



**HAL**  
open science

## Stockage de carbone et cultures intermédiaires à vocation énergétique

Florent Levavasseur, Patrice Kouakou, Julie Constantin, Romain Cresson, Fabien Ferchaud, Romain Girault, Vincent Jean-Baptiste, Hélène Lagrange, Sylvain Marsac, Sylvain Pellerin, et al.

### ► To cite this version:

Florent Levavasseur, Patrice Kouakou, Julie Constantin, Romain Cresson, Fabien Ferchaud, et al.. Stockage de carbone et cultures intermédiaires à vocation énergétique. Bio360 Expo, Feb 2023, Nantes, France. hal-04262852

**HAL Id: hal-04262852**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04262852v1>**

Submitted on 27 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Stockage de carbone et cultures intermédiaires à vocation énergétique

Florent Levavasseur\*, Patrice Kouakou, Julie Constantin, Romain Cresson, Fabien Ferchaud, Romain Girault, Vincent Jean-Baptiste, Hélène Lagrange, Sylvain Marsac, Sylvain Pellerin, Sabine Houot

\* INRAE, UMR ECOSYS, Palaiseau, France



# Contexte

- Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) = potentiel important pour la méthanisation, sans concurrencer directement la production alimentaire
- Conduite de la culture en général intensifiée par rapport à un couvert non récolté pour ↗ production de biomasse : fertilisation, protection phyto, période de culture allongée...
- Possible baisse de rendement des cultures principales suivant CIVE et possible modification des successions de culture pour maximiser l'insertion des CIVE
- CIVE (presque) toujours co-digérées avec d'autres co-produits / déchets

# Contexte

- Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) = potentiel important pour la méthanisation, sans concurrencer directement la production alimentaire
- Conduite de la culture en général intensifiée par rapport à un couvert non récolté pour ↗ production de biomasse : fertilisation, protection phyto, période de culture allongée...
- Possible baisse de rendement des cultures principales suivant CIVE et possible modification des successions de culture pour maximiser l'insertion des CIVE
- CIVE (presque) toujours co-digérées avec d'autres co-produits / déchets

## → Quels effets sur le C du sol ?

C des CIVE extrait sous forme de biogaz

Possible ↘ du rendement des cultures suivant CIVE et entrées C associées

Modification des successions et des restitutions de C

?

C résiduel des CIVE, co-produits et déchets co-digérés

↗ production biomasse et entrées C racinaires

C du digestat + stabilisé

# Plan

## Projet CARBOCIMS

Quelle différence de stockage de carbone entre un système de culture avec CIVE et retour de digestat et un système sans CIVE ni digestat (sol nu ou culture intermédiaire non récoltée) ?

- Sans aucun autre changement des systèmes de culture et pour un méthaniseur théorique 100% CIVE (pas d'import de C)
- Pour une diversité de contextes pédoclimatiques et de systèmes de culture

## Etude sur la méthanisation sans élevage en Ile-de-France

Evaluation des performances agro-environnementales des systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage, y compris stockage de C

- Pour des systèmes de culture et méthaniseurs réels intégrant des changements de culture et une co-digestion (co-produits/déchets industrie agro-alimentaire)
- Conditions franciliennes

Financement



Financement



# Plan

## Projet CARBOCIMS

Quelle différence de stockage de carbone entre un système de culture avec CIVE et retour de digestat et un système sans CIVE ni digestat (sol nu ou culture intermédiaire non récoltée) ?

- Sans aucun autre changement des systèmes de culture et pour un méthaniseur théorique 100% CIVE (pas d'import de C)
- Pour une diversité de contextes pédoclimatiques et de systèmes de culture

## Etude sur la méthanisation sans élevage en Ile-de-France

Evaluation des performances agro-environnementales des systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage, y compris stockage de C

- Pour des systèmes de culture et méthaniseurs réels intégrant des changements de culture et une co-digestion (co-produits/déchets industrie agro-alimentaire)
- Conditions franciliennes

Financement

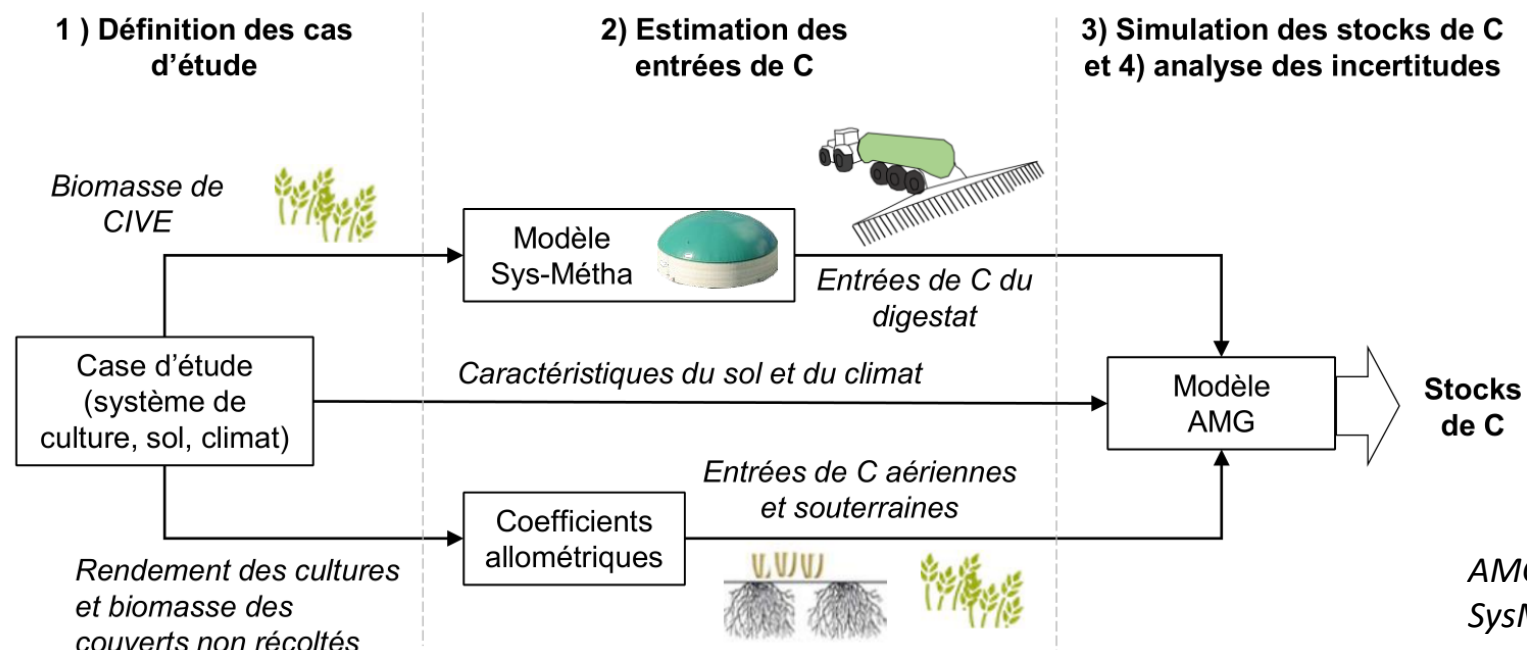


Financement



# Méthodes : approche par modélisation

- 1) Définition de cas types à simuler, avec ou sans CIVE
- 2) Estimation des entrées de C :
  - Par les couverts, résidus de cultures, racines à partir des rendements et de coefficients issus de la littérature
  - Par le digestat grâce au modèle Sys-Métha qui estime le C des CIVE restant après méthanisation
- 3) Simulation de l'évolution des stocks de C avec AMG (0-25 cm à 30 ans)



AMG (Clivot et al., 2019)  
SysMétha (Bareha et al., 2021)

# Méthodes – cas types

## 1) Cas types définis par grande région française, par expertise et/ou enquêtes

- type de sol et propriétés (argile, pH...), climat moyen annuel, rotation et rendements associés, gestion des pailles, travail du sol, irrigation
- deux scénarios de couverts pour une interculture sur la rotation :
  - Sans méthanisation : interculture nue ou couvert non récolté (type et production de biomasse associée)
  - Avec méthanisation : CIVE (type et rendement associé)
- Insertion de la CIVE sans modification de la rotation, mais perte de rendement de la culture suivant CIVE d'hiver pour des rendements de CIVE > 5 t MS/ha



# Méthodes – cas types

## 1) Cas types définis par grande région française, par expertise et/ou enquêtes

- type de sol et propriétés (argile, pH...), climat moyen annuel, rotation et rendements associés, gestion des pailles, travail du sol, irrigation
- deux scénarios de couverts pour **une** interculture sur la rotation :
  - Sans méthanisation : interculture nue ou couvert non récolté (type et production de biomasse associée)
  - Avec méthanisation : CIVE (type et rendement associé)
- Insertion de la CIVE sans modification de la rotation, mais perte de rendement de la culture suivant CIVE d'hiver pour des rendements de CIVE > 5 t MS/ha

*Exemple des cas types définis en Ile-de-France*

ID	Region	Type de sol	Rotation	Couvert scénario de référence	Couvert scénario méthanisation
1	Ile-de-France	Luvisol	Colza – blé – (couv) – maïs grain – blé	Moutarde : 2 t MS ha <sup>-1</sup>	Céréales d'hiver : 10 t MS ha <sup>-1</sup>
2			Colza – blé – orge d'hiver – (couv) – blé	Aucun	Maïs : 6 t MS ha <sup>-1</sup>
3			Colza – blé – orge d'hiver – (couv) – betterave – blé	Moutarde : 2 t MS ha <sup>-1</sup>	Maïs : 6 t MS ha <sup>-1</sup>

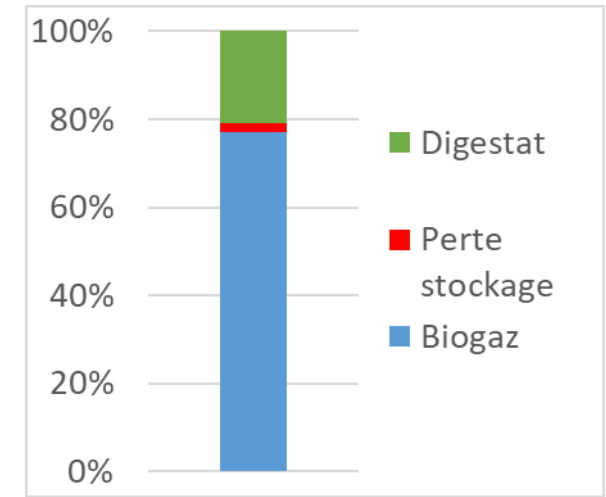
# Méthodes – cas types

ID	Region	Type de sol	Rotation	Couvert scénario de référence	Couvert scénario méthanisation
4	Sud-ouest	Luvisol	(couv) – maïs grain	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha <sup>-1</sup>
5			(couv) – maïs grain – soja	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha <sup>-1</sup>
6		Calcosol	(couv) – tournesol – blé	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha <sup>-1</sup>
7			(couv) – maïs grain – tournesol – blé	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha <sup>-1</sup>
8			Tournesol – orge d'hiver – (couv)	Aucun	Sorgho : 6 t MS ha <sup>-1</sup>
9	Rhône-Alpes	Luvisol	(couv) – maïs grain	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha <sup>-1</sup>
10			(couv) – maïs grain – blé	Moutarde : 2 t MS ha <sup>-1</sup>	Céréales d'hiver : 7 t MS ha <sup>-1</sup>
11			(couv) – maïs grain – soja – blé – orge d'hiver	Moutarde : 2 t MS ha <sup>-1</sup>	Céréales d'hiver : 7 t MS ha <sup>-1</sup>
12	Ouest	Luvisol	(couv) – maïs grain – blé	Moutarde : 2 t MS ha <sup>-1</sup>	Céréales d'hiver : 7 t MS ha <sup>-1</sup>
13			(couv) – maïs grain – orge d'hiver	Moutarde : 2 t MS ha <sup>-1</sup>	Sorgho : 6 t MS ha <sup>-1</sup>

# Méthodes – le carbone du digestat

- Le modèle Sys-Métha prédit qu'environ 20% du C des CIVE reste dans le digestat après méthanisation

→ validation de cet ordre de grandeur sur 11 méthaniseurs de CIVE



*Devenir du C des CIVE modélisé par Sys-Métha (sans séparation de phase)*

# Méthodes – le carbone du digestat

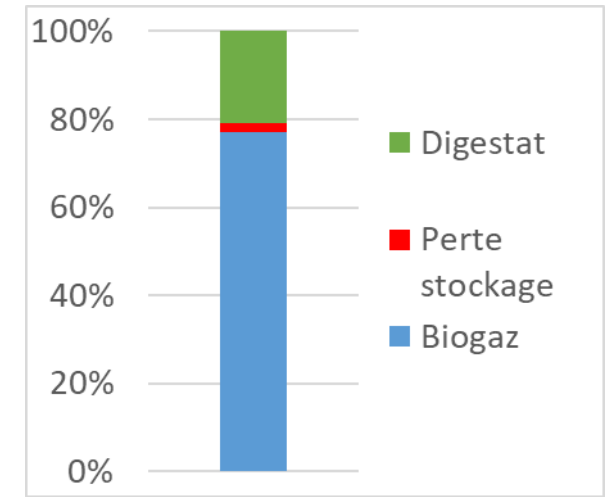
- Le modèle Sys-Métha prédit qu'environ 20% du C des CIVE reste dans le digestat après méthanisation

→ validation de cet ordre de grandeur sur 11 méthaniseurs de CIVE

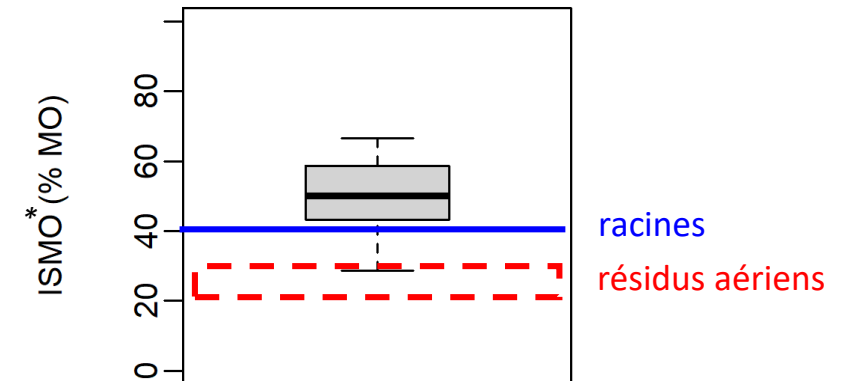
- Au-delà des quantités de C, besoin d'estimer la contribution du C du digestat au C du sol (stabilité du C)

→ échantillonnage et analyse de la stabilité du C de digestats issus de 11 unités de méthanisation de CIVE

→ le C des digestats est plus stable que celui des résidus et racines



*Devenir du C des CIVE modélisé par Sys-Métha (sans séparation de phase)*

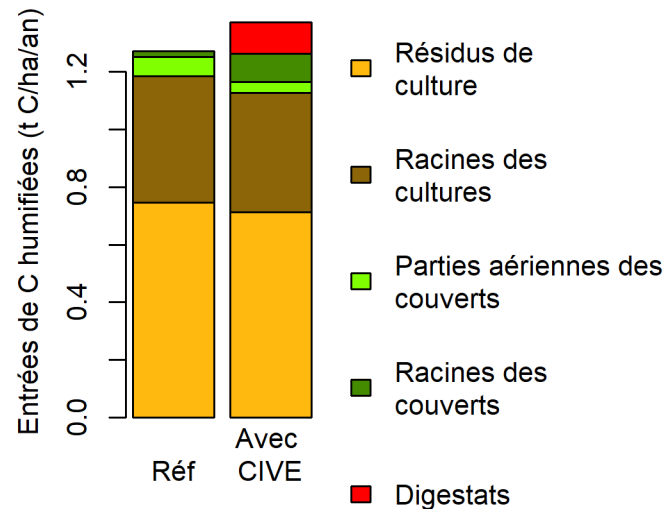


*Stabilité du C des digestats en comparaison à des résidus de culture et des racines*

# Résultats : entrées de C et stockage de C

- Exemple du cas type 1 (Ile-de-France, CIVE d'hiver avant maïs)
- Entrées de C :
  - ↗ entrées C du couvert avec CIVE malgré l'exportation : contribution racinaire et exsudats
  - Légère ↘ des entrées de C des cultures principales (↘ rendement du maïs grain suivant CIVE)
  - Entrées C avec CIVE et digestat > sans CIVE, CIVE sans digestat ≈ sans CIVE

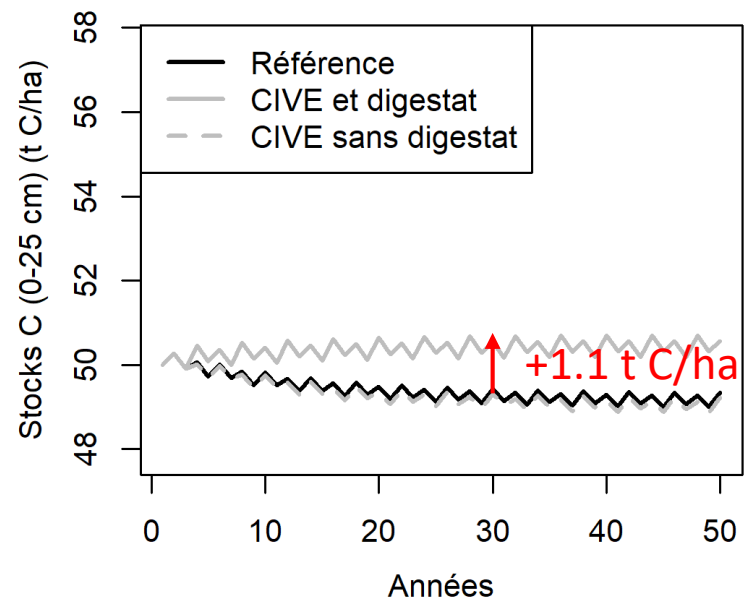
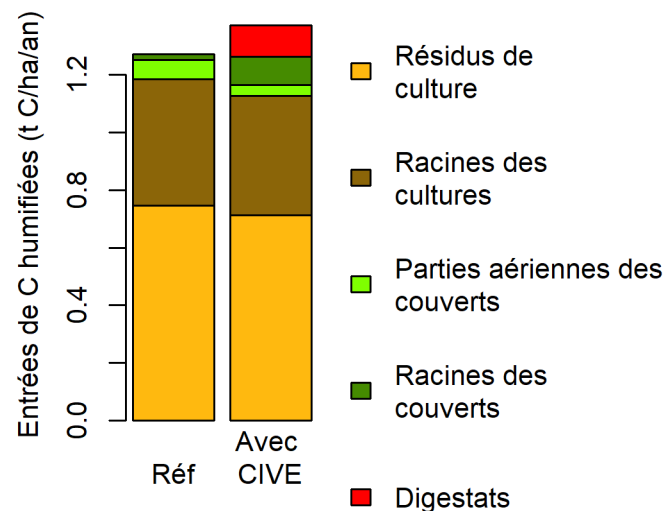
*Entrées de C  
humifiées  
moyennes  
annuelles*



# Résultats : entrées de C et stockage de C

- Exemple du cas type 1 (Ile-de-France, CIVE d'hiver avant maïs)
- Entrées de C :
  - ↗ entrées C du couvert avec CIVE malgré l'exportation : contribution racinaire et exsudats
  - Légère ↘ des entrées de C des cultures principales (↘ rendement du maïs grain suivant CIVE)
  - Entrées C avec CIVE et digestat > sans CIVE, CIVE sans digestat ≈ sans CIVE
- Conséquences sur stocks de C : stock avec CIVE et digestat > stock sans CIVE

*Entrées de C humifiées moyennes annuelles*

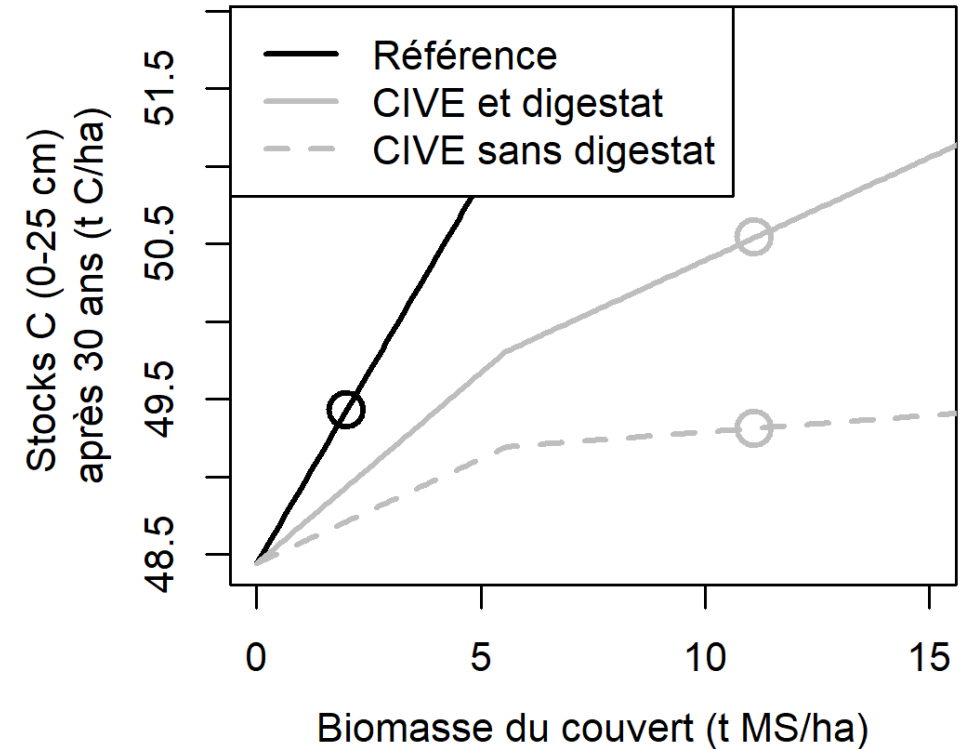


*Evolution des stocks de C au cours du temps, avec ou sans CIVE, avec ou sans digestat*

# Influence des rendements du couvert

- Exemple du cas type 1 (Ile-de-France, CIVE d'hiver avant maïs)
- A rendement identique entre couvert non récolté et CIVE, le stock de C à 30 ans est plus important avec un couvert non récolté
- Mais rendement des CIVE >> rendement des couverts non récoltés :
  - Il faudrait 4.3 t MS/ha de couverts non récoltés pour stocker autant qu'une CIVE d'hiver à 10 t MS/ha
  - Une CIVE d'hiver (avec digestat) stocke plus qu'un couvert non récolté (de 2 t MS/ha) à partir d'un rendement de 3.7 t MS/ha

Stock C à 30 ans (0-25 cm) en fonction du rendement des couverts



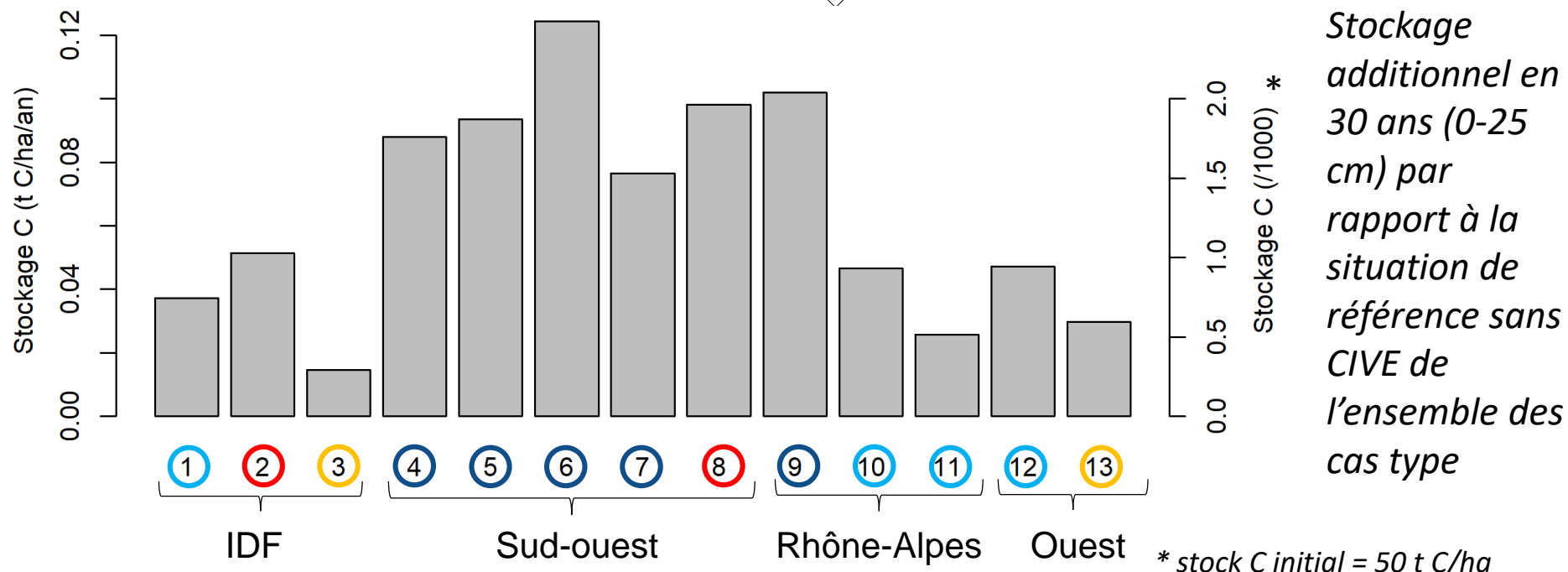
- Rendement référence CIVE hiver = 10 MS/ha récoltés (11 t MS/ha biomasse)
- Rendement référence couvert non récolté = 2 t MS/ha

# Résultats pour l'ensemble des cas types

- Stockage positif pour l'ensemble des cas type (de 0.3‰ à 2.4‰)
- Variable selon les contextes pédoclimatiques, les fréquences et productions de CIVE considérées et la situation sans méthanisation :

1. CIVE hiver remplace sol nu ○
2. CIVE d'été remplace sol nu ○  
ou CIVE hiver remplace couvert non récolté ○
3. CIVE d'été remplace couvert non récolté ○

Diminution du  
stockage (mais  
reste positif)





# Conclusion du projet Carbocims

- A production égale de biomasse, une CIVE (avec retour de digestat) stockerait légèrement moins de C dans les sols qu'un couvert non récolté
- Mais les rendements de CIVE sont supérieurs aux rendements des couverts non récoltés, ce qui amène à un stockage supérieur avec CIVE (encore plus si la CIVE remplace un sol nu)
- Grosse incertitude sur les entrées racinaires des CIVE qui contribuent fortement au stockage
- Incertitudes sur les paramètres du modèle (entrées racinaires, humification du digestat...) ne modifient pas les principales conclusions
- Résultats dépendant de la représentation du C dans AMG, assez robustes aux incertitudes du modèle, mais souhaitable de les confirmer sur le terrain
- Etude à système de culture constant (hormis CIVE). Dans la réalité, des changements possibles (rotation culturale...) et imports déchets extérieurs → effet sur le stockage de C à considérer

# Plan

## Projet CARBOCIMS

Quelle différence de stockage de carbone entre un système de culture avec CIVE et retour de digestat et un système sans CIVE ni digestat (sol nu ou culture intermédiaire non récoltée) ?

- Sans aucun autre changement des systèmes de culture et pour un méthaniseur théorique 100% CIVE (pas d'import de C)
- Pour une diversité de contextes pédoclimatiques et de systèmes de culture

## Etude sur la méthanisation sans élevage en Ile-de-France

Evaluation des performances agro-environnementales des systèmes de culture associés à la méthanisation sans élevage, y compris stockage de C

- Pour des systèmes de culture et méthaniseurs réels intégrant des changements de culture et une co-digestion (co-produits/déchets industrie agro-alimentaire)
- Conditions franciliennes

Financement



Financement



# Méthodes

- Définition de systèmes de culture types par enquête (21 fermes sur 11 méthaniseurs)
- Un scénario principal avant métha et un après défini :

Année	1		2		3	4		5	6	7	8		9	10
Avant métha	CIPAN	Bette-rave	Blé		Blé	CIPAN	Maïs grain	Blé	Colza	Blé	CIPAN	Bette-rave	Blé	Orge h
Après métha	<b>CIVE été</b>	Bette-rave	<b>Orge h</b>	<b>CIVE été</b>	Blé	<b>CIVE hiver</b>	Maïs grain	Blé	Colza	<b>Orge h</b>	<b>CIVE été</b>	Bette-rave	Blé	Orge h

Rendement -20%

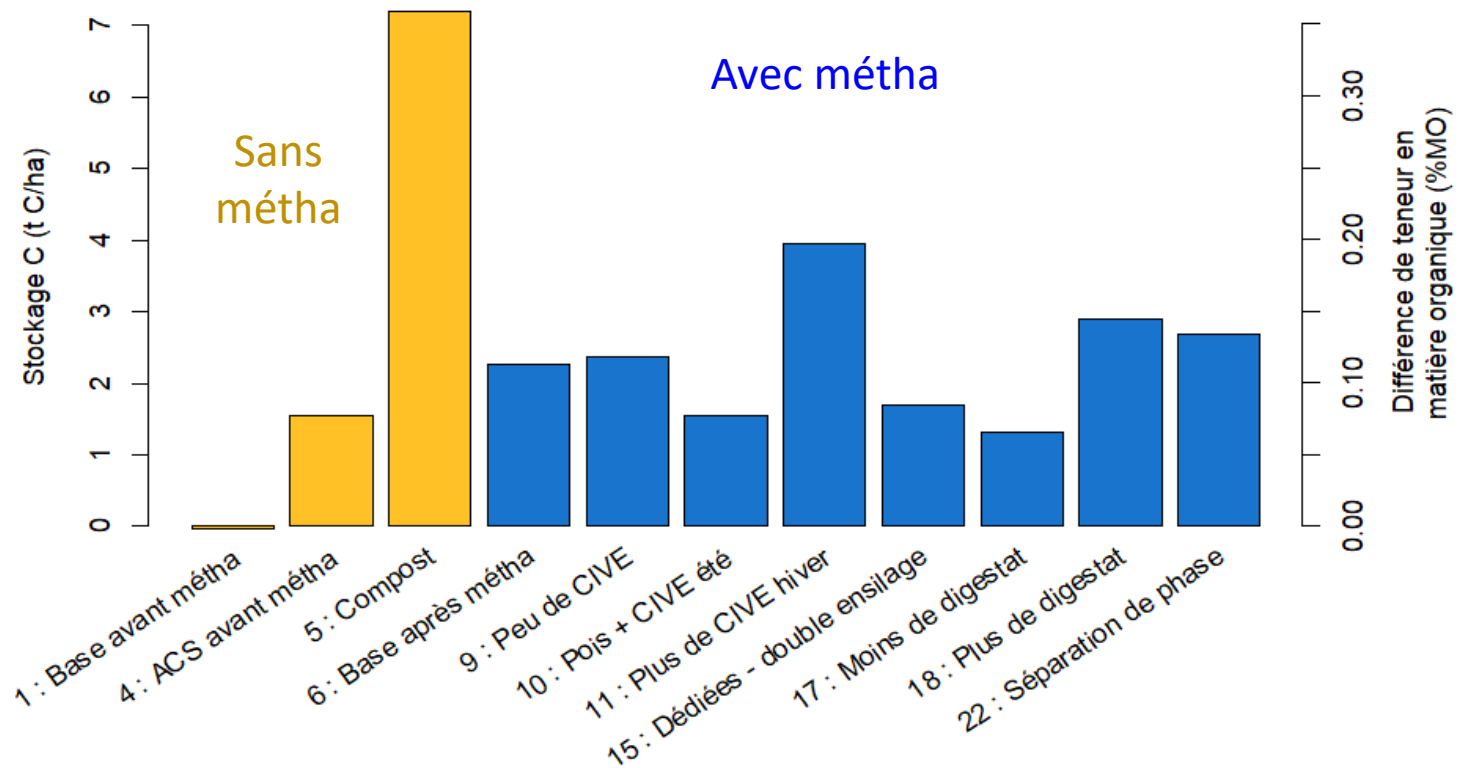
- Des variantes avec +/- de CIVE, +/- digestat, - colza, un peu de cultures dédiées...
- Modélisation des performances agro-environnementales, dont le stockage de C avec le modèle AMG (idem CarboCIMS)

# Résultats

- Tous les systèmes avec CIVE stockent un peu de carbone par rapport à la situation de base sans méthanisation
  - $\approx$  à + de stockage qu'avec ACS
  - Moins de stockage qu'avec des apports de compost de déchets verts ( $2 \times 30$  t/ha sur 10 ans)
  - $\nearrow$  stockage avec  $\nearrow$  fréquence des CIVE et apports de digestat
  - $\searrow$  stockage avec  $\nearrow$  cultures dédiées

*Stockage C et gain teneur en MO après 30 ans*

Stock C initial 0-25cm = 41 t C/ha  
Teneur MO initiale 0-25 cm = 2.03%



# Conclusion

En considérant des scénarios réels de système de culture avant / après méthanisation,

incluant des changements de succession culturales et de rendement ainsi que l'import de déchets / co-produits (et donc de C) dans le méthaniseur,

la modélisation avec AMG indique un stockage de C (limité) dans tous les cas considérés