne des cive courtes par la restitution d'une paille de céréales supplémentaire dans la rotation**, étant donné que ces deux types de biomasse peuvent rapporter au sol presque autant de carbone.

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

- ADEME. 2013. *Étude Au Champ Des Potentiels Agronomiques, Méthanogènes Et Environnementaux De Cultures Intermédiaires À Vocation Énergétique*.
- Andriulo, Adrian, Bruno Mary, and Jérôme Guerif. 1999. "Modelling Soil Carbon Dynamics with Various Cropping Sequences on the Rolling Pampas." *Agronomie* 19(5):365–77. doi: 10.1051/agro:19990504.
- Arrouays, Dominique, Jérôme Balesdent, J. .. Germon, P. a. Jayet, J. F. Soussana, and P. Stengel. 2002. "Contribution à La Lutte Contre l'effet de Serre: Stocker Du Carbone Dans Les Sols Agricole." *Expertise Scientifique Collective INRA* 332.
- Chambre d'Agriculture Hauts-de-France. 2018. *6eme Programme d'actions de La Directive Nitrates En Hauts-de-France*.
- Chambre d'Agriculture Occitanie. 2011. "Les Matières Organiques Du Sol." Pp. 17–28 in *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon Tome 1*.
- Chenu, C., K. Klumpp, A. Bispo, D. Angers, C. Colnenne, and A. Metay. 2014. "Stocker Du Carbone Dans Les Sols Agricoles : Évaluation de Leviers d'action Pour La France." *Innovations Agronomiques* 37(May 2017):23–37.
- Clivot, Hugues, Jean Christophe Mouny, Annie Duparque, Jean Louis Dinh, Pascal Denoroy, Sabine Houot, Françoise Vertès, Robert Trochard, Alain Bouthier, Stéphanie Sagot, and Bruno Mary. 2019. "Modeling Soil Organic Carbon Evolution in Long-Term Arable Experiments with AMG Model." *Environmental Modelling and Software* 118:99–113. doi: 10.1016/j.envsoft.2019.04.004.
- Constantin J, Beaudoin N, Meyer N, Crignon R, Tribouillois H, Mary B, and 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.
- Doublet, Sylvain, Sylvaine Berger, Christian Couturier, and Blaise Leclerc. 2005. "La Qualité Agronomique Des Digestats." *Echo* 095:3–6.
- Duparque, Annie, Oliver Ancelin, Jacques Duranel, Christian Dersigny, and Laurent Fleutry. 2007. *Sols et Matières Organiques, Mémento Pour Des Notions Utiles et Contre Des Idées Recues*.
- Fardeau, Jean-Claude. 2015. "Des Indicateurs de La Fertilité Des Sols." *Étude et Gestion Des Sols* 22:77–100.
- Hénin, S., and M. Dupuis. 1945. "Essai de Bilan de La Matière Organique Du Sol." *Annales Agronomiques* 19–29.
- Justes, E., B. Mary, and B. Nicolardot. 2009. "Quantifying and Modelling C and N Mineralization Kinetics of Catch Crop Residues in Soil: Parameterization of the Residue Decomposition Module of STICS Model for Mature and Non Mature Residues." *Plant and Soil* 325(1):171–85. doi: 10.1007/s11104-009-9966-4.
- Lemaire, Gilles Joseph, and Bernard Nicolardot. 1997. *Maîtrise de l'azote Dans Les Agrosystèmes*. edited by G. J. Lemaire and B. Nicolardot. Reims: INRA.
- MAAF. 2016. *Une Stratégie Bioéconomie Pour La France*.
- Mary, Bruno, Hugues Clivot, Nicolas Blaszczyk, Jérôme Labreuche, and Fabien Ferchaud. 2020. "Soil Carbon Storage and Mineralization Rates Are Affected by Carbon Inputs Rather than Physical Disturbance: Evidence from a 47-Year Tillage Experiment." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 299:106972. doi: 10.1016/j.agee.2020.106972.
- Pellerin et al. 2019a. *Stocker Du Carbone Dans Les Sols Français : Quel Potentiel Au Regard de l'objectif 4 Pour 1000 et à Quel Cout ? Résumé d'étude*.
- Pellerin et al. 2019b. *Stocker Du Carbone Dans Les Sols Français , Quel Potentiel Au Regard de l'objectif 4 Pour 1000 et à Quel Coût? Synthèse*.
- Reibel, Aurélie, and Blaise Leclerc. 2018. "Valorisation Agricole Des Digestats: Quel Impact Sur Les Cultures, Le Sol et l'environnement ?" *La Méthanisation En Provence-Aples-Côte d'Azur* 63.
- Tavares, Olivia, R. Ballot, C. Loyce, L. Guichard, and Marie-Laure Savouré. 2015. "Paramétrage de l'outil PERSYST En Picardie, Rapport Final (ASSOCULT)."

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

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

Réalisation et rédaction de l'ouvrage

Justine LAMERRE
Agro-Transfert Ressources et Territoires
<http://www.agro-transfert-rt.org/> - 03 64 35 00 13



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

Sophie DECAUX
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Fabien FERCHAUD
INRAE

Charlotte JOURNEL
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Hélène PREUDHOMME
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Lucile GODARD
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Jean-Christophe MOUNY
Agro-Transfert Ressources et Territoires

Annie DUPARQUE
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 :

