

Insertion de cultures intermédiaires énergétiques dans les systèmes de cultures en France : évaluation multi-échelles du potentiel de production et des impacts eau – azote – carbone.

Camille LAUNAY

Soutenance de thèse le 3 juillet 2023

Encadrement par :

Sabine HOUOT (UMR EcoSys), Julie CONSTANTIN (UMR AGIR) et Vincent JEAN-BAPTISTE (GRDF)



INRAE



GRDF
GAZ RÉSEAU
DISTRIBUTION FRANCE



université
PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE
Agriculture, alimentation,
biologie, environnement,
santé (ABIES)

Contexte et problématique

L'agriculture fait face à de nombreux problèmes environnementaux...

- Chute de la biodiversité (sauvage et cultivée)
- Pollutions diverses
- Dégradation des sols
- Participation au changement climatique
- Dépendance aux énergies fossiles
- Surexploitation de l'eau



Transition agroécologique

Culture intermédiaire: culture implantée entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture principale suivante pendant une période appelée interculture

<https://dicoagroecologie.fr>



CIPAN: Culture Intermédiaire Piège à Nitrate. Culture intermédiaire à croissance rapide non récoltée dont l'objectif est de réduire la lixiviation du nitrate.

Obligatoire dans les zones vulnérables telles que définies dans la Directive Nitrate Européenne depuis 1991.

Services écosystémiques: biens et services que les hommes peuvent tirer des écosystèmes pour assurer leur bien-être

<https://dicoagroecologie.fr>

1

Amélioration
qualité de
l'eau



2

Gestion des
adventices



3

Protection du
sol



4

Biodiversité



5

Fourniture
d'azote



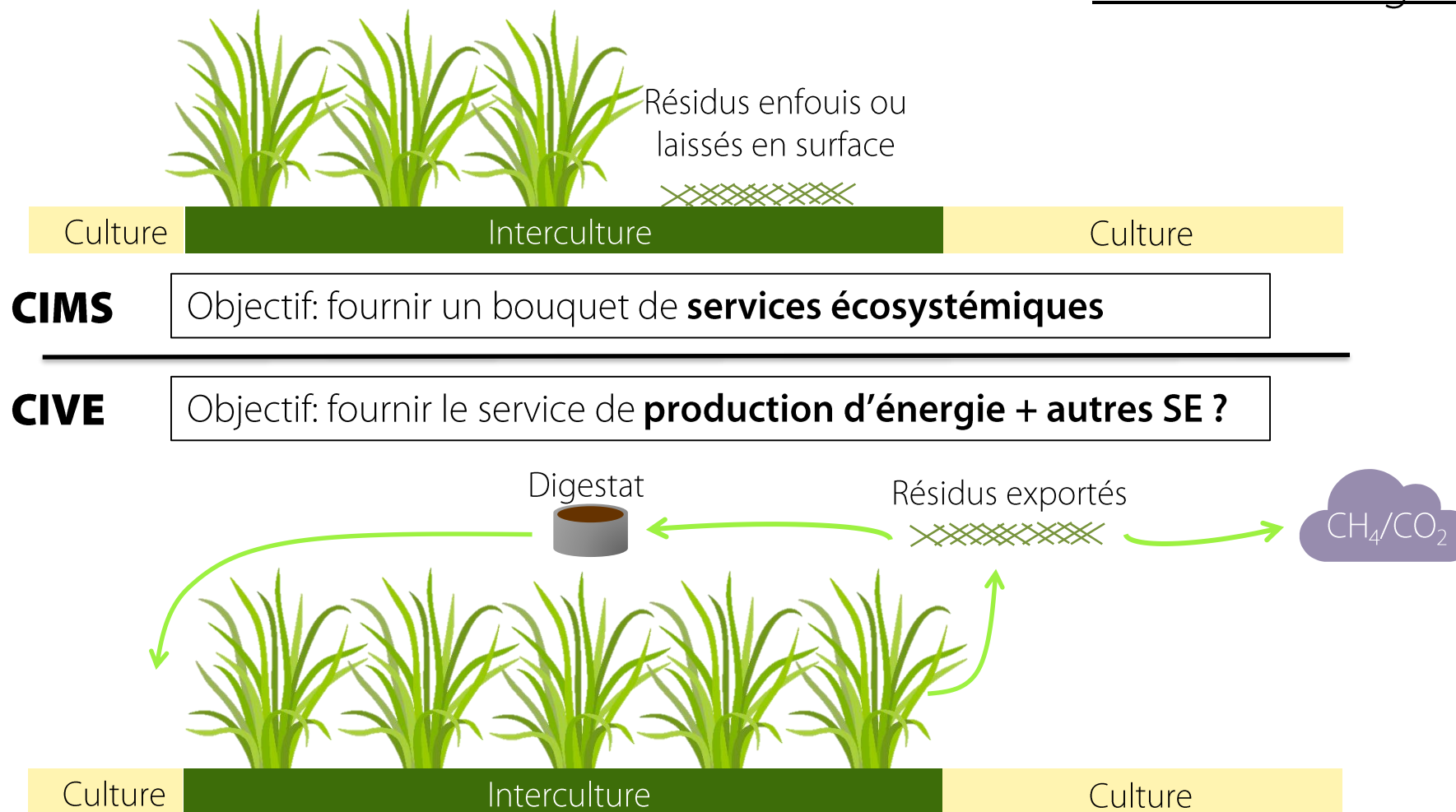
6

Atténuation
du CC



Culture intermédiaire multi-services (CIMS)

versus Culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE)



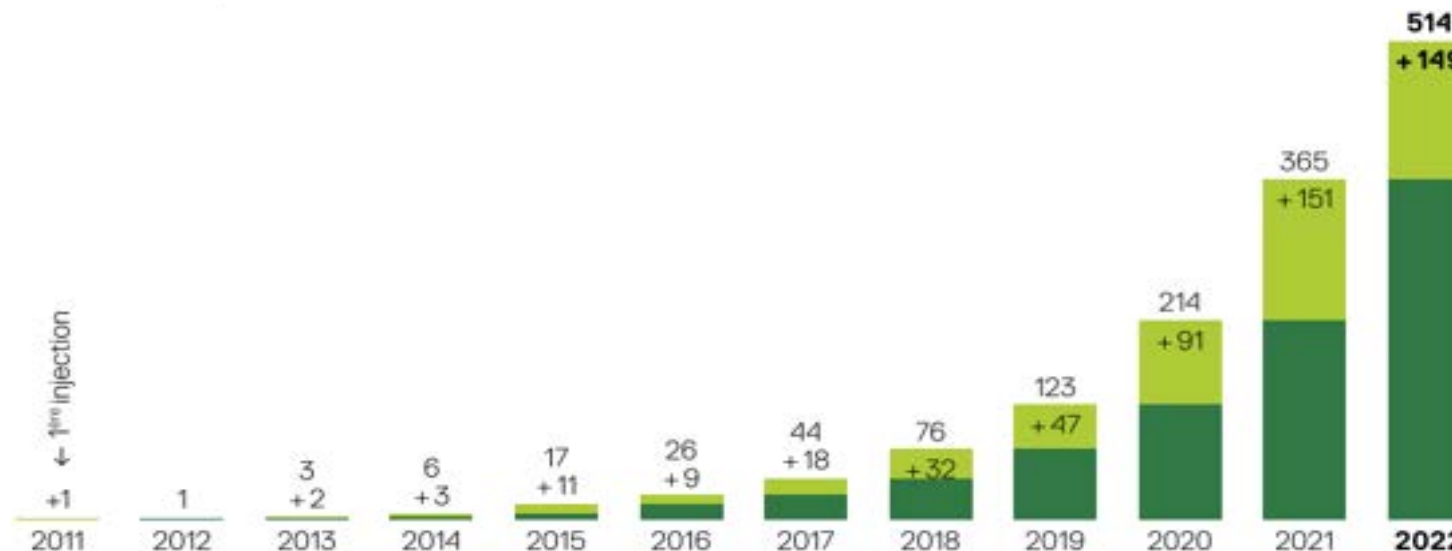
Méthanisation : digestion anaérobie de matières organiques, produit du biogaz et du digestat



<https://bretagne.ademe.fr/retours-dexperience/energies-renouvelables-et-reseaux-de-stockage/methanisation>

Depuis 2011 en France, **croissance rapide** du nombre d'unités en injection :

NOMBRE TOTAL D'INSTALLATIONS EN SERVICE ET ÉVOLUTION ANNUELLE



*Panorama des gaz renouvelables en 2022,
GRDF et al. 2023*

Pour limiter la compétition entre cultures énergétiques et cultures alimentaires, les cultures principales ne peuvent pas dépasser 15% de la ration d'un méthaniseur.

Les CIVEs ne sont pas des cultures principales donc ne sont pas limitées dans la ration.

Définitions fixées par le décret du 4 août 2022.

Agroécologie

Systèmes de production économes en intrants.



Utilisation de la biodiversité et des processus naturels.

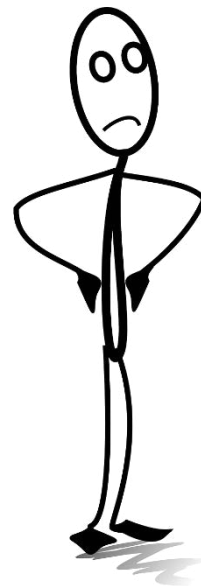


Préservation de l'eau, des sols, etc.



Transition écologique

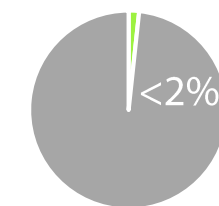
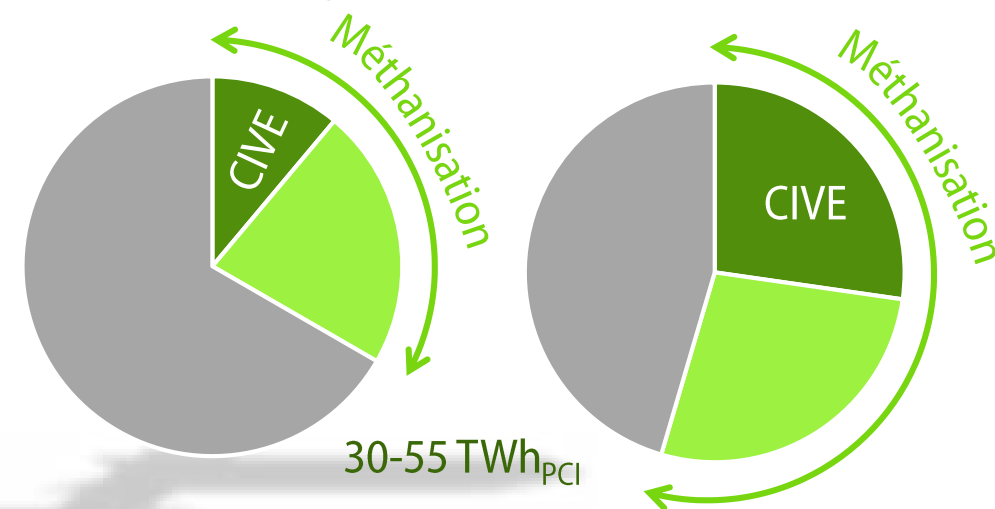
CIVE



Transition énergétique

Substitution du gaz fossile par du gaz renouvelable = **biogaz**

Scénarios de production de gaz renouvelable pour 2050 (ADEME 2018, 2021):



La consommation de gaz en 2022

Problématique

Quel est l'impact environnemental des systèmes de culture incluant des CIVEs avec retour au sol du digestat ?

- 1. Quelle quantité de biomasse et d'énergie pourraient-elles produire en France ?**
 - Où se situe ce potentiel ? Sous quelles conditions ?
- 2. Quels sont les impacts sur les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau ?**
 - Comment se positionnent les CIVEs par rapport aux **autres conduites d'interculture : sol nu, CIPAN et CIMS** ?
 - Quel est leur bilan GES ?
 - Est-ce que la fertilisation des CIVEs augmente les fuites d'azote ?
 - Est-ce que la consommation d'eau des CIVEs diminue la recharge en eau du sol ?
- 3. Quels sont les impacts sur la production alimentaire ?**
 - Est-ce que les CIVEs provoquent des effets dépressifs sur les cultures suivantes ? Sous quelles conditions ?

Services écosystémiques: biens et services que les hommes peuvent tirer des écosystèmes pour assurer leur bien-être

<https://dicoagroecologie.fr>



Revue de la littérature et hypothèses

Agronomy for Sustainable Development (2022) 42:57
<https://doi.org/10.1007/s13593-022-00790-8>

REVIEW ARTICLE



Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review

Camille Launay^{1,2,3}  • Sabine Houot² • Sylvain Frédéric³ • Romain Girault⁴ • Florent Levavasseur² • Sylvain Marsac⁵ • Julie Constantin¹

Accepted: 27 May 2022

© INRAE and Springer-Verlag France SAS, part of Springer Nature 2022

Camille Launay

Soutenance de thèse 03/07/2023

12

Corpus de texte

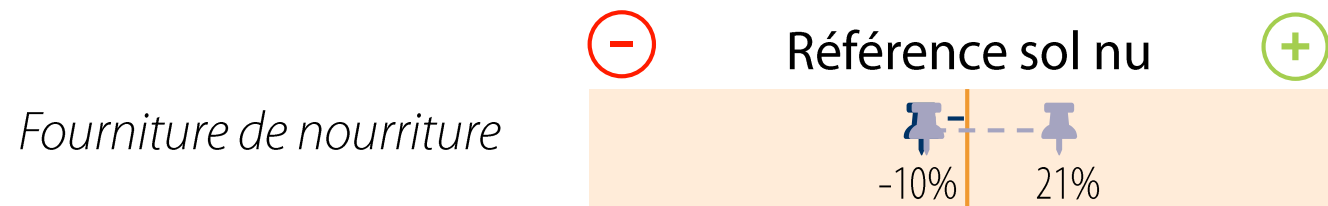
Quel est l'impact environnemental des systèmes de culture incluant des CIVEs ?

Cultures
intermédiaires

CIVE et
digestat
de CIVE
≈ 20 papiers

Digestat

Hypothèses de travail



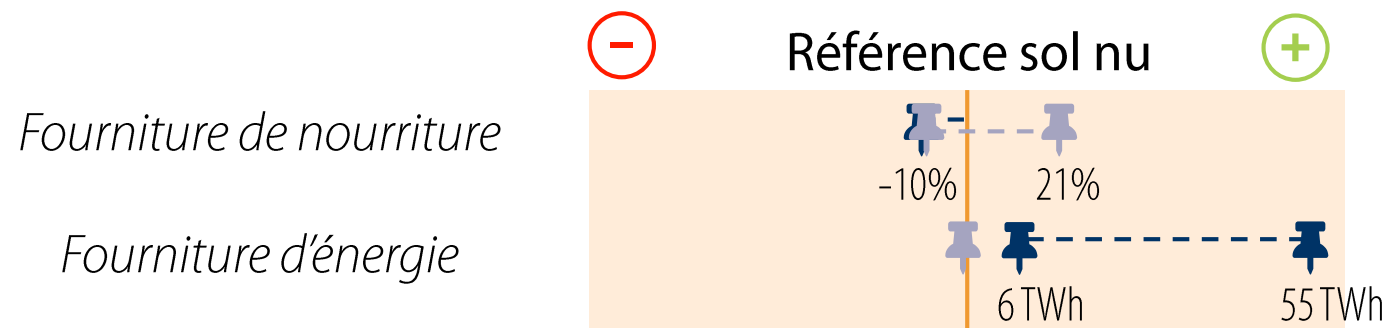
Les CIVEs risquent plus d'impacter négativement le rendement des cultures alimentaires suivantes que les CIMS parce que

- elles sont récoltées tard donc peuvent épuiser les stocks d'N minéral et d'eau du sol pour la culture suivante ; Alonso-Ayuso et al. 2014, Meyer 2020
- les agriculteurs peuvent choisir de retarder le semis de leur culture principale et choisir une variété plus précoce ; Szerencsits 2014, Marsac et al. 2019

 CIVE

 CIMS

Hypothèses de travail



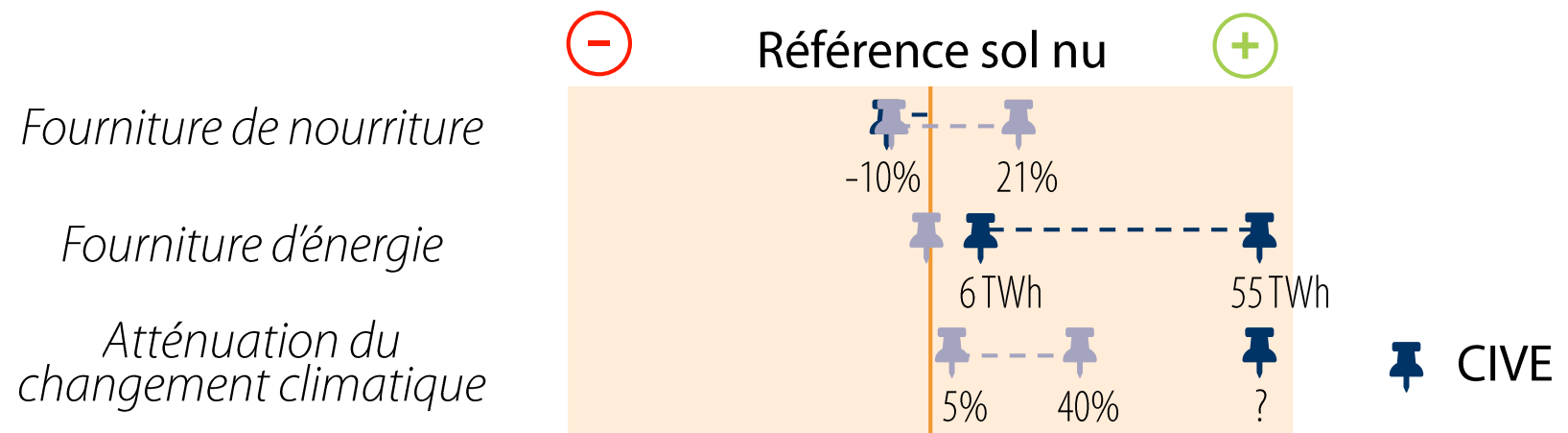
Même si la production de biomasse alimentaire risque de diminuer, la production de biomasse globale semble améliorée ; Heggenstaller et al. 2008, Graß et al. 2013

Cette biomasse supplémentaire est utilisée pour produire de l'énergie tandis que la biomasse des CIMS n'est pas valorisée.

📌 CIVE

📌 CIMS

Hypothèses de travail



Les CIVEs (en comptant le retour au sol du digestat) semblent stocker autant de C dans les sols que les CIMS; Thomsen et al. 2013, Béghin-Tanneau et al. 2019

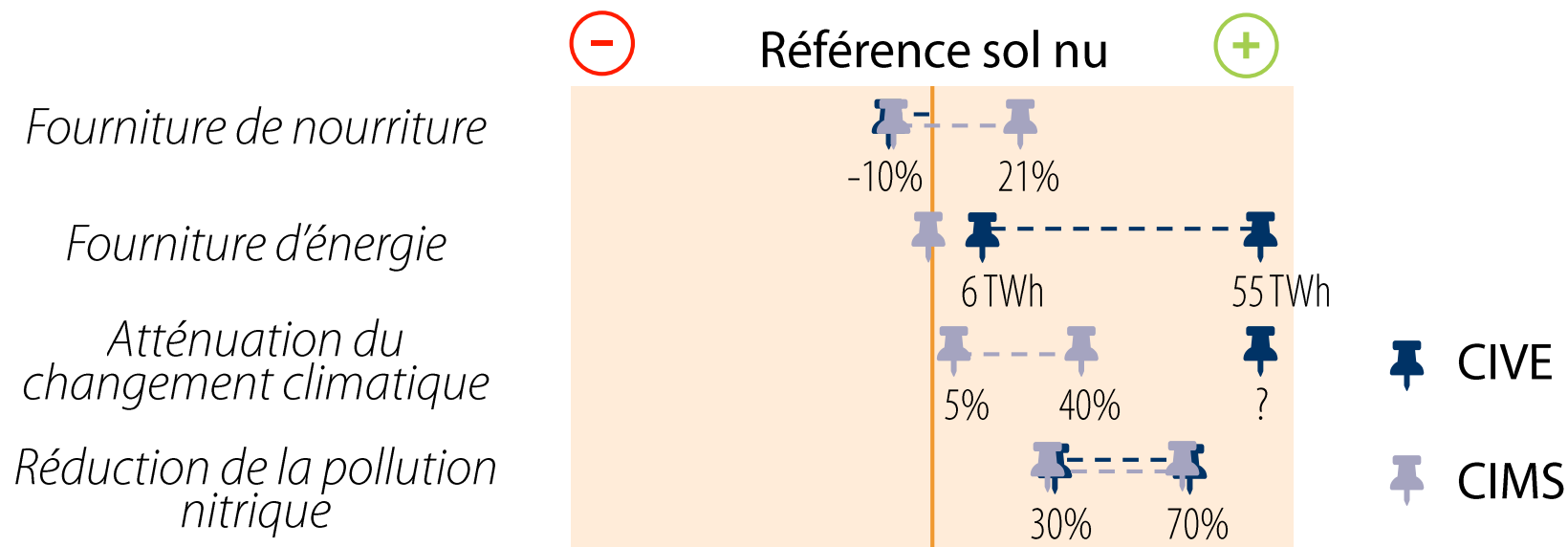
Exporter les résidus de CIVEs et les rapporter sous une forme plus stable semble réduire les émissions de N₂O par rapport à des CIMS laissées sur place; Möller and Stinner 2009, Szerencsits 2014

En ajoutant la substitution du gaz fossile par le biométhane produit par les CIVEs, le bilan GES devrait être meilleur pour celles-ci.

Actualisation 2023

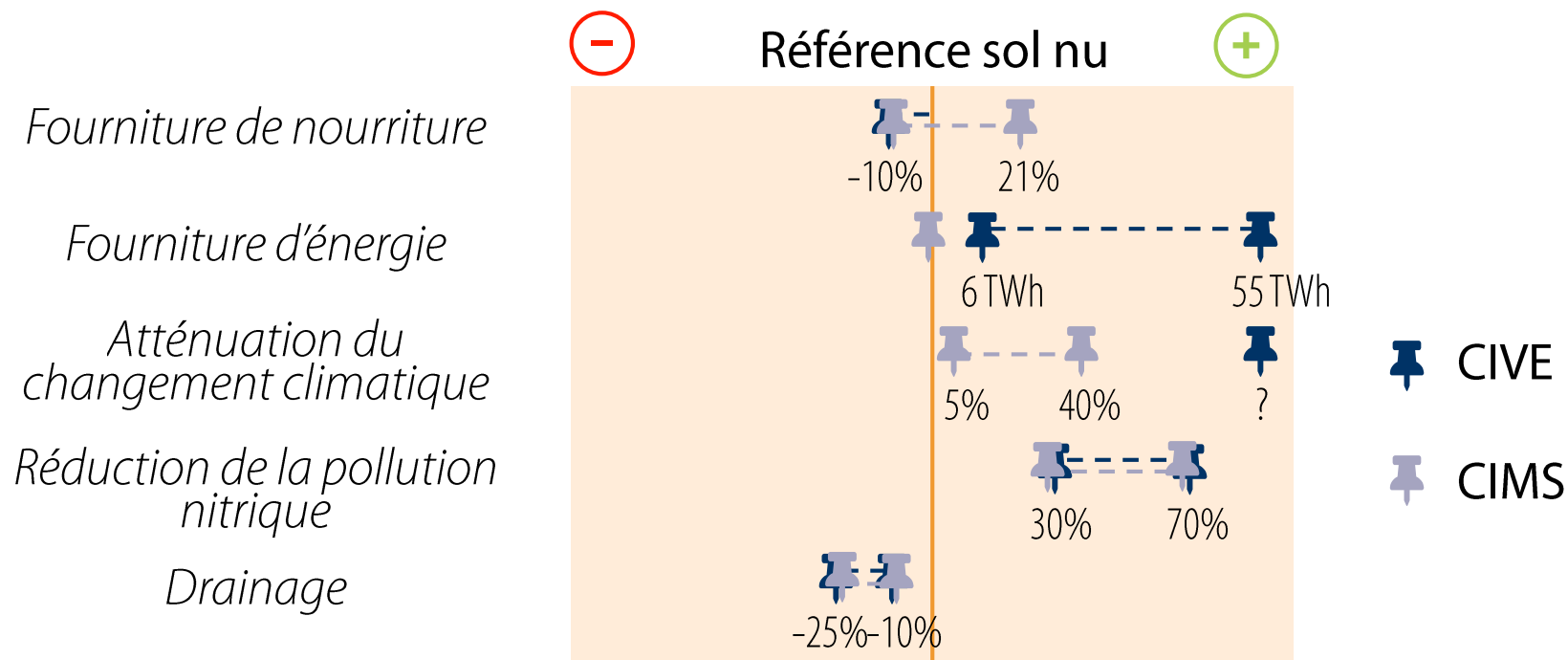
La méthanisation ne permet pas de conserver la même quantité de C stable mais en produisant plus de biomasse que les CIMS, les CIVEs stockent plus de C; Levavasseur et al. 2023

Hypothèses de travail



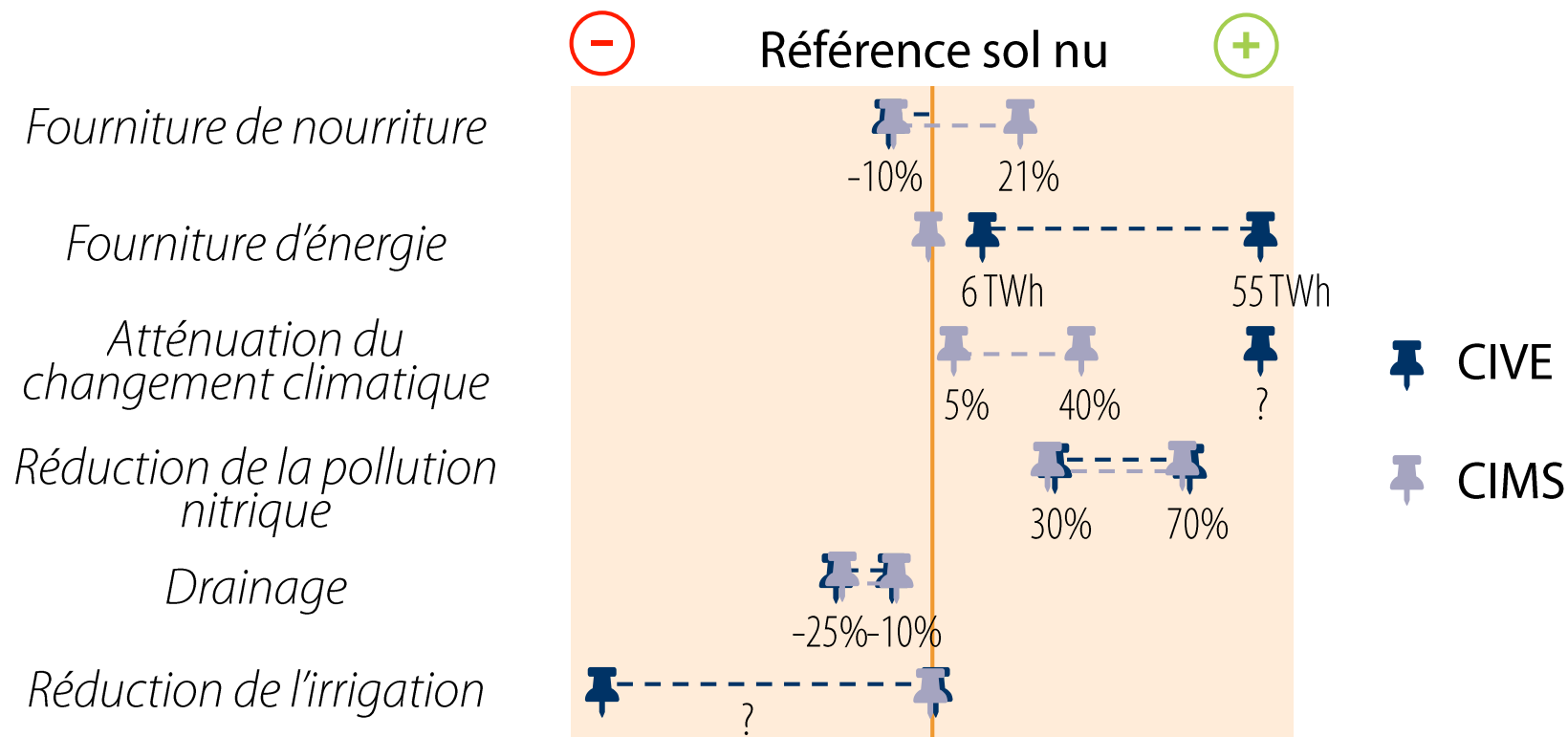
Même fertilisées, les CIVEs semblent réduire la lixiviation du nitrate de la même façon que les CIMS non fertilisées grâce à la production de biomasse plus élevée et à l'export des résidus; Malone et al. 2018, Szerencsits 2014

Hypothèses de travail



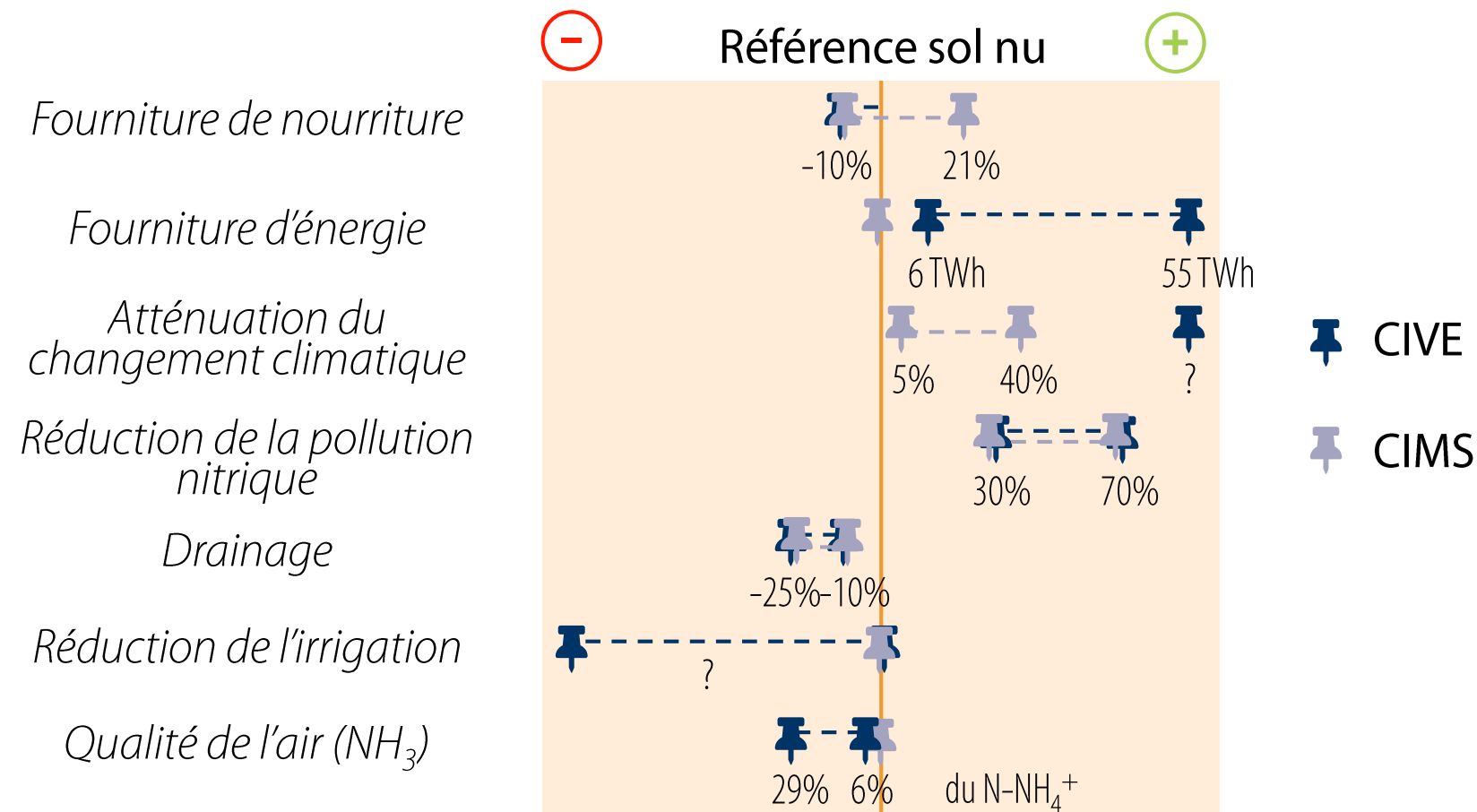
Les CIVEs devraient réduire le drainage (donc potentiellement la recharge en eau des nappes souterraines) de la même façon que les CIMS car la biomasse produite au printemps ne semble pas avoir d'influence conséquente sur ce processus; Meyer et al. 2019

Hypothèses de travail



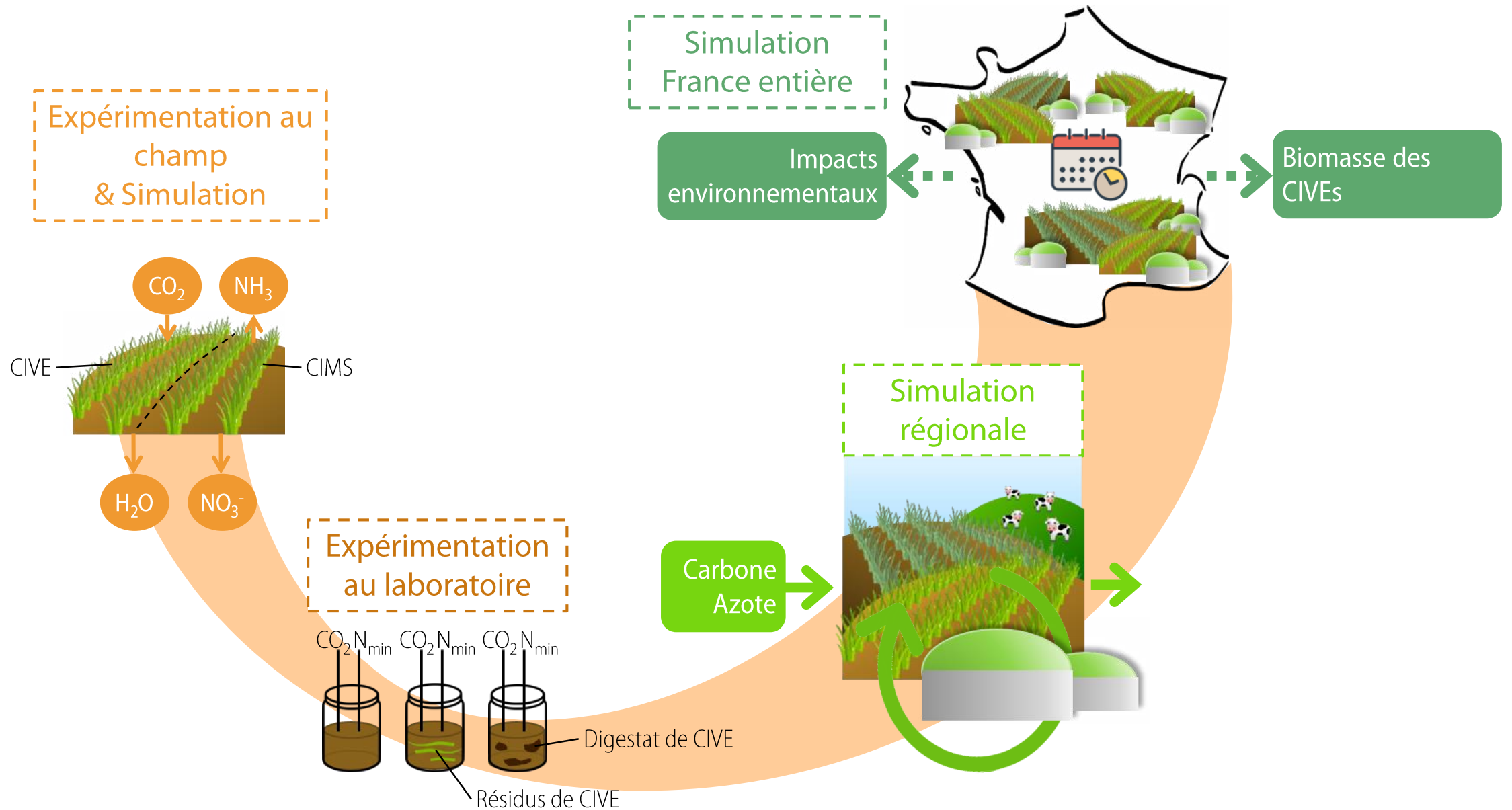
Les CIVEs d'été ont besoin d'eau à une période où celle-ci est rare donc peuvent être irriguées dans les parcelles où c'est possible.

Hypothèses de travail

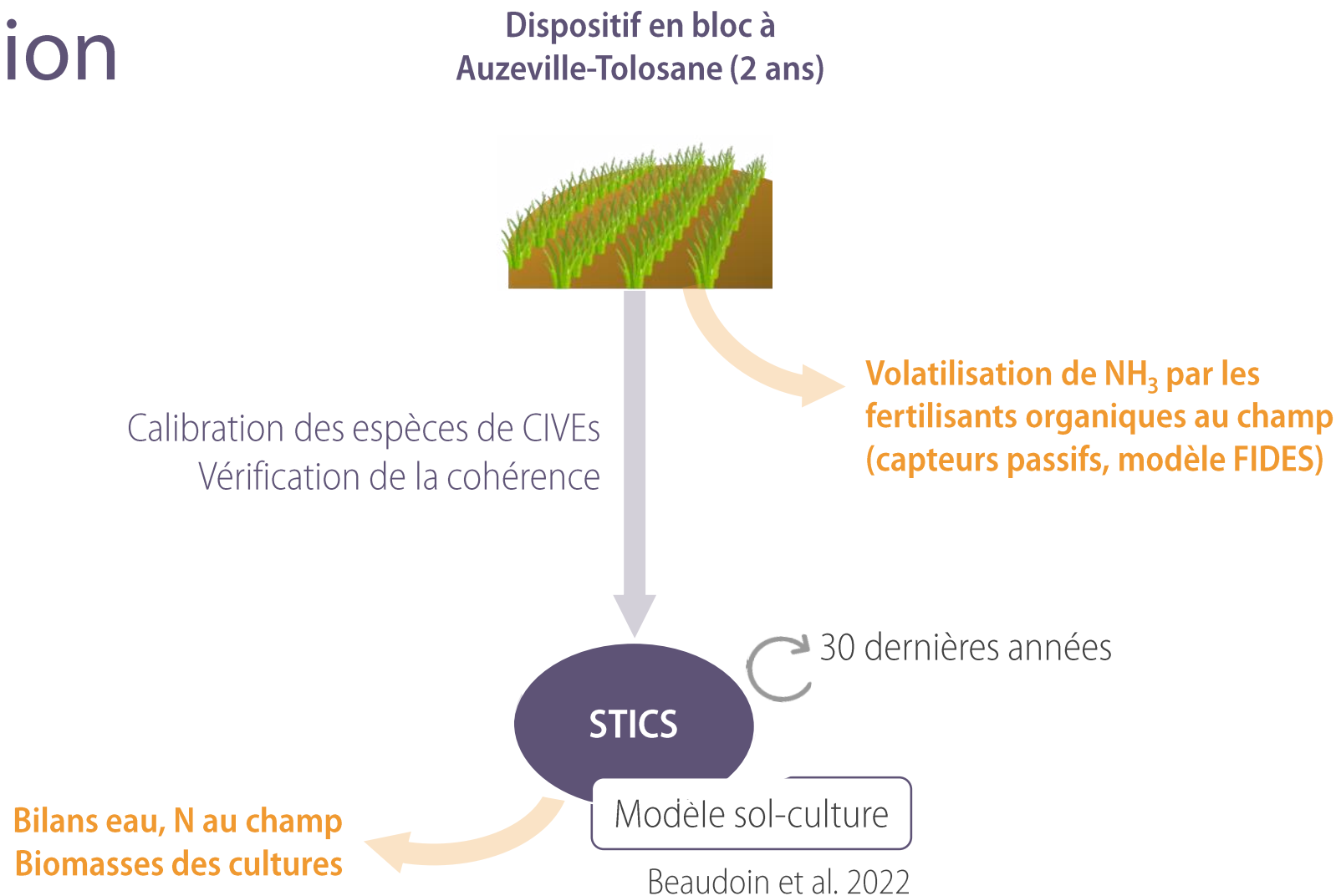


L'augmentation des apports d'N et la transformation des CIVEs en digestat devraient augmenter la volatilisation d'ammoniac; Heggenstaller et al. 2008, Wolf et al. 2014

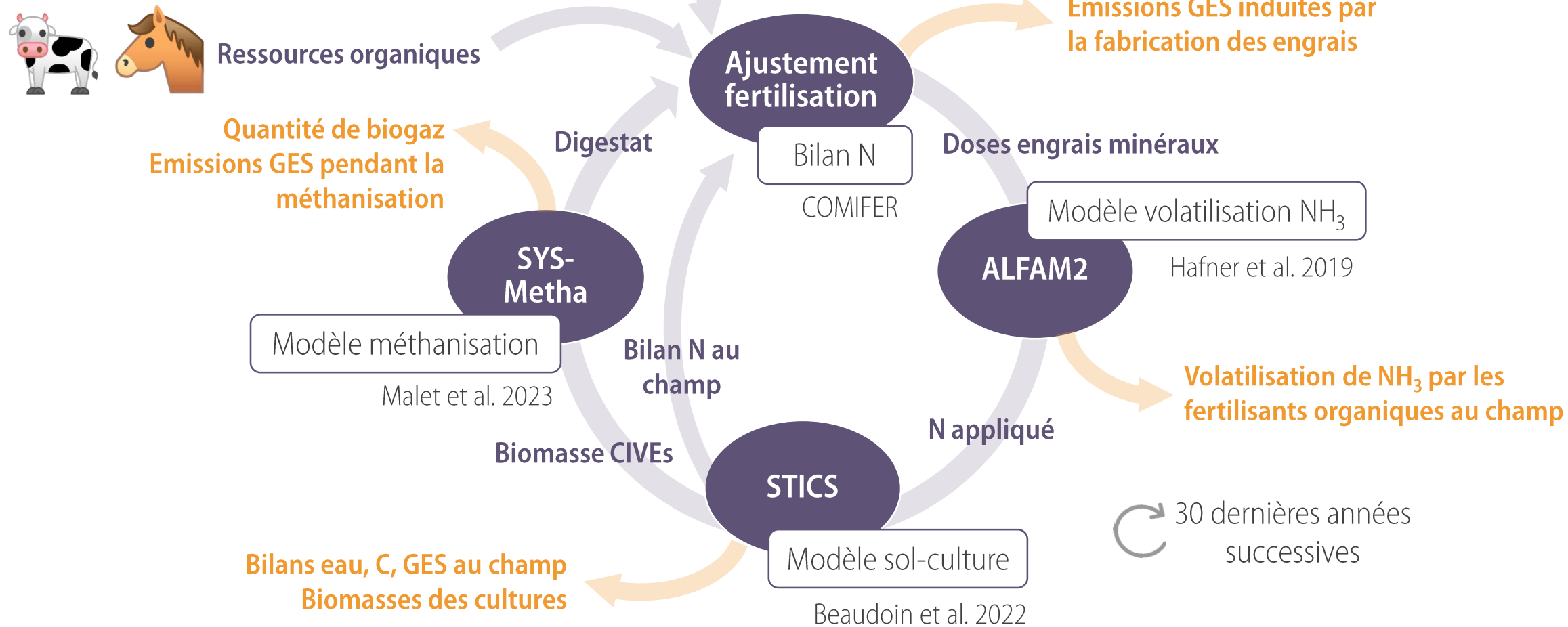
Démarche



Chaine de simulation



Chaine de simulation

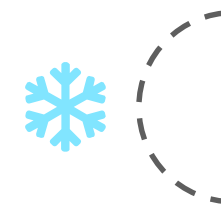


Echelle parcelle

Quels sont les impacts des CIVEs avec le retour de digestat sur les cycles de l'eau et de l'azote sur le court terme ? Sur la production des cultures suivantes ?

Quel est l'impact de la méthanisation des CIVEs sur la quantité de carbone stockée dans le sol ?

Design expérimental



Septembre

Mai

Octobre

Mai

Blé dur

Sol nu

Tournesol

Sol nu

Blé dur

CIPAN



Sol nu

Tournesol

CIPAN



Sol nu

Moutarde blanche

Blé dur

CIMS



Tournesol

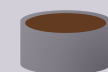
CIMS



Seigle - féverole

Blé dur

CIVE



67 UN

Tournesol

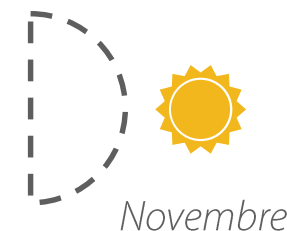
CIVE



75 UN

Seigle - féverole

Design expérimental



Juillet

Novembre

Juillet

Novembre

Blé dur

Sol nu

 Orge
d'hiver 
50 UN

Sol nu

Blé dur

 CIMS

Sorgho - vesce

 Orge
d'hiver 
50 UN
CIMS 

Blé dur



CIVE

55 UN

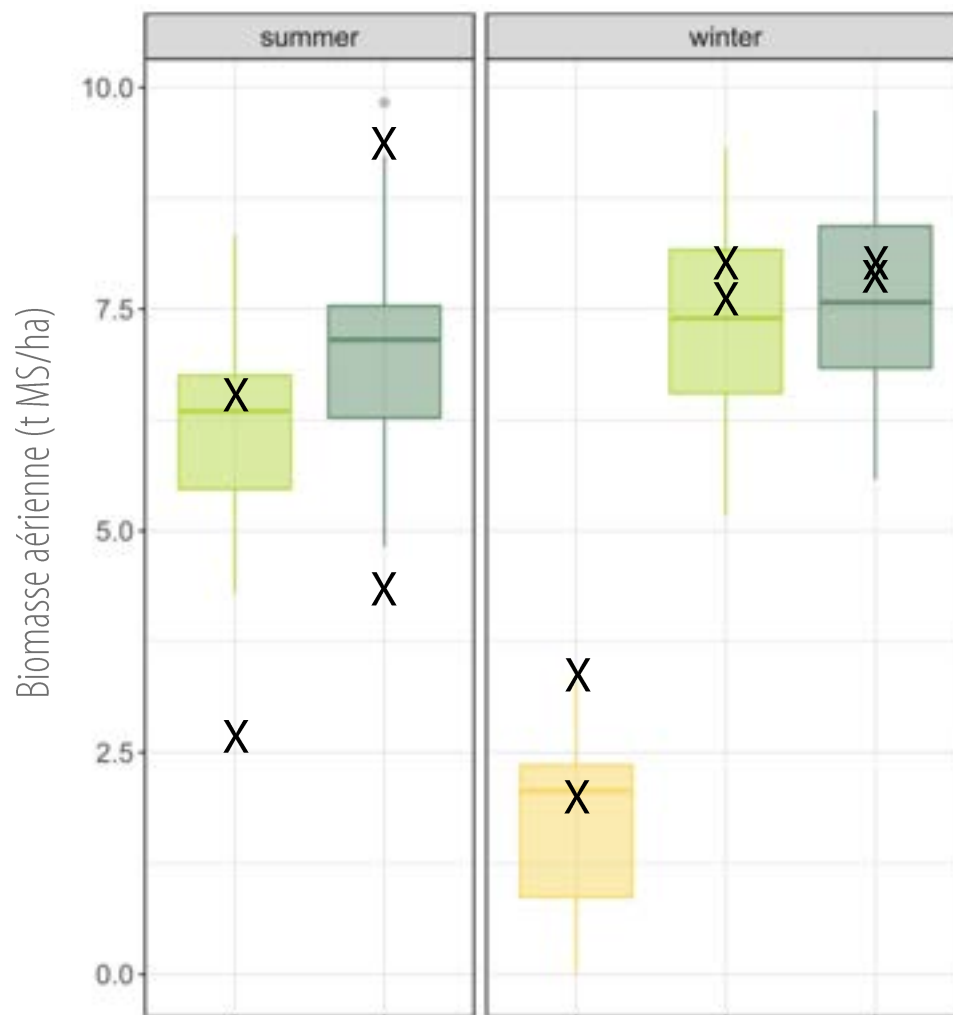
Sorgho - vesce

 Orge
d'hiver 
67 UN


CIVE

63 UN

Biomasses produites



Biomasse aérienne sur pied des couverts dans les 30 années simulées

Modalités

CIPAN

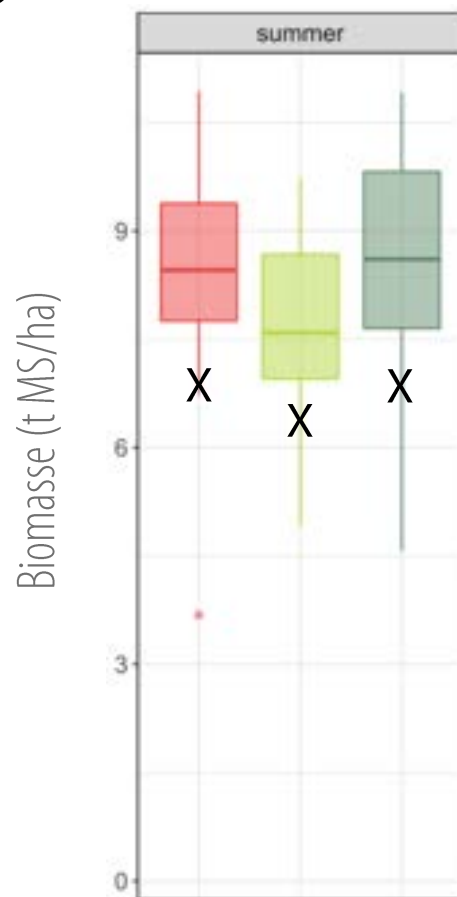
CIMS

CIVE

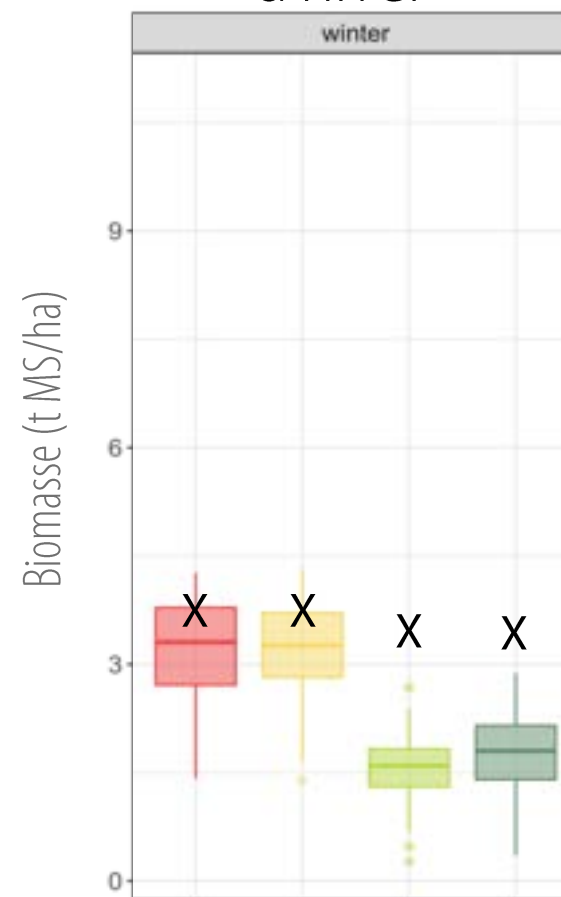
X Résultats expérimentaux

Pas de baisse de rendement au champ

Orge suivant interculture d'été



Tournesol suivant interculture d'hiver

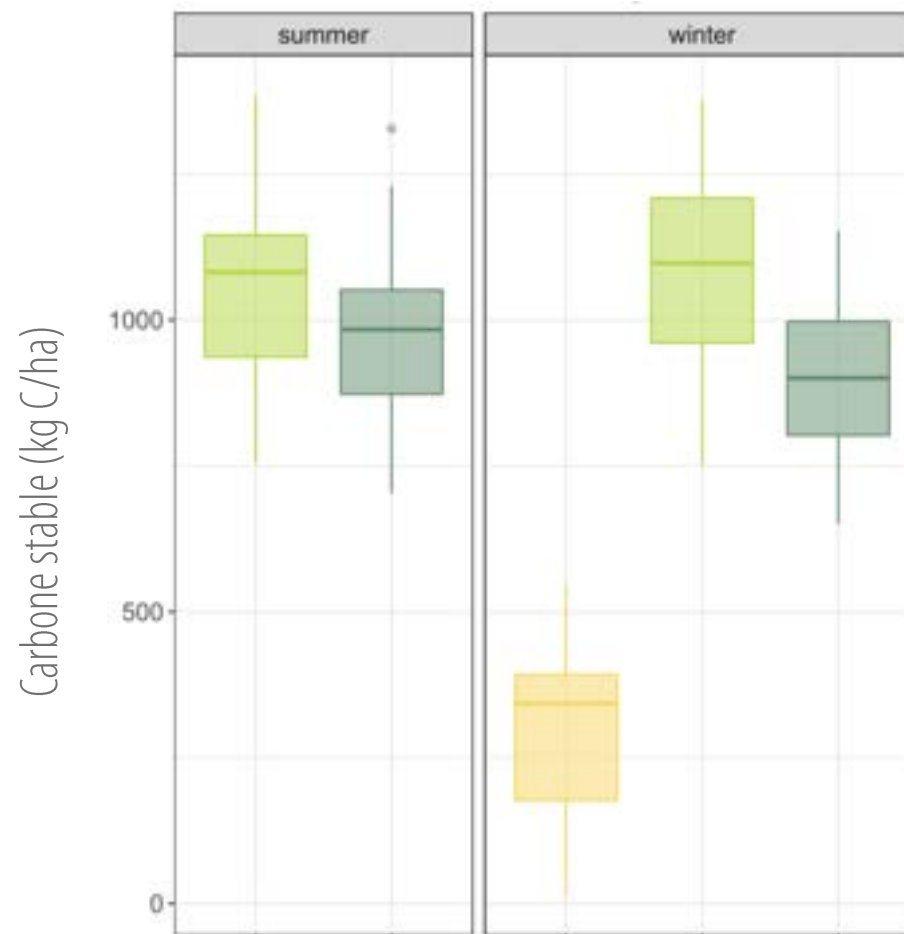


Modalités



X Résultats expérimentaux

Stockage de C si biomasse importante



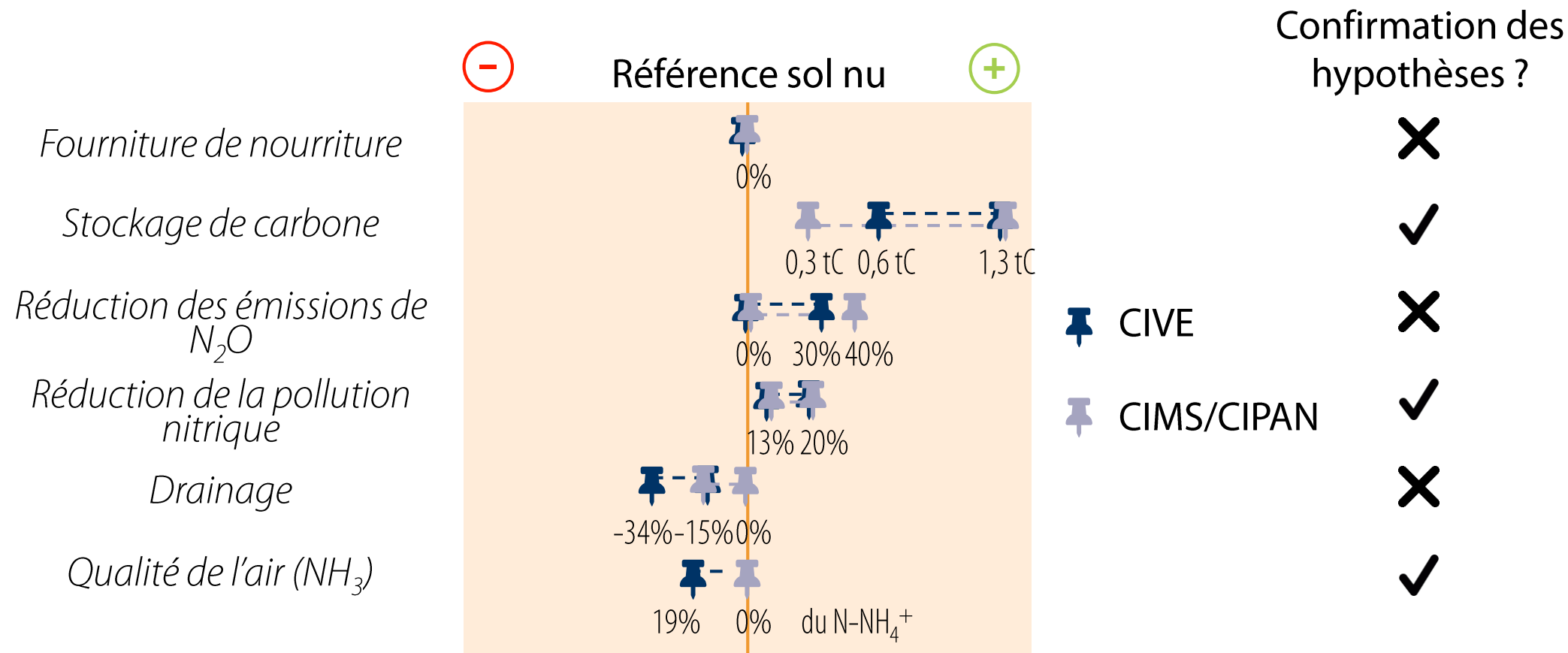
Quantité de C stable (en kg/ha)
apportée par les couverts dans les 30
années simulées

Résultats croisés des **simulations** et des
incubations

Modalités

- CIPAN
- CIMS
- CIVE

Synthèse

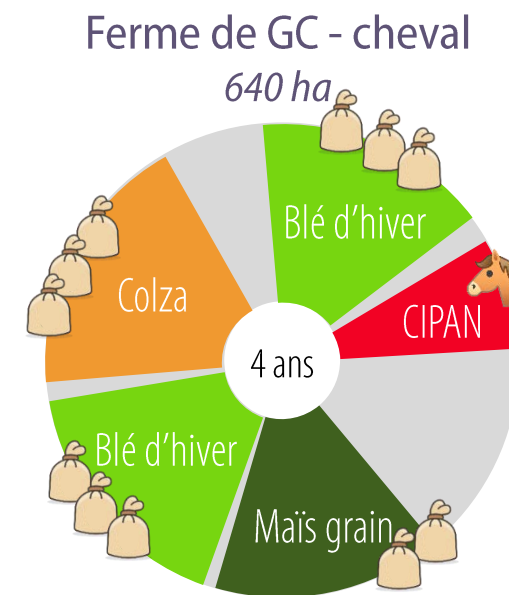
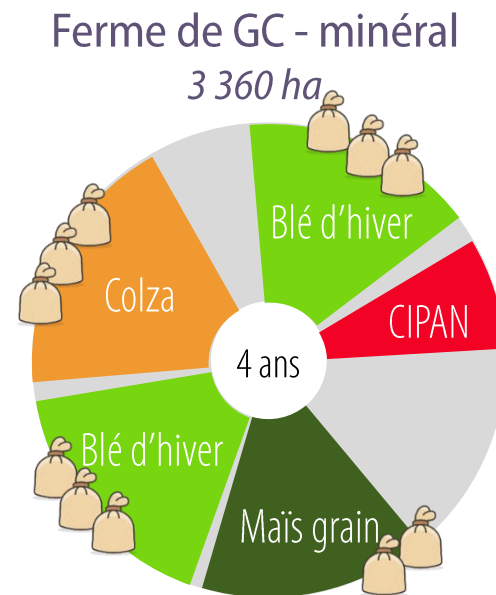
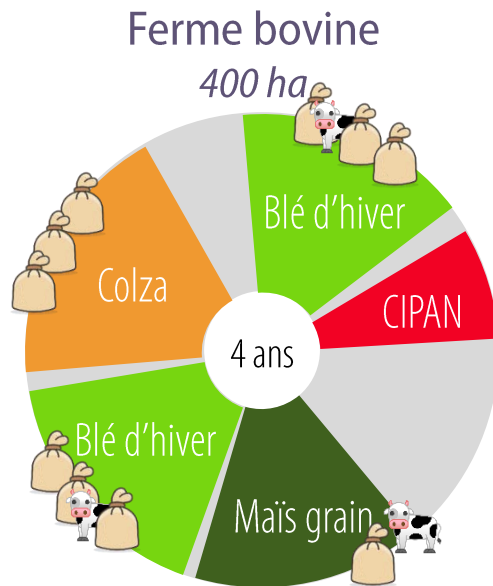


Echelle région

Quelles sont les conséquences de l'implantation d'une unité de méthanisation sur les flux de carbone et d'azote entrant et sortant des fermes du territoire ?

La plaine de Versailles

- Zone péri-urbaine de grandes cultures (GC)
- 66% des rotations sont des successions de colza, maïs, céréales à paille
- Deux types de sol principaux : argilo-calcaire (**AC**) et limoneux profond (**LP**)
- Stock de carbone organique faible : 44,9 t C/ha (AC) et 43,5 t C/ha (LP)



Fumier ou lisier bovin



Engrais minéral



Fumier équin

2 Scénarios d'implantation de la méthanisation

Méthanisation à la ferme bovine

- Ferme bovine
- Digestat de fumier/lisier bovin
- Remplacement du fumier/lisier bovin et d'engrais minéraux

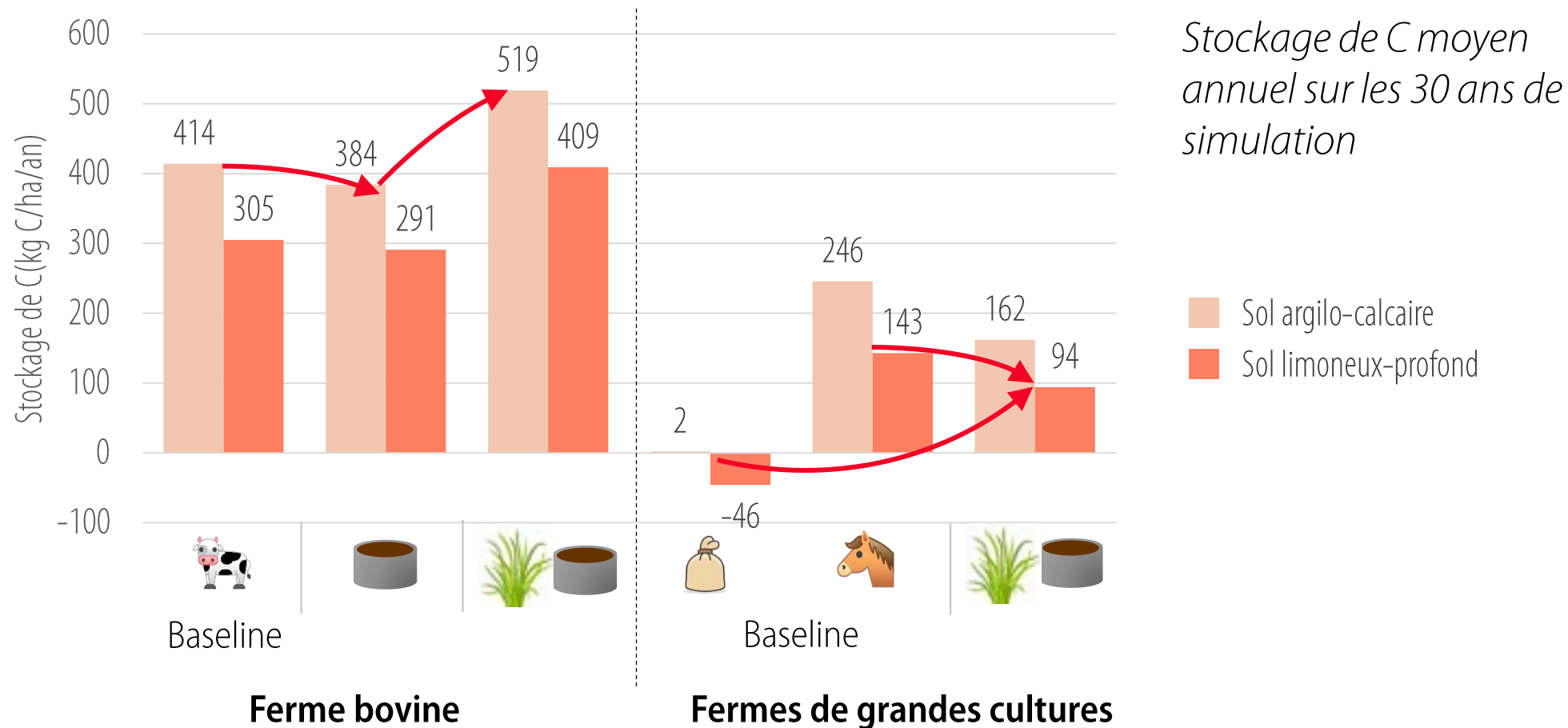
Méthanisation agricole territoriale

- Toutes les fermes
- Digestat de CIVE/fumier/lisier bovin et équin
- Remplacement d'engrais minéraux et tous les fertilisants organiques
- Insertion d'une CIVE d'été et d'une CIVE d'hiver; légumineuses sur 1/3 de la surface

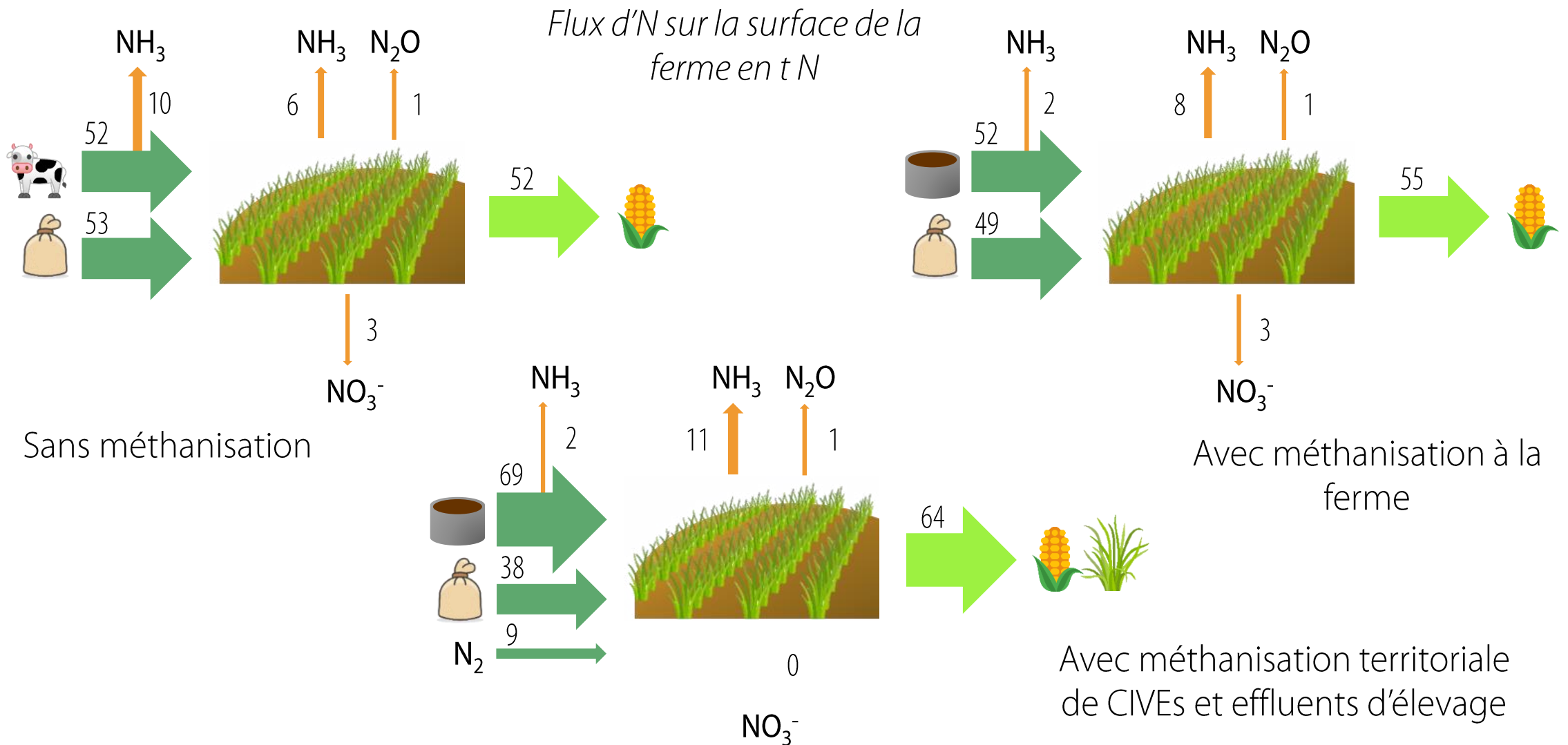
4 Règles pour tous les scénarios (y compris la ligne de base) :

- Alignement des rendements avec ceux observés sur le terrain
- Ajustement de la fertilisation minérale au cours du temps pour maintenir les rendements
- Conservation de l'N lors de la méthanisation
- Digestat couvert

Les CIVEs stockent du C, la méthanisation diminue l'efficacité amendante des effluents

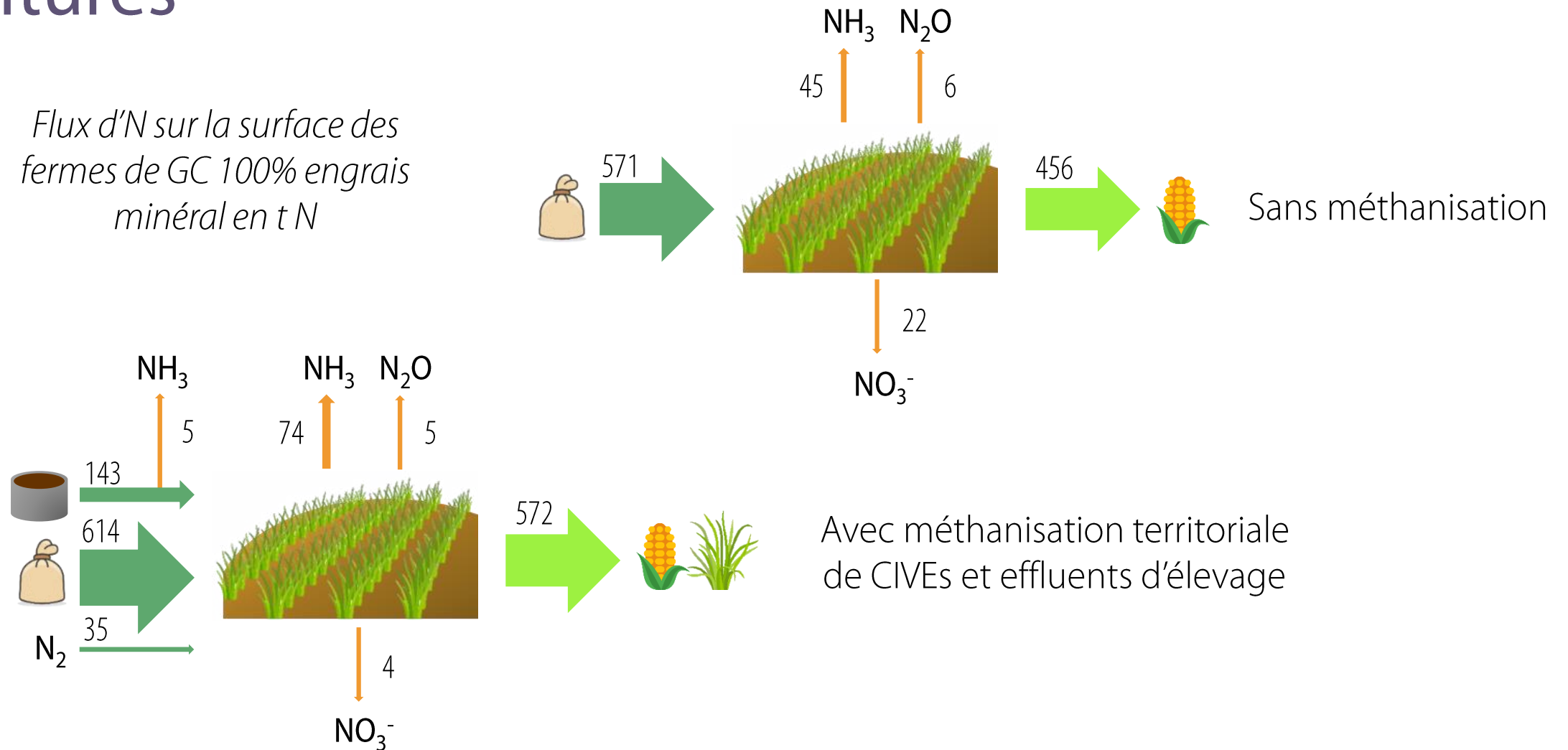


Effet des CIVEs sur le cycle de l'N en élevage

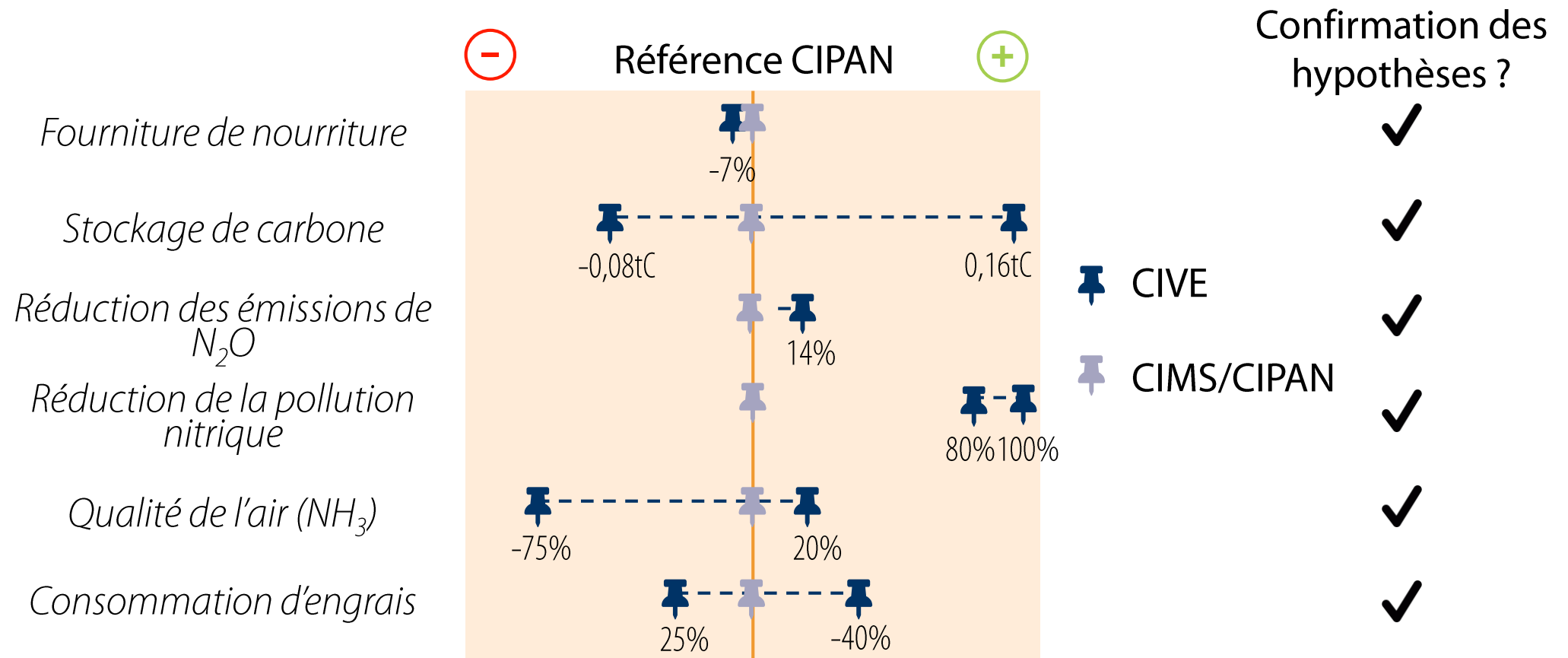


Effet des CIVEs sur le cycle de l'N en grandes cultures

Flux d'N sur la surface des fermes de GC 100% engrais minéral en t N



Synthèse sur les CIVEs



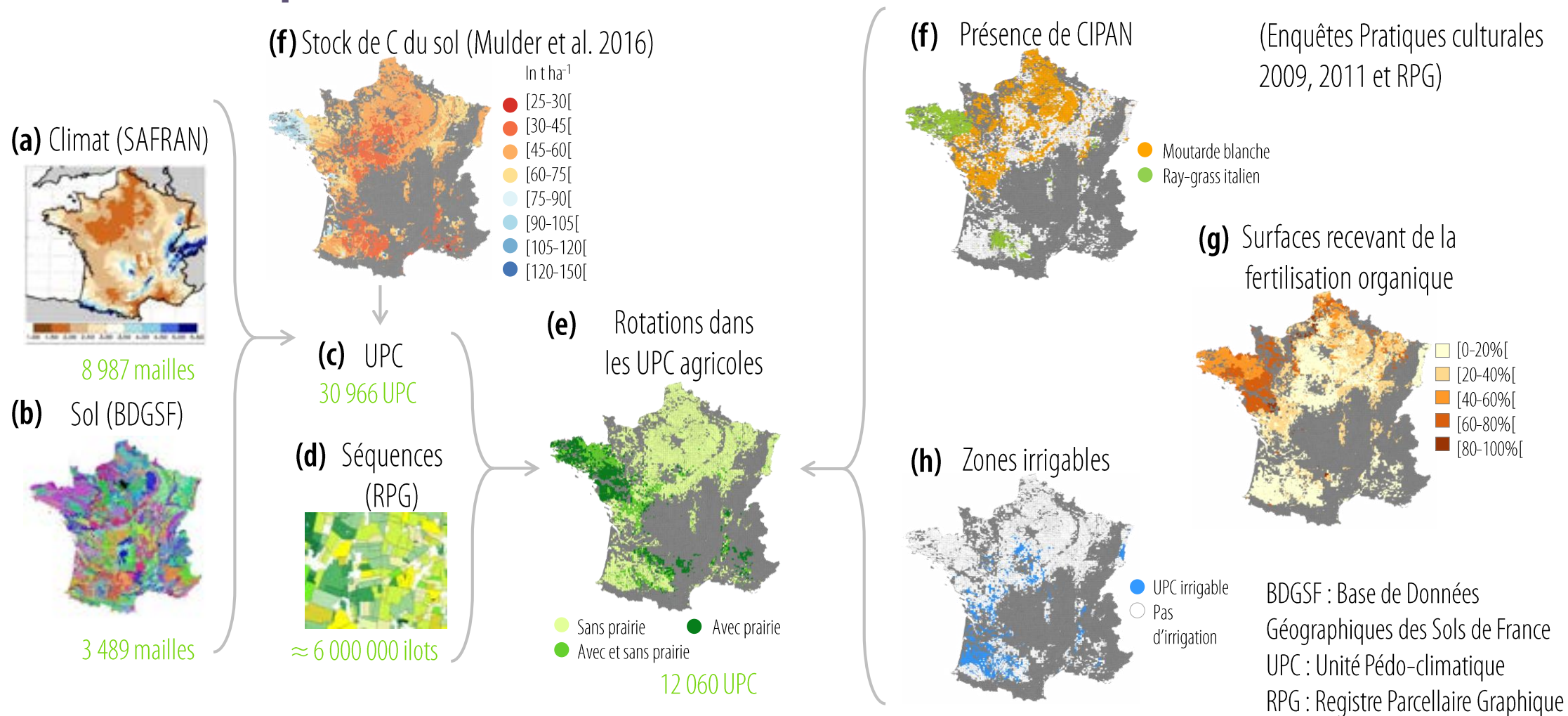
Echelle France entière

Quelle quantité de biomasse les CIVEs pourraient-elles produire en France ?

Quels sont leurs impacts à long terme sur les cycles du carbone, de l'eau et de l'azote ?

Construction des systèmes de culture actuels : étude 4p1000

Issu de Launay et al. 2021



4 Scénarios de développement des couverts

Ligne de base

- CIPAN en zones vulnérables nitrate
- En interculture d'hiver, de 2 à 6 mois
- Espèces les plus utilisées en 2011

Extension des CIMS

- CIMS dans les intercultures de plus de 2 mois
- En interculture d'hiver et d'été avant le 20 juillet
- Légumineuses et espèces non gélives
- Irrigation autorisée pour la levée

Insertion de CIVEs



- En interculture d'hiver avant le 15 octobre
- En interculture d'été avant le 20 juillet
- Orge d'hiver et sorgho
- Fertilisation des CIVEs avec de l'engrais minéral et digestat épandu sur la culture suivante
- Seuil de récolte à 5 t MS/ha
- 33% de chaumes

Extension des CIVEs



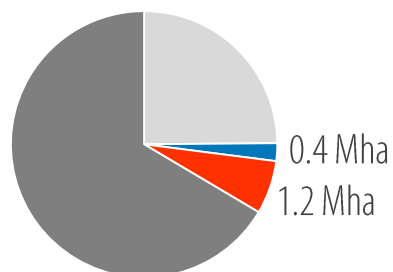
- Mêmes règles et mêmes espèces que précédemment
- Avancement de la précocité du maïs et du tournesol
- Substitution de colza par du tournesol, substitution de blé par du maïs ou de l'orge

Surfaces considérées

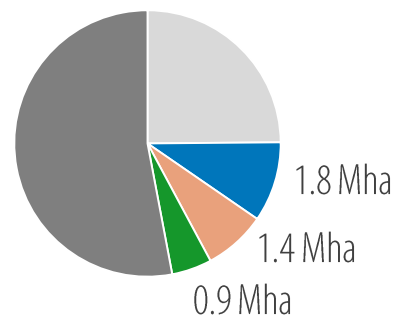
On représente $\frac{3}{4}$ de la surface arable française de 2009 = **14 Mha**

Surface des cultures intermédiaires dans les différents scénarios :

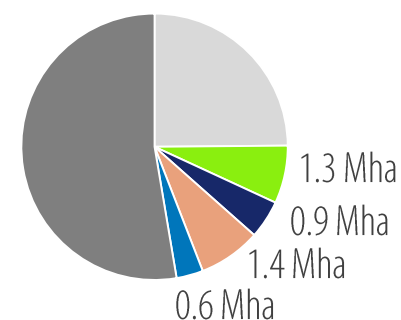
Dans les systèmes de culture actuels



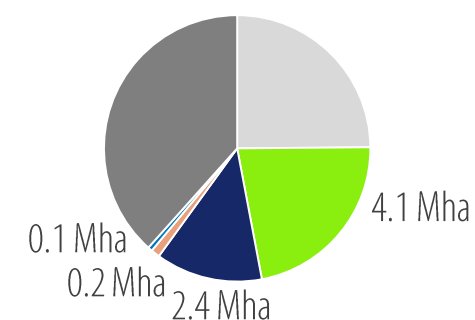
Dans le scénario « extension des CIMS »



Dans le scénario « insertion de CIVEs »



Dans le scénario « extension des CIVEs »



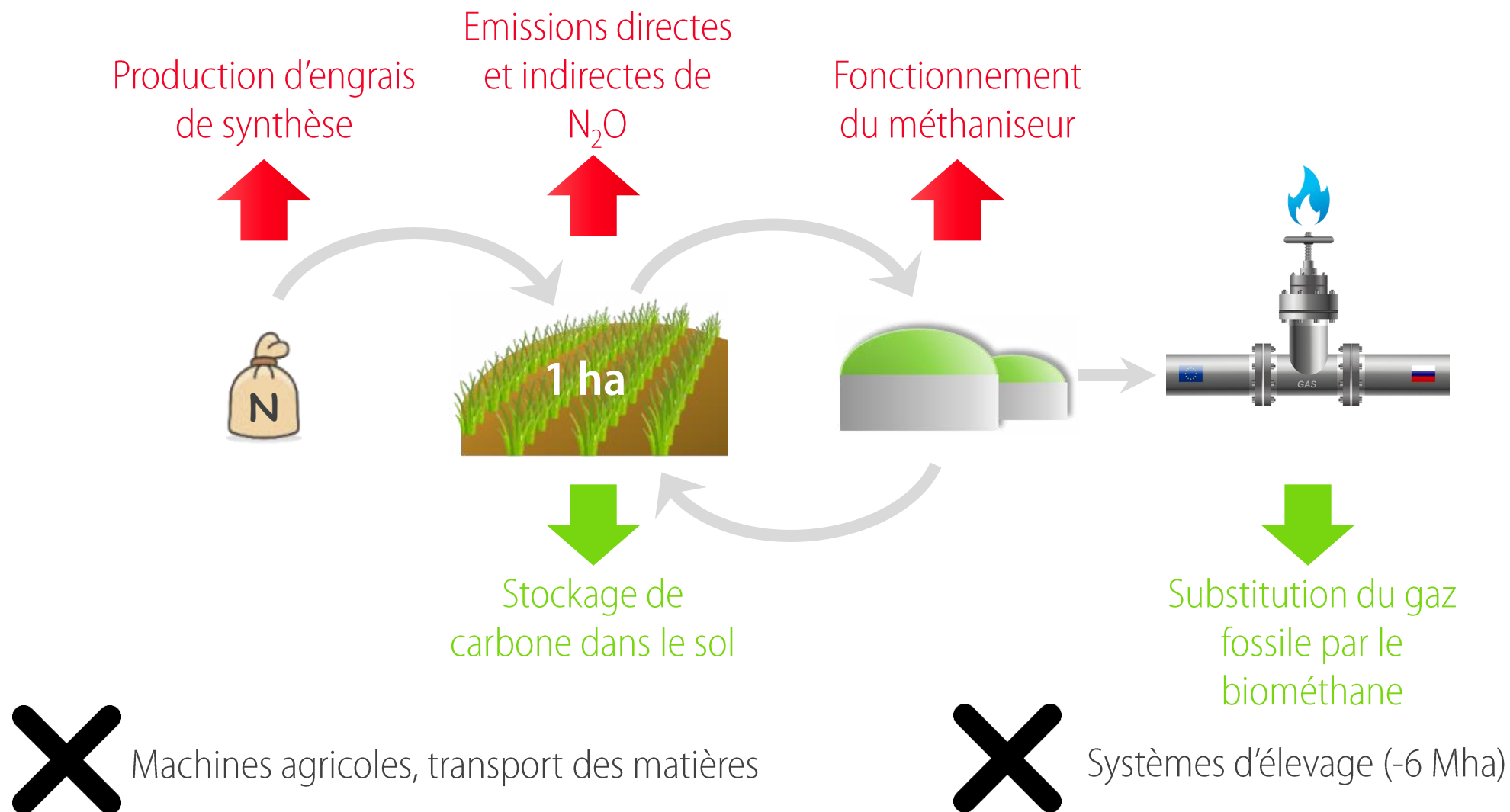
● Non simulé
● Interculture nue ou prairie

● Sorgho
● Ray-grass

● Orge d'hiver
● Vesce

● Féverole
● Moutarde

Calcul du bilan Gaz à Effet de Serre



Les CIPAN présentes dans le nord et peu productives

Ligne de base

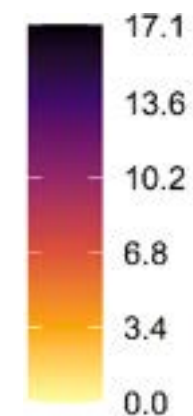
Moutarde



Ray-grass



Production de biomasse
aérienne des couverts
en t MS/ha :



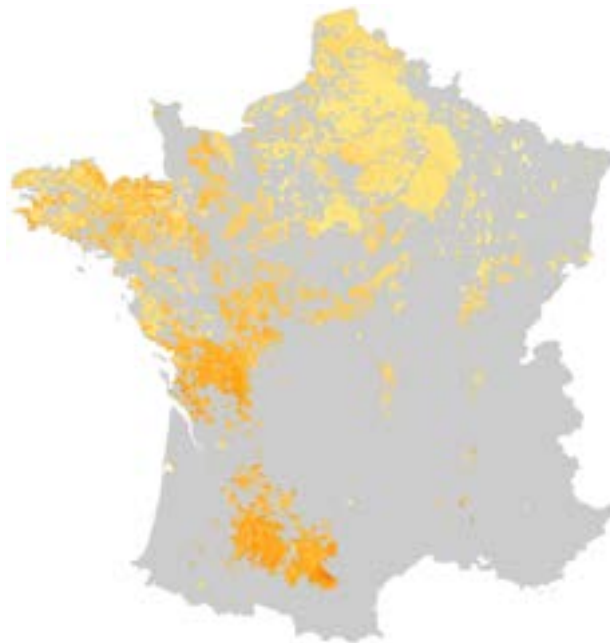
Les CIMS ne dépassent pas 5 t MS/ha

Extension des CIMS

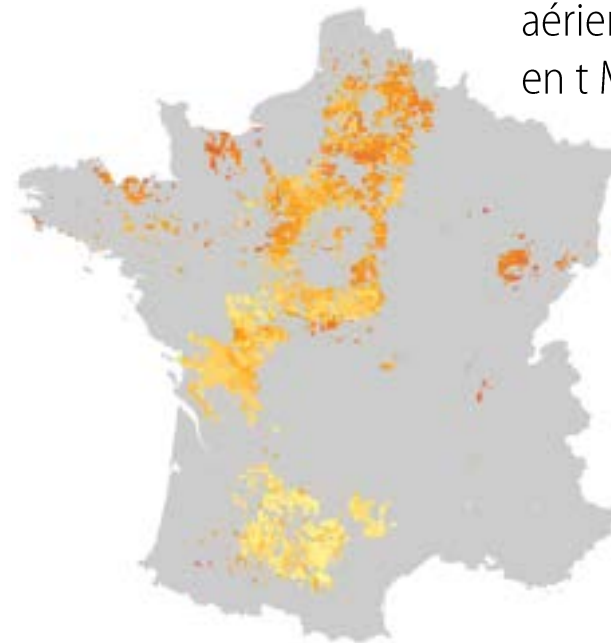
Féverole



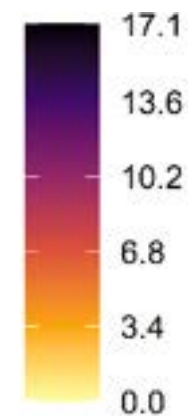
Ray-grass



Vesce



Production de biomasse
aérienne des couverts
en t MS/ha :



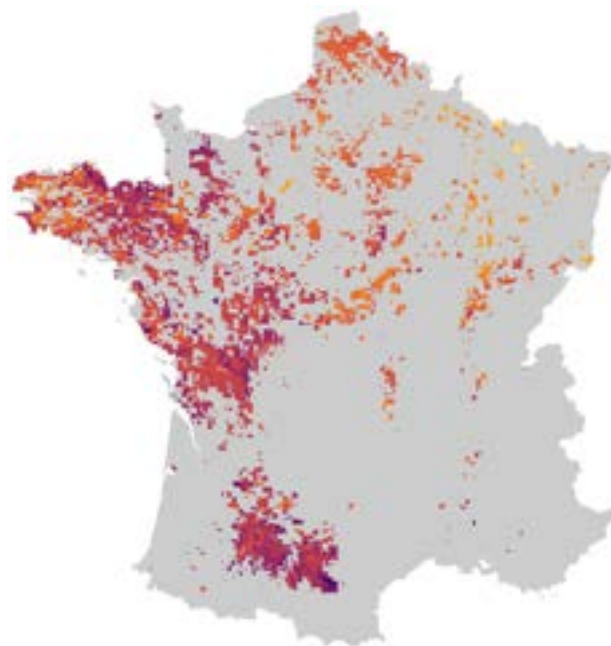
Les CIVEs d'hiver plus productives que les CIVEs d'été

Insertion de CIVEs

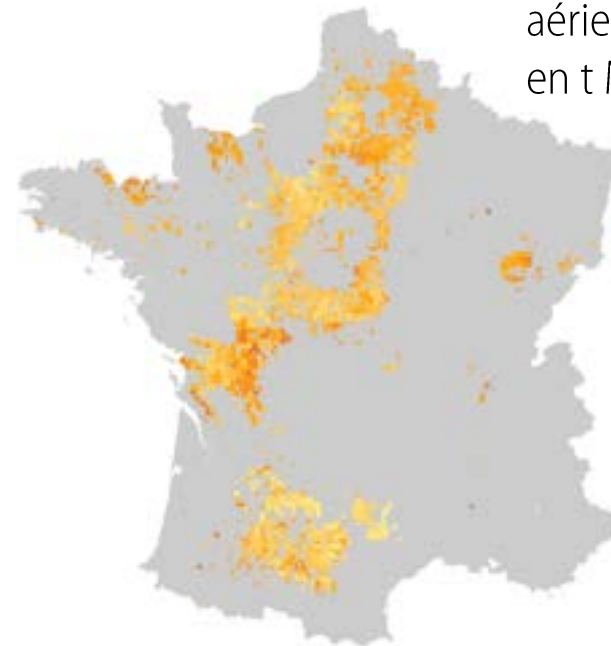
Féverole



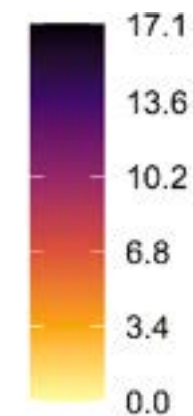
Orge d'hiver



Sorgho



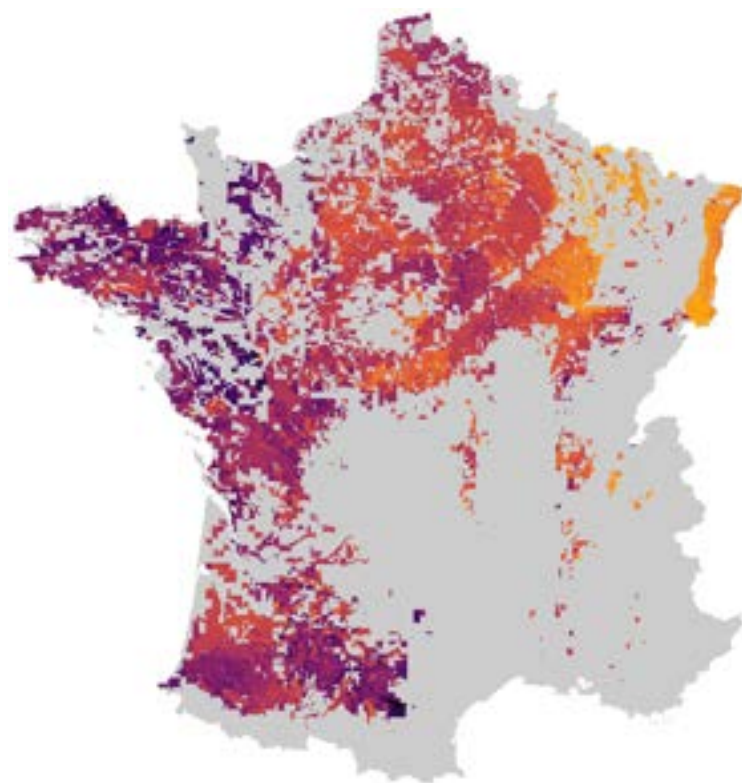
Production de biomasse
aérienne des couverts
en t MS/ha :



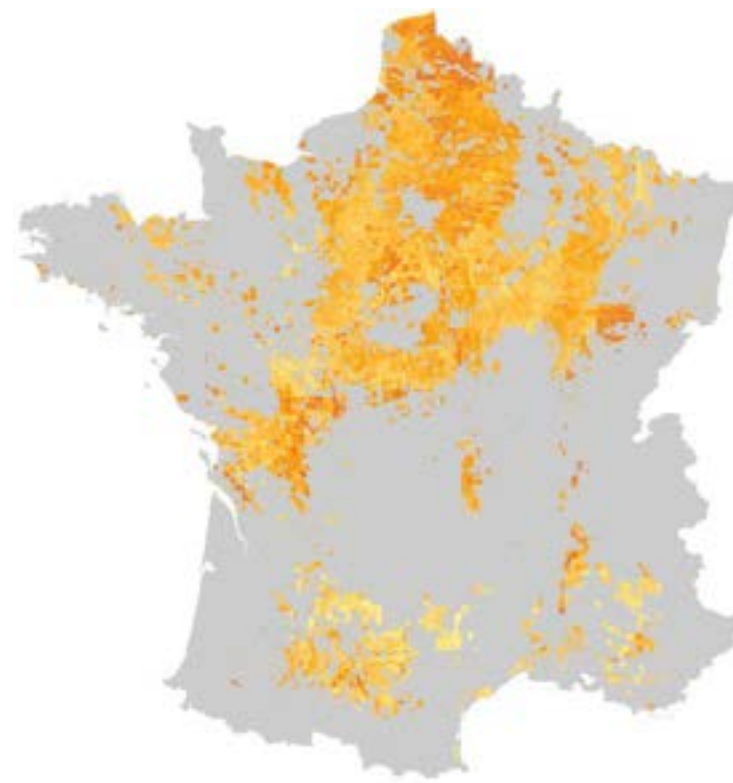
Extension possible des CIVEs d'hiver dans le sud-ouest et le Bassin Parisien

Extension des CIVEs

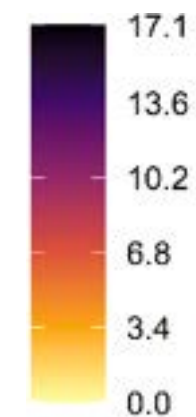
Orge d'hiver



Sorgho

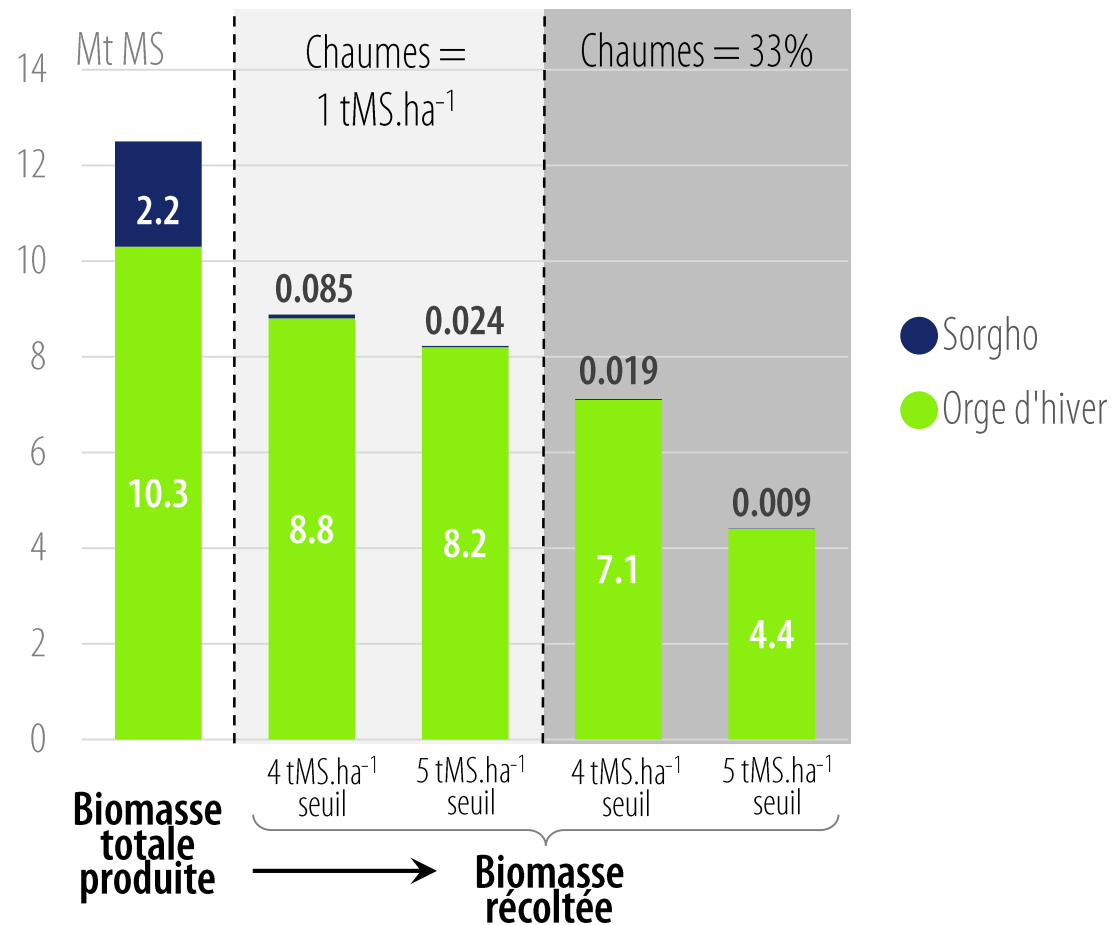


Production de biomasse
aérienne des couverts
en t MS/ha :



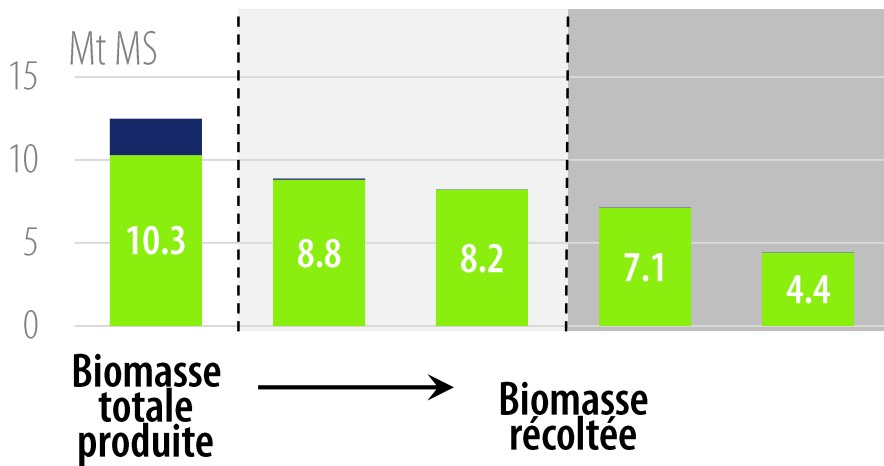
Insertion de CIVEs ; Biomasse potentielle

Insertion de CIVEs

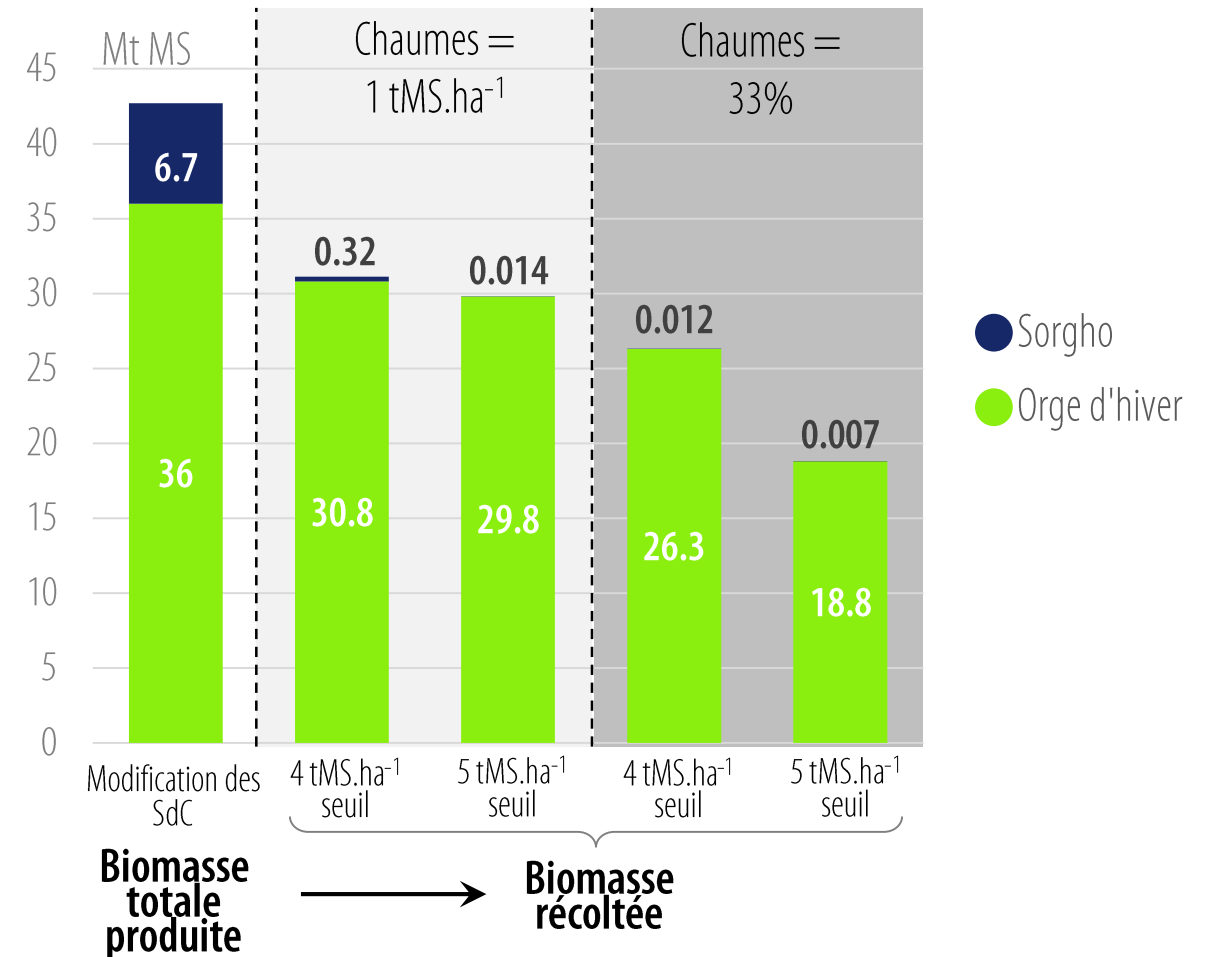


Extension des CIVEs ; Biomasse potentielle

Insertion de CIVEs



Extension des CIVEs

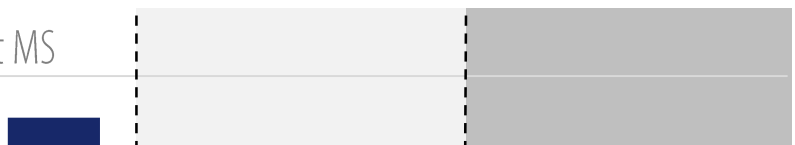


Extension des CIVEs ; Biomasse potentielle

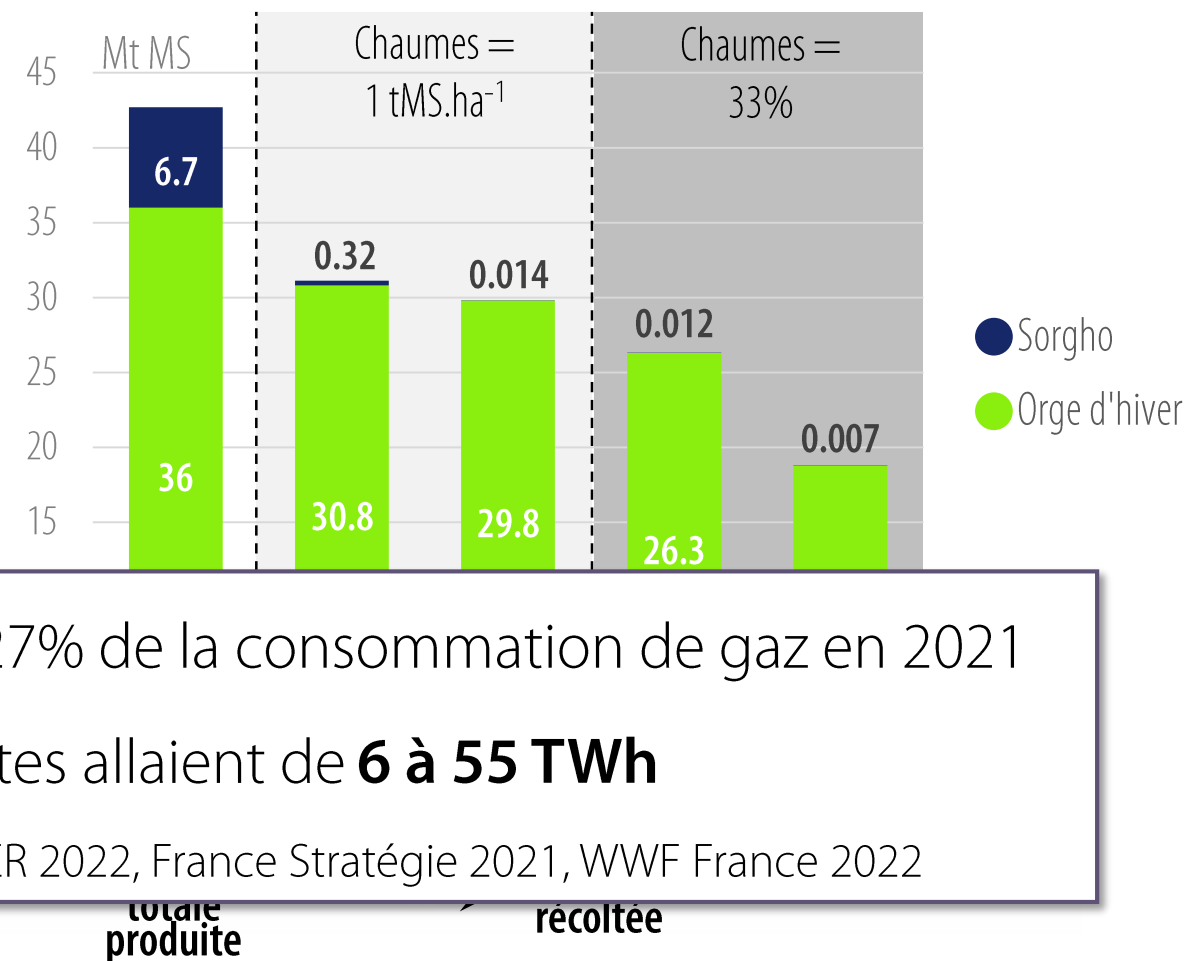
Insertion de CIVEs

Mt MS

15



Extension des CIVEs



4,4 à 31,1 Mt MS = **17 à 115 TWh** = 4 à 27% de la consommation de gaz en 2021

Les estimations précédentes allaient de **6 à 55 TWh**

ADEME 2013, 2018, 2021, Agrosolutions and EIFER 2022, France Stratégie 2021, WWF France 2022

Production de biomasse énergétique au léger détriment de la biomasse alimentaire

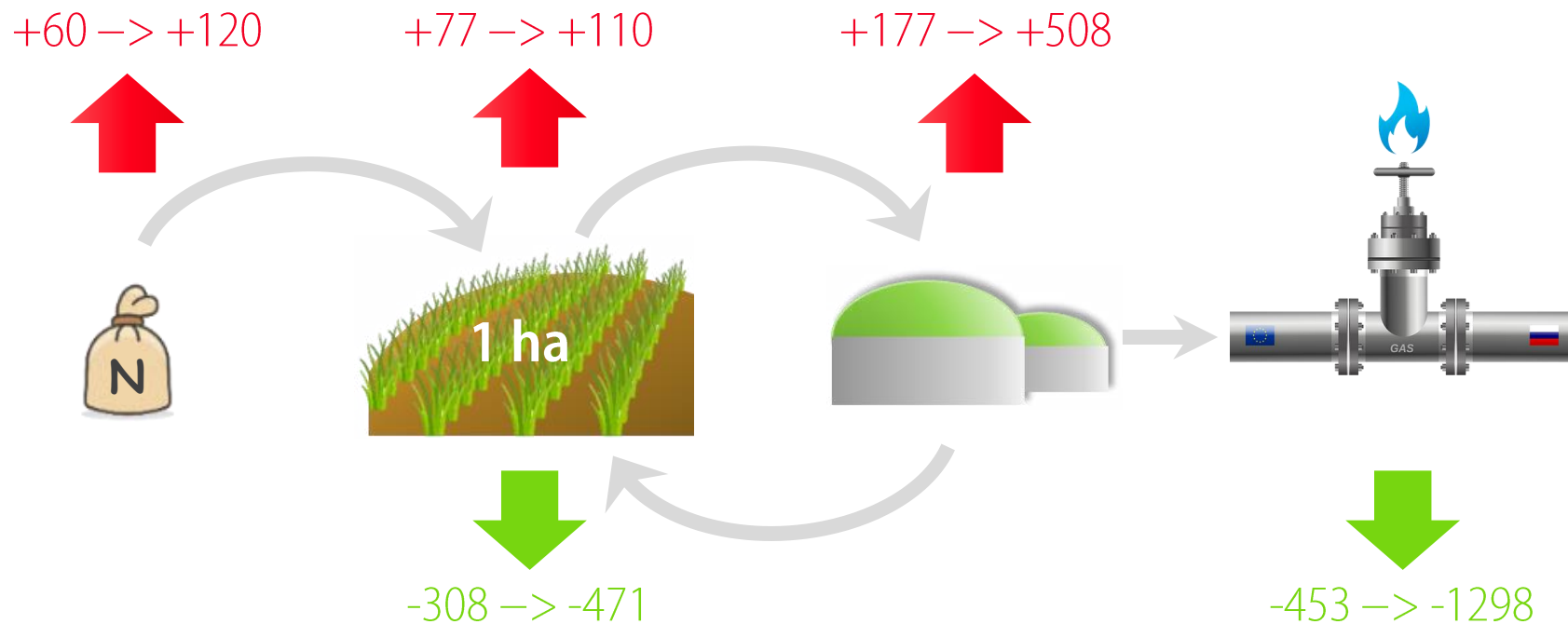
Modification des rendements par rapport à la ligne de base :

		
Extension des CIMS	+2,3 -> +3,1 %	-6,5 -> -9,8 %
Insertion des CIVEs	+2,6 -> +3,9 %	-8,9 -> -17,3 %
Extension des CIVEs	+2,7 -> +8,6 %	-9,5 -> -14,8 %

- Stress hydrique après les CIMS et les CIVEs d'hiver (récolte ou destruction quelques jours avant le semis de la culture suivante)
- Stress azoté après les CIVEs d'hiver (fertilisation non adaptée ?)
- Léger impact du décalage de la date de semis et de la précocité

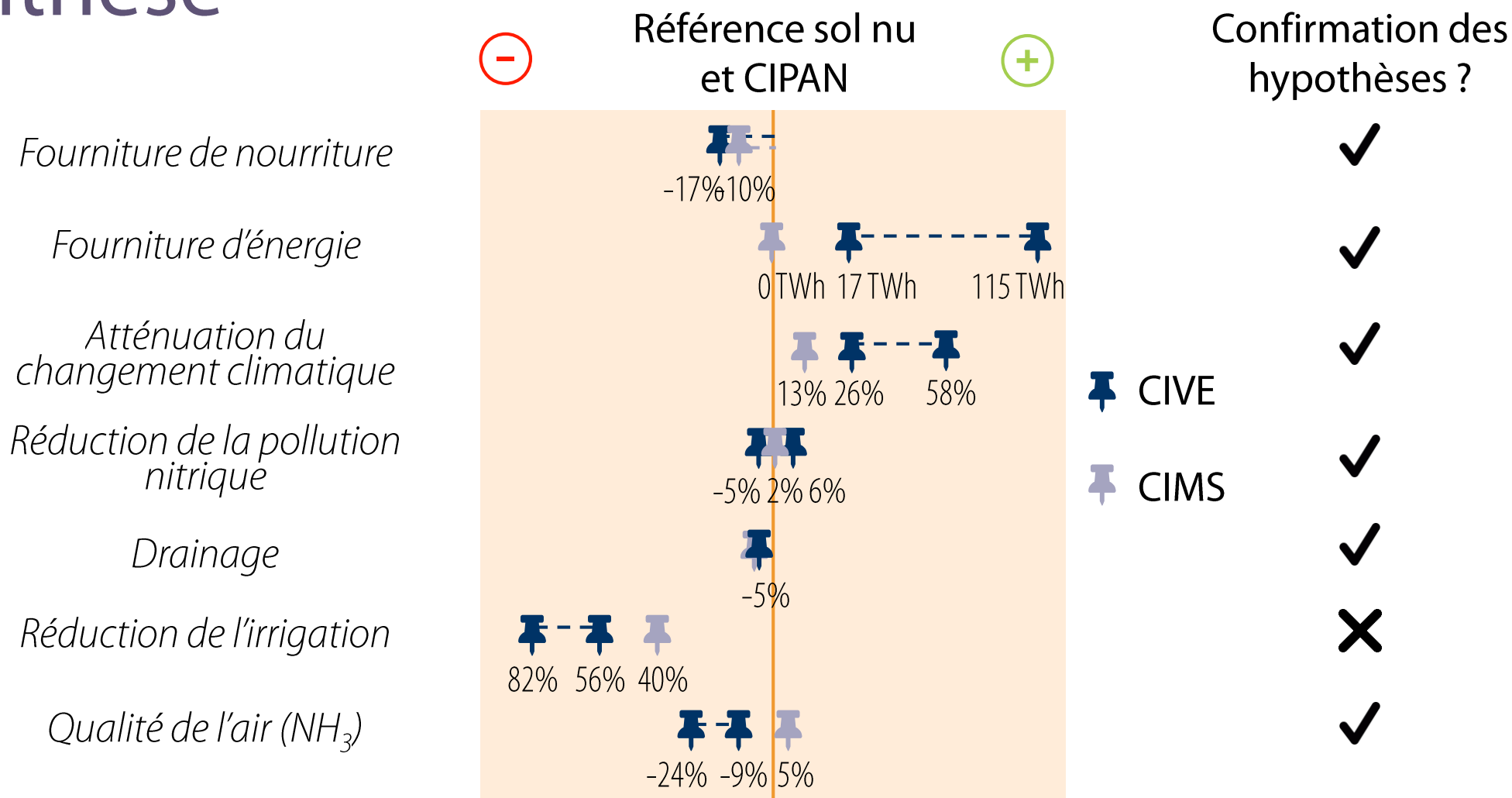
La méthanisation des CIVEs améliore le bilan GES

Différences entre les émissions GES des deux scénarios CIVEs et la ligne de base en kg CO₂e/ha/an :



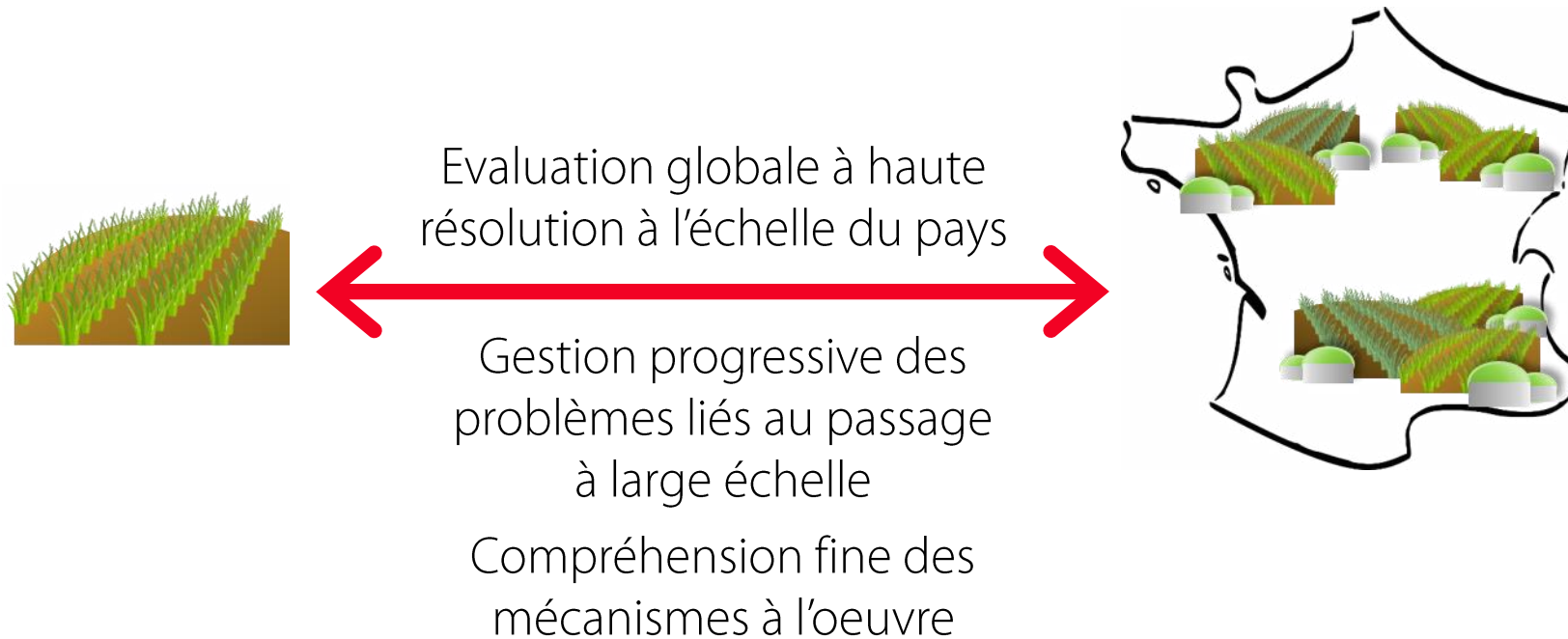
- Le stockage de C et la substitution de gaz fossile permettent d'améliorer le bilan GES dans les systèmes sans élevage : de **26 à 58% d'émissions en moins**.

Synthèse



Discussion et perspectives

Apports et limites de la démarche



Limites de la modélisation :

- Besoin de valoriser d'autres expérimentations pour améliorer le calibrage des CIVEs (réseau RECITAL)
- Utilisation parfois hors-limites de Sys-Metha ou ALFAM2
- Simplifications, ex : non prise en compte de la méthanisation des effluents d'élevage

Conclusions sur les CIVEs

1. Quelle quantité de biomasse et d'énergie pourraient-elles produire en France ?

- Elles pourraient assurer jusqu'à 27 % de nos besoins en gaz actuels grâce aux CIVEs d'hiver implantées très largement avec un bon rendement (sauf dans l'Est de la France).

2. Quels sont les impacts sur les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau ?

- Elles améliorent le bilan GES des systèmes actuels, mieux que les CIMS le feraient, grâce au stockage de carbone et à la substitution de gaz fossile.
- La consommation d'engrais augmente (explorer les associations avec légumineuses en CIVEs, limiter la fertilisation des CIVEs) et conduit à une augmentation de la volatilisation de NH_3 (bonnes pratiques d'épandage, acidification des digestats). Mais les CIVEs sont globalement aussi efficaces que les CIMS pour réduire la lixiviation (effet espèce).
- Les CIVEs et les CIMS conduisent de la même façon à une réduction du drainage (conséquence sur les nappes ?).

3. Quels sont les impacts sur la production alimentaire ?

- Les CIVEs réduisent un peu plus le rendement des cultures printemps que les CIMS mais l'effet n'est pas systématique (gérer la date de destruction et la fertilisation, adapter l'espèce suivante).

Ouverture

- Autres intérêts des CIVEs pour l'agroécologie
 - Service d'amélioration de la biodiversité ? Les CIVEs peuvent fournir des habitats et des ressources diversifiées mais les chantiers d'ensilage au printemps détruisent des nids.
 - Service de régulation des pathogènes ? Les CIVEs peuvent à la fois être menacées (jaunisse nanisante) et menaçantes (piétin échaudage)
- Impact du changement climatique
 - Possibilité d'insertion de CIVEs d'été encore plus incertaine à cause des sécheresses estivales et de l'augmentation des températures.
 - Mais les CIVEs d'hiver pourraient en profiter en étant semées plus tôt et récoltées plus tôt. Une récolte précoce permettrait aussi d'éviter le stress hydrique sur la culture suivante.

Recommandation

- Quid des CIVEs dans les systèmes bas intrants ?
- Quels agriculteurs implantent des CIVEs ? De quelle façon ? Pour quel type d'agriculture ?

Ne pas chercher un rendement maximal mais un rendement optimal

- Réduire le coût de l'investissement pour les agriculteurs, garder un tarif d'achat cohérent avec le coût de production
- Dimensionner raisonnablement les méthaniseurs pour viser la résilience plutôt que la productivité seule

Remerciements

Mes encadrantes et encadrant
Mon financeur
Les membres du jury
Les membres de mon comité de pilotage
Mon tuteur de l'école doctorale
Mes collègues
Mes amis
Ma famille