

JRI
2022



INSA INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON



Impact des Cultures IntermédiaIRES Multi-Service (CIMS) sur le stockage du carbone organique dans les sols agricoles, dans un contexte de méthanisation

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

Avec le soutien de



Introduction

- Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) = potentiel important pour la méthanisation (*Ademe, 2018*), sans concurrencer la production alimentaire
- Interrogation sur les effets agro-environnementaux de l'insertion des CIVE dans les systèmes de culture (*Marsac et al., 2019, Szerencsits et al., 2016*)
- Peu de résultats sur les effets à long terme sur la matière organique des sols :
 - Considérant la diversité des systèmes de culture et des contextes pédoclimatiques français
 - La façon d'insérer les CIVE dans les systèmes et leur potentiel de production
 - Pas forcément de correspondance entre les doses de digestat appliquées et la production de CIVE (bilan non conservatif en C)

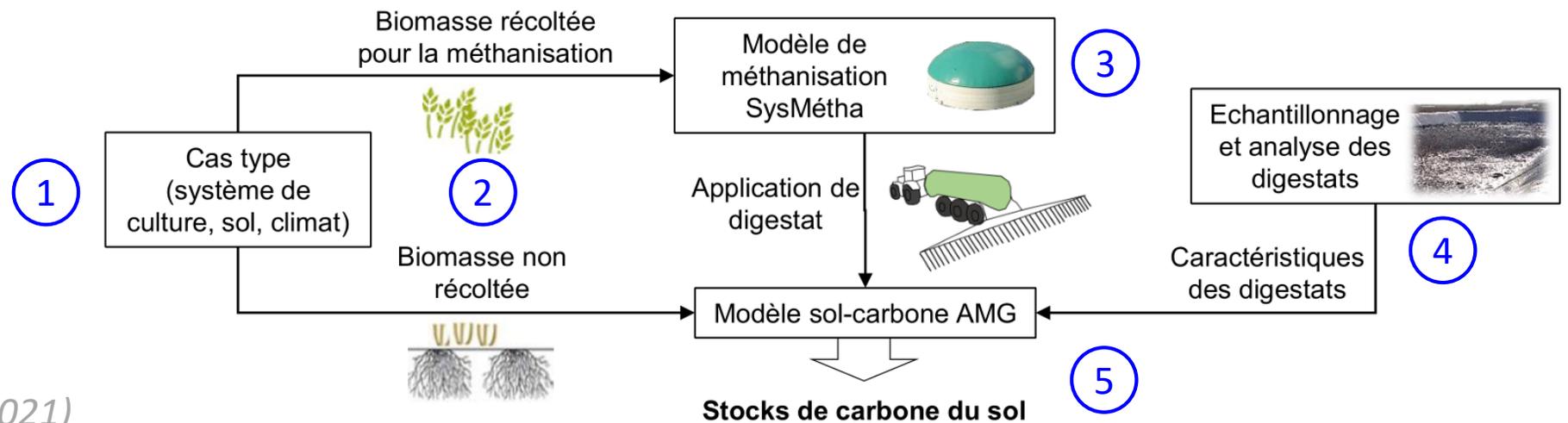
→ Projet CARBOCIMS : Quelle différence de stockage de carbone entre un système de culture avec CIVE ou sans (sol nu ou culture intermédiaire non récoltée) ?



Méthodes : approche par modélisation

- 1) Définition de cas types à simuler, avec ou sans CIVE
- 2) Estimation des biomasses végétales produites dans chaque cas-type
- 3) Conversion de la quantité de carbone de la CIVE en quantité de C de digestat
- 4) Estimation de la « qualité » du C (contribution au C du sol)
- 5) Simulation de l'évolution des stocks de C avec AMG
- 6) Evaluation de la sensibilité des résultats aux rendements des couverts et aux hypothèses de modélisation

Avec le soutien de



AMG (Clivot et al., 2019)

SysMétha (Bareha et al., 2021)

- 1) Cas type défini 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

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-1	Céréales d'hiver : 10 t MS ha ⁻¹
2			Colza – blé – orge d'hiver – (couv) – blé	Aucun	Maïs : 6 t MS ha ⁻¹
3			Colza – blé – orge d'hiver – (couv) – betterave – blé	Moutarde : 2 t MS ha-1	Maïs : 6 t MS ha ⁻¹
4	Sud-ouest	Luvisol	(couv) – maïs grain	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha ⁻¹
5			(couv) – maïs grain – soja	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha ⁻¹
6		Calcosol	(couv) – tournesol – blé	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha ⁻¹
7			(couv) – maïs grain – tournesol – blé	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha ⁻¹
8			Tournesol – orge d'hiver – (couv)	Aucun	Sorgho : 6 t MS ha ⁻¹
9	Rhône-Alpes	Luvisol	(couv) – maïs grain	Aucun	Céréales d'hiver : 7 t MS ha ⁻¹
10			(couv) – maïs grain – blé	Moutarde : 2 t MS ha-1	Céréales d'hiver : 7 t MS ha ⁻¹
11			(couv) – maïs grain – soja – blé – orge d'hiver	Moutarde : 2 t MS ha-1	Céréales d'hiver : 7 t MS ha ⁻¹
12	Ouest	Luvisol	(couv) – maïs grain – blé	Moutarde : 2 t MS ha-1	Céréales d'hiver : 7 t MS ha ⁻¹
13			(couv) – maïs grain – orge d'hiver	Moutarde : 2 t MS ha-1	Sorgho : 6 t MS ha ⁻¹

Méthodes

- 2) Coefficients allométriques associés à AMG pour estimer les parties aériennes non récoltées et racinaires des cultures, couverts non récoltés et CIVE

Ex : 1 t MS/ha maïs CIVE récolté = 0.1 t MS/ha résidus et 0.2 t MS/ha racines + exsudats (0-25 cm)



Avec le soutien de



Méthodes

- 2) Coefficients allométriques associés à AMG pour estimer les parties aériennes non récoltées et racinaires des cultures, couverts non récoltés et CIVE

Ex : 1 t MS/ha maïs CIVE récolté = 0.1 t MS/ha résidus et 0.2 t MS/ha racines + exsudats (0-25 cm)

- 3) Conversion de la quantité de C de la CIVE récoltée en C de digestat :

- Pertes de C (digesteur + stockage) estimées avec Sys-Métha → bilan conservatif du C

Ex : 1 t MS CIVE = 0.44 t C CIVE = 0.08 t C digestat après méthanisation de la CIVE (82% pertes)

- « Validation » du modèle en comparant les teneurs en C du digestat prédites sur 11 méthaniseurs de CIVE par rapport aux teneurs en C mesurés (résultats non montrés)

Avec le soutien de



Méthodes

- 2) Coefficients allométriques associés à AMG pour estimer les parties aériennes non récoltées et racinaires des cultures, couverts non récoltés et CIVE

Ex : 1 t MS/ha maïs CIVE récolté = 0.1 t MS/ha résidus et 0.2 t MS/ha racines + exsudats (0-25 cm)

- 3) Conversion de la quantité de C de la CIVE récoltée en C de digestat :

- Pertes de C (digesteur + stockage) estimées avec Sys-Métha → bilan conservatif du C

Ex : 1 t MS CIVE = 0.44 t C CIVE = 0.08 t C digestat après méthanisation de la CIVE (82% pertes)

- « Validation » du modèle en comparant les teneurs en C du digestat prédites sur 11 méthaniseurs de CIVE par rapport aux teneurs en C mesurés (résultats non montrés)

- 4) Estimer la « qualité » du C (contribution au C du sol)

- Paramètres par défaut du modèle AMG pour les résidus de cultures, couverts et racines
- Analyses en laboratoire (ISMO, incubation) de digestats de CIVE (résultats non montrés)

Ex : 1 t C digestat = 0.51 t C « humifié » dans le sol (coefficient d'humification = 0.51)

Méthodes

- 2) Coefficients allométriques associés à AMG pour estimer les parties aériennes non récoltées et racinaires des cultures, couverts non récoltés et CIVE

Ex : 1 t MS/ha maïs CIVE récolté = 0.1 t MS/ha résidus et 0.2 t MS/ha racines + exsudats (0-25 cm)

- 3) Conversion de la quantité de C de la CIVE récoltée en C de digestat :

– Pertes de C (digesteur + stockage) estimées avec Sys-Métha → bilan conservatif du C

Ex : 1 t MS CIVE = 0.44 t C CIVE = 0.08 t C digestat après méthanisation de la CIVE (82% pertes)

– « Validation » du modèle en comparant les teneurs en C du digestat prédites sur 11 méthaniseurs de CIVE par rapport aux teneurs en C mesurés (résultats non montrés)

- 4) Estimer la « qualité » du C (contribution au C du sol)

– Paramètres par défaut du modèle AMG pour les résidus de cultures, couverts et racines

– Analyses en laboratoire (ISMO, incubation) de digestats de CIVE (résultats non montrés)

Ex : 1 t C digestat = 0.51 t C « humifié » dans le sol (coefficient d'humification = 0.51)

- 5) Simulation de l'évolution des stocks de C avec AMG sur 30 ans (0-25 cm), avec ou sans CIVE et extraction de la différence de stock à 30 ans

Résultats : entrée de C et stockage de C

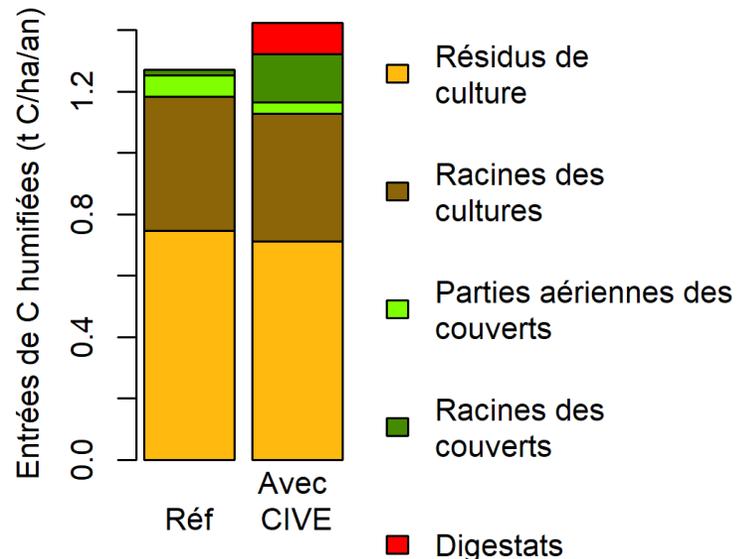
- Exemple du cas type 1 (Ile-de-France, CIVE d'hiver avant maïs)
- Entrées de C :
 - ↗ entrées C du couvert avec CIVE malgré l'exportation : contribution racinaire et exsudats
 - Légère ↘ des entrées de C des cultures principales (↘ rendement du maïs grain suivant CIVE)
 - Entrées C avec CIVE > sans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



Avec le soutien de



*Entrées de C
humifiées
moyennes
annuelles*

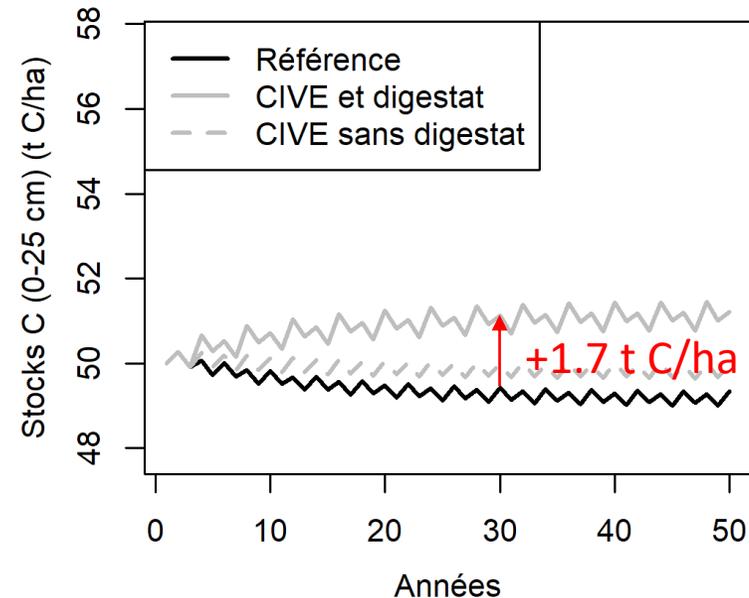
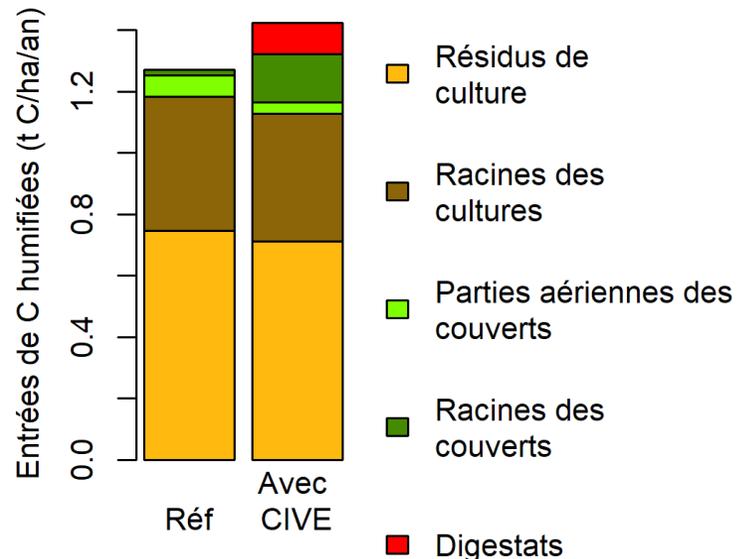


Résultats : entrée de C et stockage de C

- 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 > sans CIVE, même sans retour du digestat
- Conséquences en termes de stocks de C : stock avec CIVE et digestat > stocks avec CIVE sans digestat > stock sans CIVE

Avec le soutien de

*Entrées de C
humifiées
moyennes
annuelles*



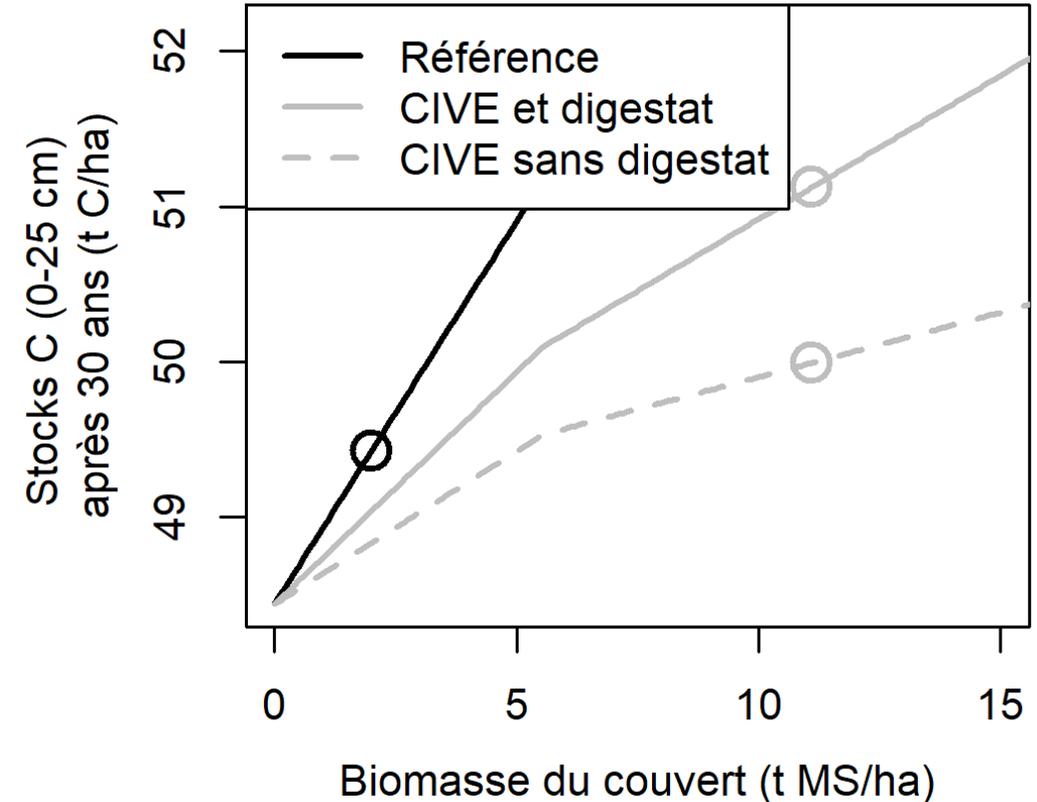
*Evolution des
stocks de C au
cours du temps,
avec ou sans
CIVE, avec ou
sans digestat*

Influence du rendement des couverts

Avec le soutien de

- 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 5.5 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 t MS/ha

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



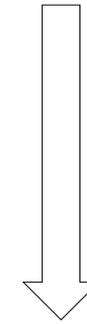
- Rendement référence CIVE hiver = 10 MS/ha récoltés (11 t MS/ha biomasse)
- Rendement référence couvert non récolté = 2 t MS/ha

Résultats pour l'ensemble des cas types

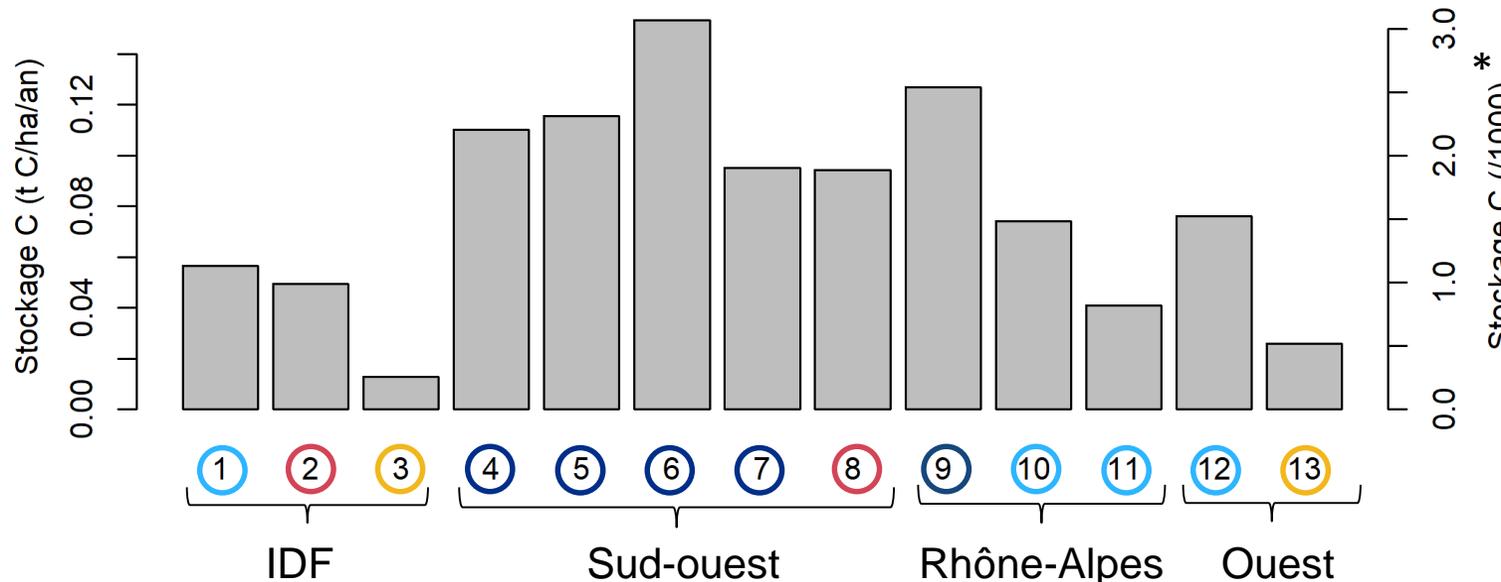
Avec le soutien de

- Stockage positif pour l'ensemble des cas type (de 0.2‰ à 3‰)
- 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)



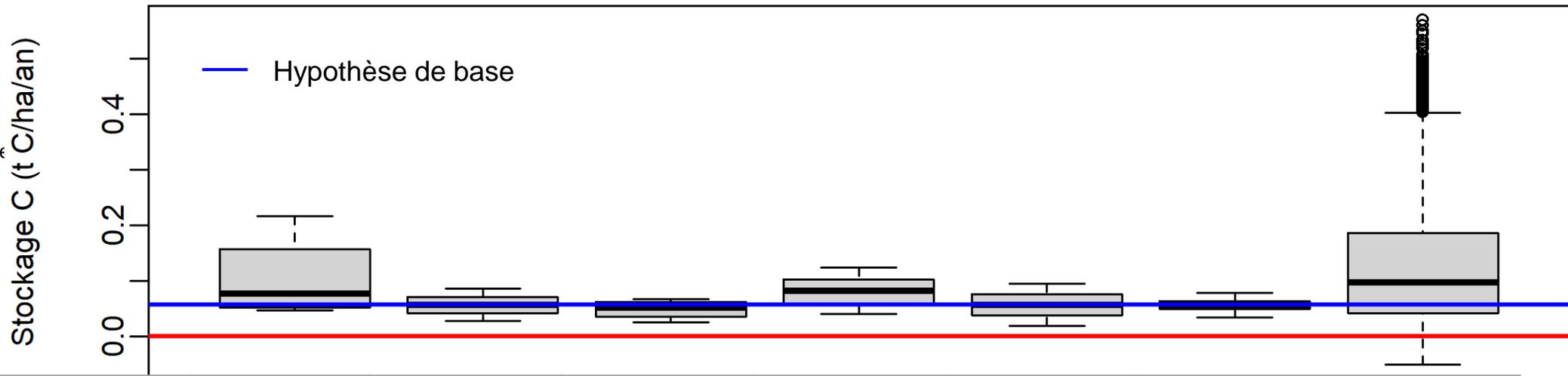
*Stockage additionnel en
30 ans (0-25 cm) par
rapport à la situation de
référence sans CIVE de
l'ensemble des cas type*

* stock C initial = 50 t C/ha

Propagation d'incertitude

- Test de l'effet de l'incertitude / hypothèse de base
- Stockage reste positif pour tous les cas type, sauf en combinant toutes les hypothèses « défavorables » aux CIVE

Variabilité du stockage additionnel en 30 ans par rapport à la situation de référence sans CIVE en fonction des incertitudes (cas type 1)



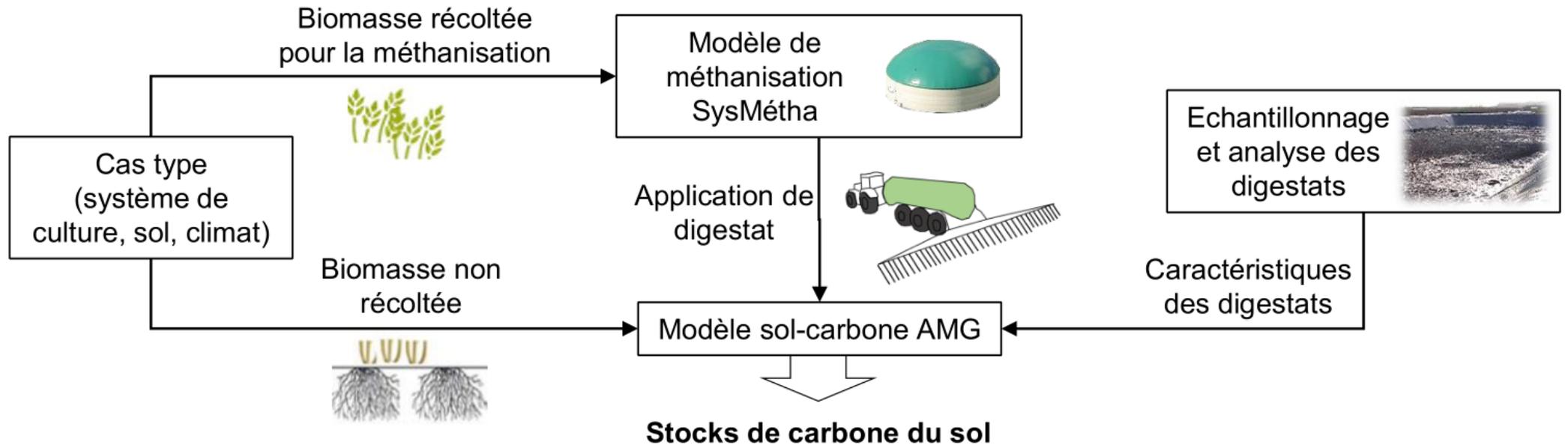
Avec le soutien de

Paramètres	Indice de récolte CIVE	Production racinaire CIVE	↘ rendement culture suivant CIVE h	Perte de C dans la métha	% de digestat retourné sur la parcelle	Coefficient humification digestat	Tous
Min-max	50-95 %	+/-50 % base	10 – 50%	50-90 %	0 – 200%	0.2 – 0.8	-
Hyp base	90 %	-	20%	82%	100%	0.51	-

Conclusion

- 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)
- Résultats assez robustes aux incertitudes, mais souhaitable de les confirmer sur le terrain
- Etude à système de culture constant (hormis CIVE). Dans la réalité, des changements possibles (rotation culturale...) → effet sur le stockage de C à considérer
- Autres effets à étudier (pertes N...) et bilan GES complet à établir

Merci pour votre attention

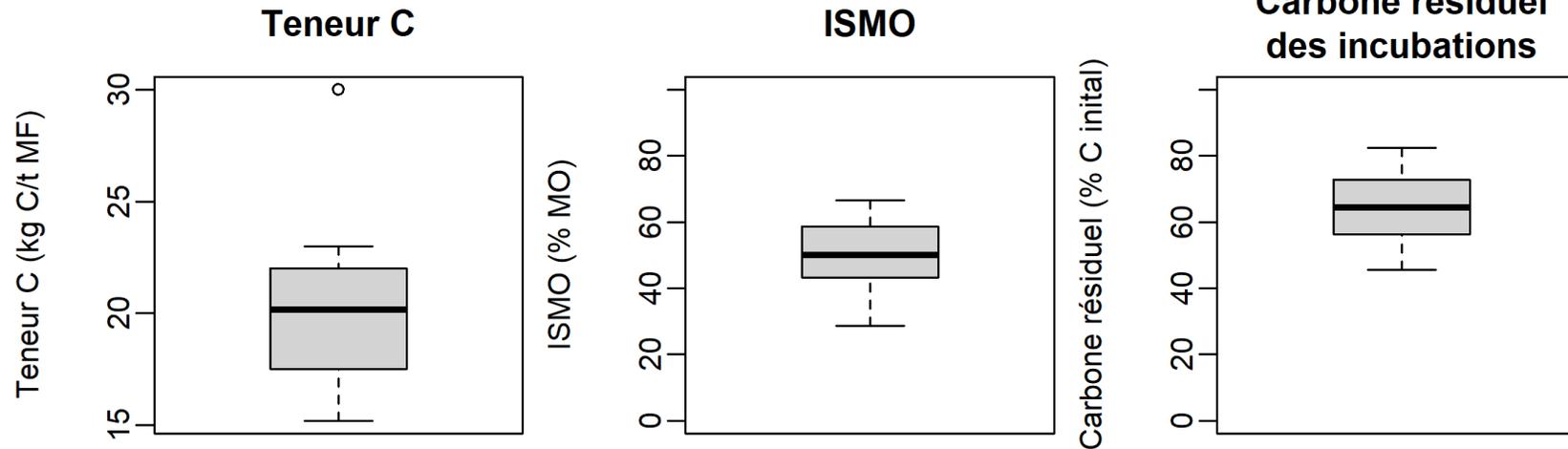


- Etude financée par GRDF
- Certains résultats ont été acquis lors d'une étude pour le ministère de l'Agriculture en Ile-de-France

Caractérisation des digestats

- Echantillonnage dans 11 méthaniseurs de CIVE, sans séparation de phase, proportion de CIVE de 33 à 100% (co-substrats : pulpes de betterave, déchets IAA, biodéchets..., pas d'effluents d'élevage)
- Analyses physico-chimiques classiques (MS, C, N, P, K...)
- Stabilité du C des digestats approchée par deux méthodes :
 - ISMO (*Lashermes et al., 2009*)
 - Suivi de la minéralisation du C lors d'incubations en conditions contrôlées

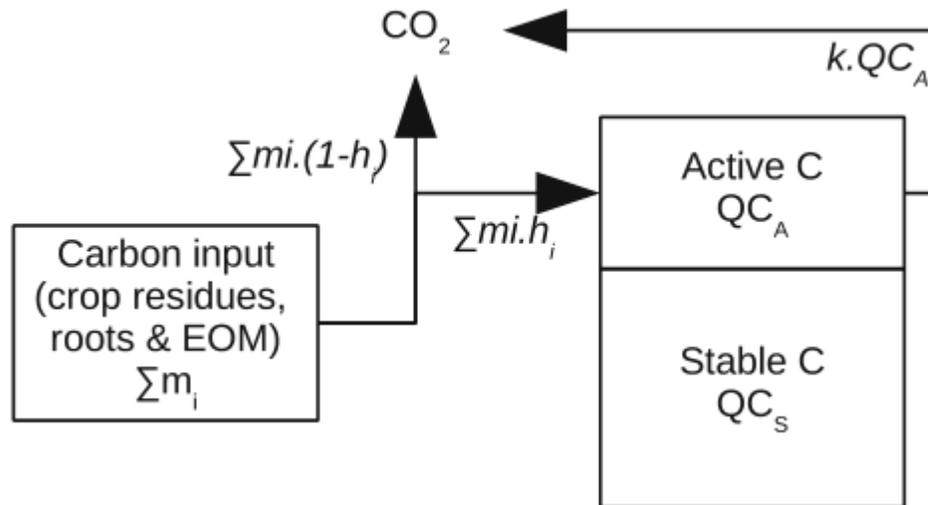
Avec le soutien de



AMG

- Modèle sol-carbone simple, développé à l'INRA depuis 20 ans (*Andriulo et al., 1999*)
- Simule à pas de temps annuel l'évolution des stocks de C du sol en fonction des entrées de C, du climat et du sol
- Trois compartiments de carbone du sol (entrées, actif, stable)
- Performances validées dans de nombreux systèmes de culture et contextes pédoclimatiques (*Clivot et al., 2019*), y compris avec apports organiques (*Levavasseur et al., 2020*)

Avec le soutien de



m masse des entrées de C

h fraction humifiée des entrées de C

k constante de minéralisation de la matière organique du sol (dépend du sol et du climat)

Ca : carbone actif, alimenté par les entrées de C et minéralisé chaque année

Cs : carbone stable, ni alimenté, ni minéralisé

SysMétha *(Baréha et al., 2021)*

- Modèle simple de digestion anaérobie (bilan de masse) prédisant la production de biogaz et de digestat, les caractéristiques du digestat, les émissions gazeuses, basé sur les intrants et les principales caractéristiques du méthaniseur (temps de rétention hydraulique...)
- Bonne prédiction des teneurs en C des digestats de CIVE échantillonnés (32% RRMSE) → « validation » du taux de perte de C lors de la méthanisation des CIVE

