



Journées Recherche et Innovation Biogaz et Méthanisation

Sessions Agronomie et Environnement

| Centre Prouvé, 1 Pl. de la République, 54000 Nancy
| 17-19 mars 2026



Sommaire

Animateurs

AGRICULTURE DURABLE, SERVICES ET AGROÉCOLOGIE

Bérengère Poisson

[DiagOptiméthas : diagnostic des impacts de la méthanisation sur les fermes et les territoires - Sylvaine Berger, Solagro](#)

[Quels impacts énergie et GES des unités de méthanisation françaises en fonctionnement ? - Hugo Kech, AILE](#)

[Quels leviers mobiliser pour aller vers plus de services écosystémiques avec la méthanisation ? - Romain Girault, OPAALE, INRAE](#)

[La méthanisation agricole comme levier agroécologique dans la gestion du Datura - Manuel Heredia, Arvalis et Camille Lagnet, APESA](#)

MICROPLASTIQUES ET BIODÉGRADABILITÉ DES MATÉRIAUX

Thierry Ribeiro

[Biodégradation de composites PHBV/Cellulose en méthanisation mésophile - Patrick Dabert, INRAE](#)

[Devenir de microplastiques au cours de la méthanisation et impact après retour au sol des digestats- Dominique Patureau, LBE - INRAE](#)

[Les sacs plastiques compostables ne se dégradent pas en méthanisation - Patrick Dabert, INRAE](#)

CIVE & DURABILITÉ AGRO-CLIMATIQUE

Armelle Darriano

[Evaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture en méthanisation- Romain Gloaguen, Unilasalle](#)

[Evaluation de l'impact du changement climatique sur le potentiel de biomasse des cultures intermédiaires à vocation énergétique - Nicolas Dagorn, Arvalis](#)

[Cultures intermédiaires à Vocation Énergétique : des ressources potentielles en biomasse à la hauteur des objectifs ? - Sylvain Marsac, Arvalis](#)

[Performances agro-environnementales de la méthanisation de CIVE sans élevage : modélisation basée sur des cas réels selon divers scénarios climatiques – Florent Levavasseur, Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, ECOS](#)

ÉVALUATION DES IMPACTS ET POTENTIEL AGRONOMIQUE

Sylvain Marsac

[Evaluation de l'impact des différentes stratégies de gestion des digestats sur les émissions d'ammoniac et de méthane au stockage et à l'épandage - cas particulier des unités de méthanisation sans effluents d'élevage - Romain Girault, OPAALE, INRAE](#)

[LEGUMETHA : quel potentiel de valorisation des légumineuses via la méthanisation ? Evaluation multi-critères à l'aide de la plateforme MAELIA - Nirina Ratsimba, AGIR, INRAE](#)

[Analyse environnementale relative à la valorisation du CO2 issu d'installations de méthanisation- Dorian Issaly Metys, INRAE Transfert](#)

[Optimisation de systèmes de culture biomasse pour une méthanisation durable : premiers enseignements de la plateforme Trajectoire - Sophie Carton, Agroparistech](#)

1 **Sylvaine Berger, Solagro**

DiagOptiméthé : diagnostic des impacts de la méthanisation sur les fermes et les territoires

2 **Hugo Kech, Aile**

Quels impacts énergie et GES des unités de méthanisation françaises en fonctionnement ?

3 **Romain Girault, OPAAL INRAE**

Quels leviers mobiliser pour aller vers plus de services écosystémiques avec la méthanisation ?

4 **Manuel Heredia et Camille Lagnet, Apesa**

La méthanisation agricole comme levier agroécologique dans la gestion du Datura



DiagOptiMetha : Diagnostic Optimisé des impacts de la Méthanisation sur les systèmes agricoles

Présentation réalisée par Sylvaine BERGER – Solagro

Equipe projet :

- Céline LABOUBÉE – SOLAGRO. celine.laboubee@solagro.asso.fr

Financement – ADEME. APR Graine 2023-2027 / Référent Thomas eglin.thomas.eglin@ademe.fr



Objectifs du programme

Diagnostic optimisé des impacts de la méthanisation

- **Créer une méthode et un outil** (fichier Excel) de diagnostic multi-expertise (agronomique – environnemental et socio-économique) **optimisée** des impacts de la méthanisation sur les exploitations et les territoires
- **Analyser l'évolution des pratiques entre 2 années données :**
 - avant / après métha
 - entre 2 années avec métha, pour mesurer/anticiper l'impact d'un changement de pratiques par exemple
- **Pour quoi ?**
 - pour les **porteurs de projet** : affichage transparent de l'impact d'une unité de méthanisation sur les pratiques agricoles des exploitations et sur leur territoire ;
 - pour **les collectivités/financeurs** : désirant mesurer les impacts prévisionnels de futurs projets ;
 - pour la **société civile** : en contribuant à l'acquisition de données de suivi sur des sujets qui soulèvent régulièrement des questions – demande une centralisation et un suivi interannuel des bilans réalisés (non prévu à ce jour)

Présentation de l'outil

- **Un fichier EXCEL dispo en ligne et autoportant**
 - Attention à la qualité/précision des données d'entrée
 - À destination plutôt des conseillers agricoles formés, qu'en usage grand public
- **Une analyse individuelle et de territoire**
 - 1 onglet méthaniseur
 - 1 à 15 fermes expertisées individuellement
 - 1 moyenne des expertises individuelles pour une tendance à l'échelle locale
 - Contrôle de cohérence entre les matières entrantes dans le méthaniseur, les matières produites par les fermes, et quantité de digestat restituée et les pratiques de fertilisation
 - 1 à 15 onglets rapports – qui génèrent un fichier PDF

DiagOptimetha : Diagnostic Optimisé de la Méthanisation

- Indicateurs agronomiques :

- Évolution de l'assolement : SAU, SAU développée, Durée, surface et nb de culture par rotation, % de culture d'hiver de printemps, de prairie, de culture intermédiaire, de légumineuses
- Evolution sur la destination des cultures : Vente, fourragère, énergétique, couverts restitués
- Evolution des pratiques de fertilisation : SAMO, N total utilisé, répartition azote minéral/organique/symbiotique
- Evolution des pratiques d'usage phytosanitaires : Nombre de dose/culture
- Evolution des pratiques de gestion du sol et de l'irrigation : C frais et stable restitué au sol, quantité d'eau d'irrigation à l'échelle de la ferme et par MJ produits
- Evolution des pratiques de cheptel : nb d'animaux, temps en bâtiment, pratique de gestion des effluents, autonomie fourragère

DiagOptiMetha : c'est Evolution des pratiques agronomiques moyenne à l'échelle des rotations – et non une photo des pratiques de l'assolement au moment du bilan.

DiagOptimetha : Diagnostic Optimisé de la Méthanisation

- **Indicateurs environnementaux : en cours de développement**

- Bilans Energie / GES : sur la base des pratiques réelles de stockage des EE - Interface à mettre au point avec DIGES 3 pour une approche plus fine des émissions GES liées au stockage des EE et à la production des CIVE.

- **Indicateurs socio-économiques : en cours de développement**

- Indicateurs sociologiques : âge, sexe, étude, métiers, mandats locaux, ... : qui sont nos agri méthaniseurs ?
- Appropriation sociale : description du territoire d'implantation, rôle des agris dans le territoire et de leurs parents, conflits, communication
- Travail : évolution du nombre de salariés et d'associés, description du travail et du temps associé
- Motivation : par priorité : Revenu / Fertilisation / Gestion effluents / Gestion déchets végétaux / Diversification / Diminution des GES / Meilleure gestion du temps de travail / Autre
- Données économiques : évolution des « postes » de dépenses clés (épandage, engrais, etc. ...) (en euro et en heures) – pas de bilan détaillé comptable de la ferme (trop sensible)

Illustration d'un cas concret

Ferme de Figeac : Bovin Lait / Bovin Viande

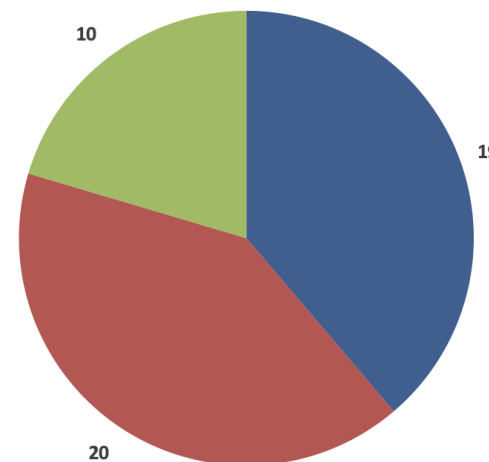
- Description de l'exploitation :
 - Ferme bovin lait/ bovin viande : 206 UGB
 - 67 ha de SAU, constitués de :
 - prairies permanentes,
 - Rotation 1 : PT Ray Grass / PT Ray Grass / Triticale
 - Rotation 2 : Cl méteil/ maïs fourrager
 - Les changements engagés par la méthanisation :
 - Les lisiers et fumiers sont envoyés en métha,
 - La ferme produit de l'ensilage de CIVE d'hiver et d'herbe de prairie temporaire vers le méthaniseur
 - 9 ha de prairies ont été retournées en terre arable pour augmenter la surface de la rotation 2

Evolution Assolement et Rotations

Assolement annuel moyen AVANT méthanisation (ha/an)



Assolement annuel moyen APRES méthanisation (ha/an)



	Unité	Année 1	Année 2	Evolution
Evolution de la SAU Totale :	ha	67	67	0%
Evolution de la SAU Développée	ha	77	86	10%
% de culture d'hiver	% SAU développée	26%	34%	23%
% de culture de printemps	% SAU développée	13%	22%	41%
% de période de sol nu	% de temps	8,3%	8,3%	0%
% de double culture (dérobée d'hiver ou d'été)	% de la SAU développée	13%	22%	41%
% moyen de légumineuse dans les associations	% de la SAU	13%	16%	15%
Evolution de la complexité de l'assolement	Nombre de cultures présentes	4	4	0%

- Peu d'évolution de l'assolement et des rotations
- Augmentation (x2) de la rotation Maïs/CI méteil - au détriment d'un retournement de prairie permanente
- Augmentation de 10 % de la SAU développée
- Pas d'impact sur la durée en sol nu

Evolution de l'énergie produite

- Pour comparer les pratiques (fertilisation, retour au sol, bilan hydrique), une valeur d'énergie est affectée à chaque production végétale quelle que soit sa destination : alimentation humaine, animale ou à des fins énergétiques

	Unité	Année 1	Année 2	Evolution
Quantité d'énergie totale produite	GJ/an	9 403	11 239	16%
Quantité d'énergie produite par hectare	GJ/ha	140	168	16%
Quantité d'énergie vendue à destination alimentaire	GJ/an	0	0	
Quantité d'énergie produite à destination énergétique	GJ/an	0	2 990	100%
Quantité d'énergie produite autoconsommée par l'atelier d'élevage	GJ/an	9 403	8 249	-12%

- Le retournement des 9 ha de prairies permanentes, au profit de la rotation Maïs/Méteil, permet une augmentation de la production d'énergie de 15 % en moyenne à l'échelle de la ferme
- Une part de l'énergie produite à destination fourragère est aussi détournée au profit du méthaniseur.

Evolution des pratiques de fertilisation

- La ferme dispose d'un droit à digestat (3470 t/an), supérieur aux quantités d'EE amenés avant la méthanisation (2415 t/an), car produit également des CIVE et de l'ensilage d'herbe

Evolution des pratiques de fertilisation

	Unité	Année 1	Année 2	Evolution
Quantité d'azote totale	tN/an	9,7	15,3	36%
Quantité d'azote minérale	tN/an	3,7	1,4	-62%
Quantité d'azote organique	tN/an	3,3	10,8	70%
Quantité d'azote symbiotique	tN/an	2,8	3,1	10%

- Les quantités d'azote total rapportées sur la ferme augmentent de 35 % après méthanisation.
- La part d'azote minérale, bien que faible au départ, diminue de 60 %.
- La part d'azote organique augmente fortement (70 %).

- Compte tenu la hausse de la production d'énergie et de la hausse de la fertilisation, la quantité d'azote produite/GJ, augmente de 24 %.
- La SAMO (Surface Amendée en Matière Organique) augmente de 18 %

	Unité	Année 1	Année 2	Evolution
Evolution de la quantité totale d'azote utilisée par énergie produite	kgN/GJ	1,04	1,36	24%
Evolution de la SAMO	ha/an	50	61	18%
Evolution de la SAMO par rapport à la SAU développée totale	%	65%	71%	8%

Evolution du Carbone restitué au sol

- Ce bilan fait état des quantités de Carbone stable et labile, entrant dans le système agricole (PRO, partie aérienne et racine) / avant et après métha

	Unité	Année 1	Année 2	Evolution
Bilan carbone stable restitué au sol	tonnes de carbone/an	62	78	21%
Bilan carbone labile restitué au sol	tonnes de carbone/an	95	99	4%

- Le système reçoit en moyenne 20 % de Carbone stable en plus que dans la situation sans méthanisation.
- La part de carbone labile est équivalente avant/après métha.

Evolution des données du Cheptel

- Pas d'évolution du cheptel en terme d'UGB : 206
- Peu de changement dans la ration d'alimentation : augmentation de 8 % de l'énergie contenu dans la ration après méthanisation

Evolution de l'autonomie fourragère

Consommation en fourrage du cheptel	tMS/an	327	355	8%
Production de fourrage à destination du cheptel	tMS/an	513	548	6%
SAU dédiée à la production fourragère totale	% de la SAU	85%	85%	0%
SAU dédiée à la production fourragère autoconsommation	% de la SAU	85%	74%	-13%
Autonomie fourragère	% d'autonomie fourragère	157%	154%	-2%

- Malgré une réorientation de 10 ha de prairie en terre arable, avec orientation des méteils vers le méthaniseur, l'autonomie fourragère reste stable et excédentaire par rapport aux besoins théoriques d'alimentation du cheptel.

Exemple du rapport généré

LOGO STRUCTURE MCR

Description

Evolution de la SAU

Evolution de la SAU

% de culture d'hiver

% de culture de printemps

% de période de sol nu

% de double culture

% de légumineuse et

% de légumineuse seule

La ration

Principales rotations

AVANT METHANISATION

blé tendre d'hiver

Sol nu

3 ans

maïs fourrager

Sol nu

APRES METHANISATION

ray-grass < 18 mois

Sol nu

3 ans

maïs CIVE

Sol nu

blé tendre d'hiver

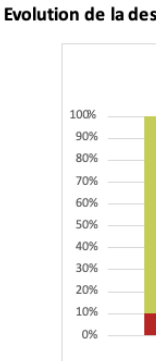
Commentaire :

Appréciation de l'évolution

La mise en place de la rotation

Méthaniseur
Nom de l'installation : 202
Campagne d'évaluation

Appréciation de l'évolution



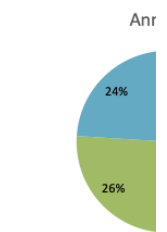
Commentaire :

Evolution des pratiques

Evolution de la quantité d'énergie produite

Evolution de la SAMO

Evolution de la SAMO par hectare



Commentaire :

Evolution du cheptel

Evolution du cheptel - Bovins
Evolution du cheptel - Porcs
Evolution du cheptel - Oies
Evolution du cheptel - Vaches
Evolution du cheptel - Truies

Bilans hydrique et matière organique

Commentaire :

Caractéristiques sociologiques

Madame BERNARD est une femme de 42 ans, titulaire d'un diplôme de niveau Bac ou équivalent. Madame BERNARD ne s'est pas formée(e) depuis la fin de ses études.

Madame BERNARD a travaillé en tant que salariée dans le secteur agricole.

Appropriation sociale

Madame BERNARD est installée(e) sur la commune de ...

Madame BERNARD connaît un(e) élu(e) au conseil municipal de ...

Madame BERNARD connaît un(e) élu(e) du conseil d'administration de ...

Madame BERNARD a des responsabilités au sein de ...

Madame BERNARD est issue(e) du monde agricole.

Madame BERNARD est issue(e) du territoire.

Terrain d'installation

Avant l'implantation de l'unité de méthanisation, le terrain est situé à 2000 mètres de l'unité de méthanisation.

Mode de communication

Plusieurs modes de communication ont été utilisés pour présenter aux riverains le projet de méthanisation : brochure papier, site internet, ouverture aux visites et/ou les temps d'échange.

Conflit(s) sur le territoire

L'installation de l'unité de méthanisation n'a généré aucune existence de conflit(s) avec les riverains.

Depuis la mise en place de l'unité de méthanisation :

- Les liens agricoles se sont resserrés, la méthanisation a permis de développer de nouvelles activités.
- Les liens avec les riverains se sont déliés.
- Les liens avec les élus n'ont pas évolué.
- Les liens avec les acteurs de la méthanisation se sont renforcés.
- Les liens avec les associations du territoire se sont renforcés.

Madame BERNARD a pris en compte des recommandations.

Madame BERNARD commente l'évolution :

'L'unité de méthanisation a permis de développer de nouvelles activités. La communication s'est accrue notamment grâce à l'unité de méthanisation.'

INDICATEURS SOCIO-ECONOMIQUES

Travail

Depuis la mise en service de l'unité de méthanisation, Madame BERNARD a embauché 2 nouveau(x) salarié(s). Ce(s) salarié(s) travaille(nt) sur l'unité de méthanisation. Madame BERNARD s'est également associée(e) avec Plus de 5 autres agriculteur(s) sur l'exploitation agricole.

La mise en service de l'unité de méthanisation a généré de surplus de travail sur l'exploitation agricole. Cette augmentation représente 2000 heures supplémentaires de travail par an. L'unité de méthanisation a généré une surcharge de travail sur des tâches administratives et productives. Ce surplus de travail est pris en charge par un(e) salarié(e). Depuis la mise en service de l'unité de méthanisation, il est plutôt difficile de se faire remplacer sur l'exploitation. La mise en service de l'unité de méthanisation a eu un impact sur les pics de charge de travail. Ces évolutions avaient cependant été anticipées lors du développement du projet, notamment par la réorganisation du travail en interne.

Motivations

Madame BERNARD a choisi de se lancer dans ce projet de construction d'une unité de méthanisation pour les raisons suivantes :

Madame BERNARD complète :

'La gestion des effluents et de la fertilisation du sol est simplifiée mais les revenus générés par l'unité de méthanisation ne sont pas suffisants.'

Economique et financier

Messages clés

- Etat d'avancement
 - Des indicateurs agronomiques et énergétiques finalisés
 - Des indicateurs GES à finaliser notamment le lien avec l'outil DIGES3 pour l'unité de méthanisation
 - Des indicateurs socio-économiques à finaliser
- Des données à collecter assez peu nombreuses (😊) mais une réflexion à l'échelle de la rotation, pas toujours appréhendée de cette façon par les agriculteurs (😄) et besoin de contrôle de cohérence par des utilisateurs formés
- A terme, vers un outil pour la caractérisation / labellisation du biométhane produit ?

Quels impacts gaz à effet de serre des unités de méthanisation françaises en fonctionnement ?

Présentation réalisée par Hugo KECH – AILE. hugo.Kech@aile.asso.fr

Equipe projet :

- Céline LABOUBÉE – SOLAGRO. celine.laboubee@solagro.asso.fr
- Elsa ROUCHES – AAMF. erouches@aamf.fr
- Jeanne LENCAUCHEZ – AILE. jeanne.lencauchez@aile.asso.fr

Financement – ADEME. Référent Thomas EGLIN. thomas.eglin@ademe.fr



Comité de pilotage



initiatives
énergie
environnement



Création d'un outil librement téléchargeable sur la librairie ADEME

<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/6776-outil-diges-3-evaluation-environnementale-d-une-unite-de-methanisation.html>



Comité technique



France gaz
renouvelables



Chargés du déploiement de l'outil



Comité de pilotage



Logos of the steering committee: ADEME (Agence de la Transition Écologique), INRAE, Aile (initiatives énergie environnement), Association Agriculteurs Méthaniseurs de France, and evea.

Comité technique




Logos of the technical committee: OFB (Office Français de la Biodiversité), France gaz renouvelables, Régions de France, AGRO TRANSFERT (RESSOURCES ET TERRITOIRES), ctbm, WWF, France Nature Environnement, GAZ RÉSEAU DISTRIBUTION FRANCE, Méthalac, and Solagro.

Objet de la présentation

Création d'un outil
librement téléchargeable
sur la librairie ADEME

<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/6776-outil-diges-3-evaluation-environnementale-d-une-unite-de-methanisation.html>



Chargés du déploiement de l'outil



Logos of the deployment partners: Aile (initiatives énergie environnement), Association Agriculteurs Méthaniseurs de France, Solagro, République Française (Liberté Égalité Fraternité), and ADEME (Agence de la Transition Écologique).

100 bilans réalisés

Les chiffres clés des unités enquêtées

102 bilans ont été réalisés

81 retenus dans cette présentation

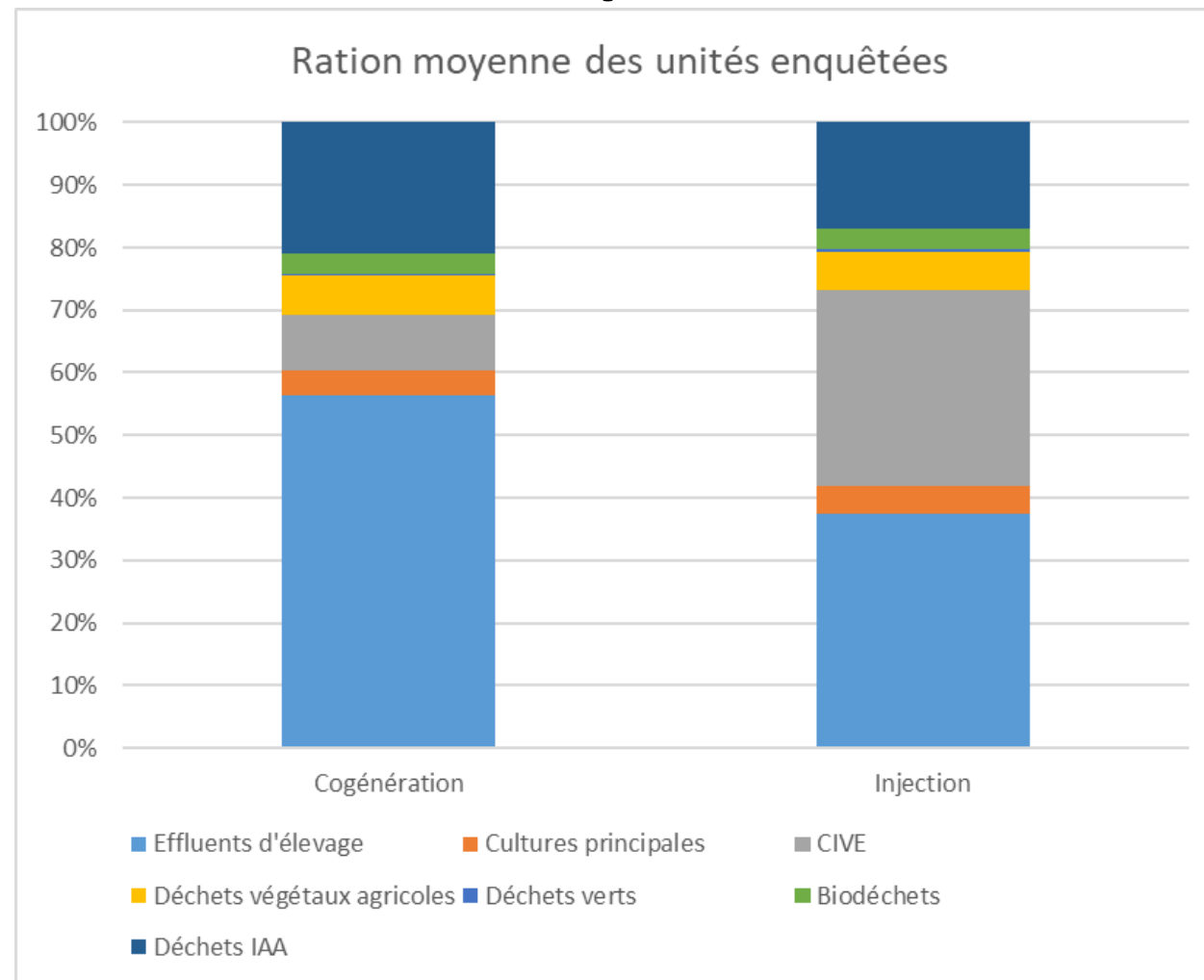
- 28 en cogénération
- 53 en injection

Typologie agricole ou territoriale, hors petite méthanisation

Moyenne tonnage :

- Cogénération ≈ 15 000 t MB
- Injection ≈ 24 000 t MB

11 régions différentes



Le bilan gaz à effet de serre

ÉMISSIONS **ADDITIONNELLES**



ÉMISSIONS **ÉVITÉES**

COMPARAISON À UN SCÉNARIO DE
RÉFÉRENCE

Scénario de référence cogénération = le mix électrique français
Scénario de référence injection = utilisation de gaz naturel

Non exhaustif les
principales

Les émissions considérées

ADDITIONNELLES



Construction (béton, métal, carburant,
etc.)



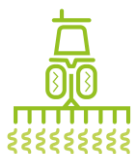
Energie pour fonctionner



Carburant pour les transports des
matières et la production des cultures
méthanisées



Fuites de biogaz du process
Emissions au stockage de digestat



Emissions à l'épandage de digestat

ÉVITÉES



Substitution
d'énergie fossile ou
fissile

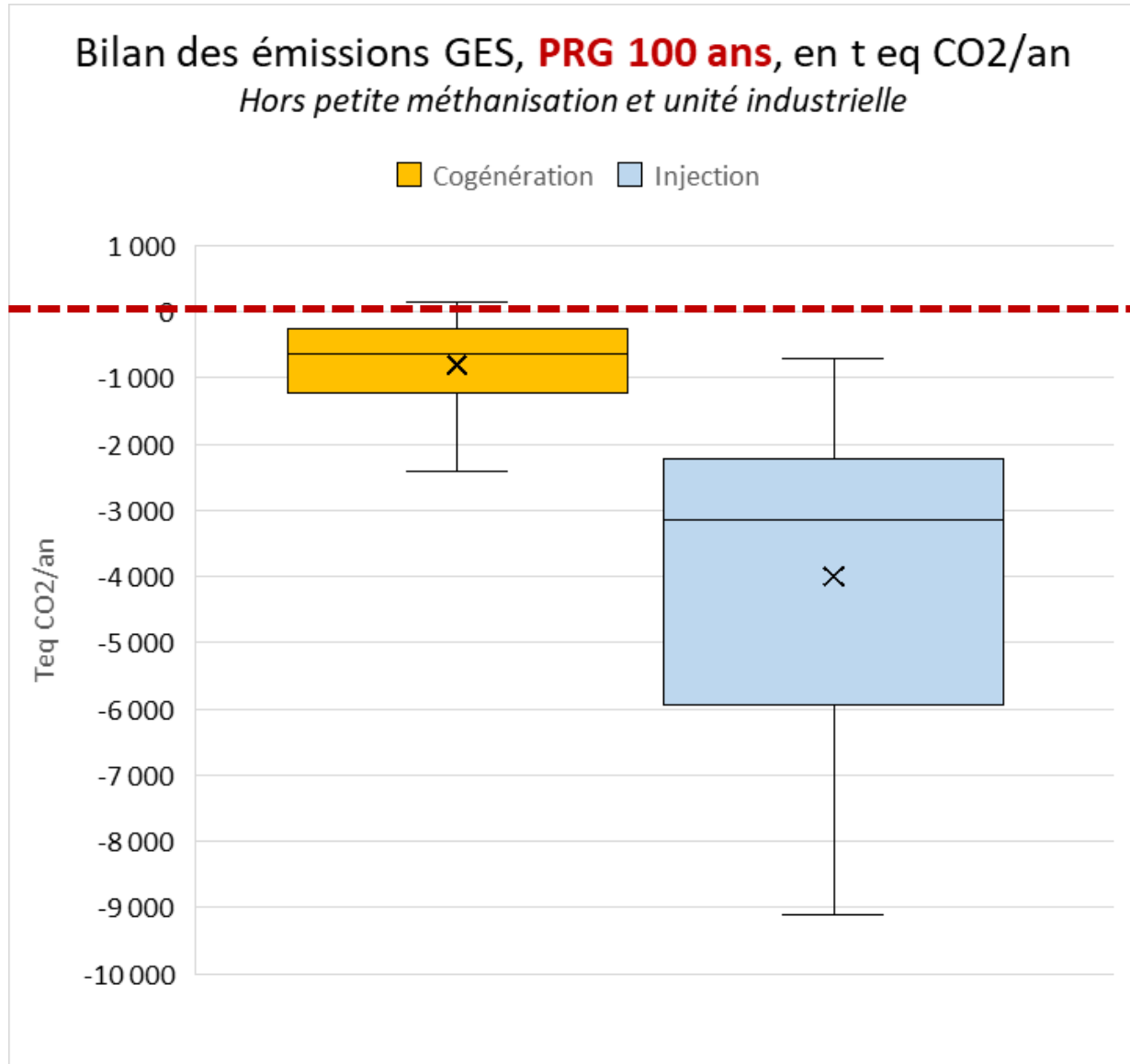


Emissions de la gestion des
effluents d'élevage au stockage
et des autres déchets



Substitution
d'engrais minéraux

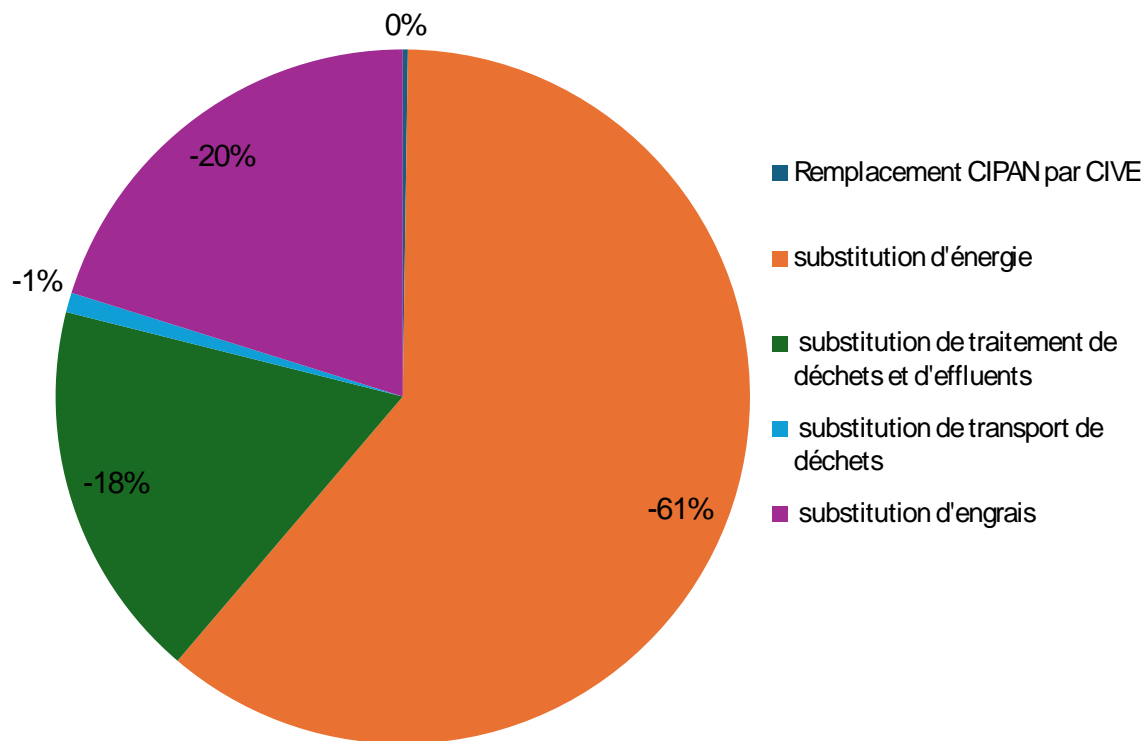
Les bilans à 100 ans des unités enquêtées



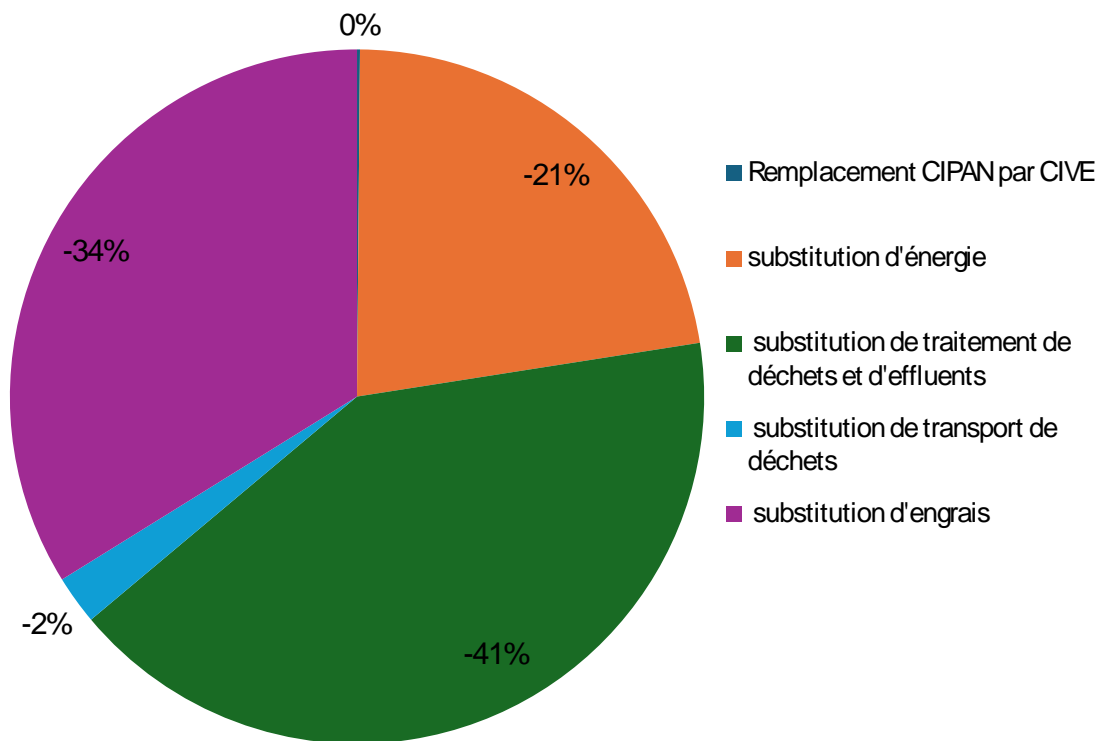
- 100 % des unités en injection et 93 % des unités en cogénération de l'échantillon étudié ont des bilans GES négatifs
- Même dans un mix électrique français bas carbone, la cogénération est pleinement concurrentielle avec en moyenne **≈ 900 t eq CO₂ évitées par unité**
- Les unités en injection ont un bilan GES moyen **≈ 3 900 t eq CO₂ évitées**

Les émissions évitées

Évités à 100 ans en Injection

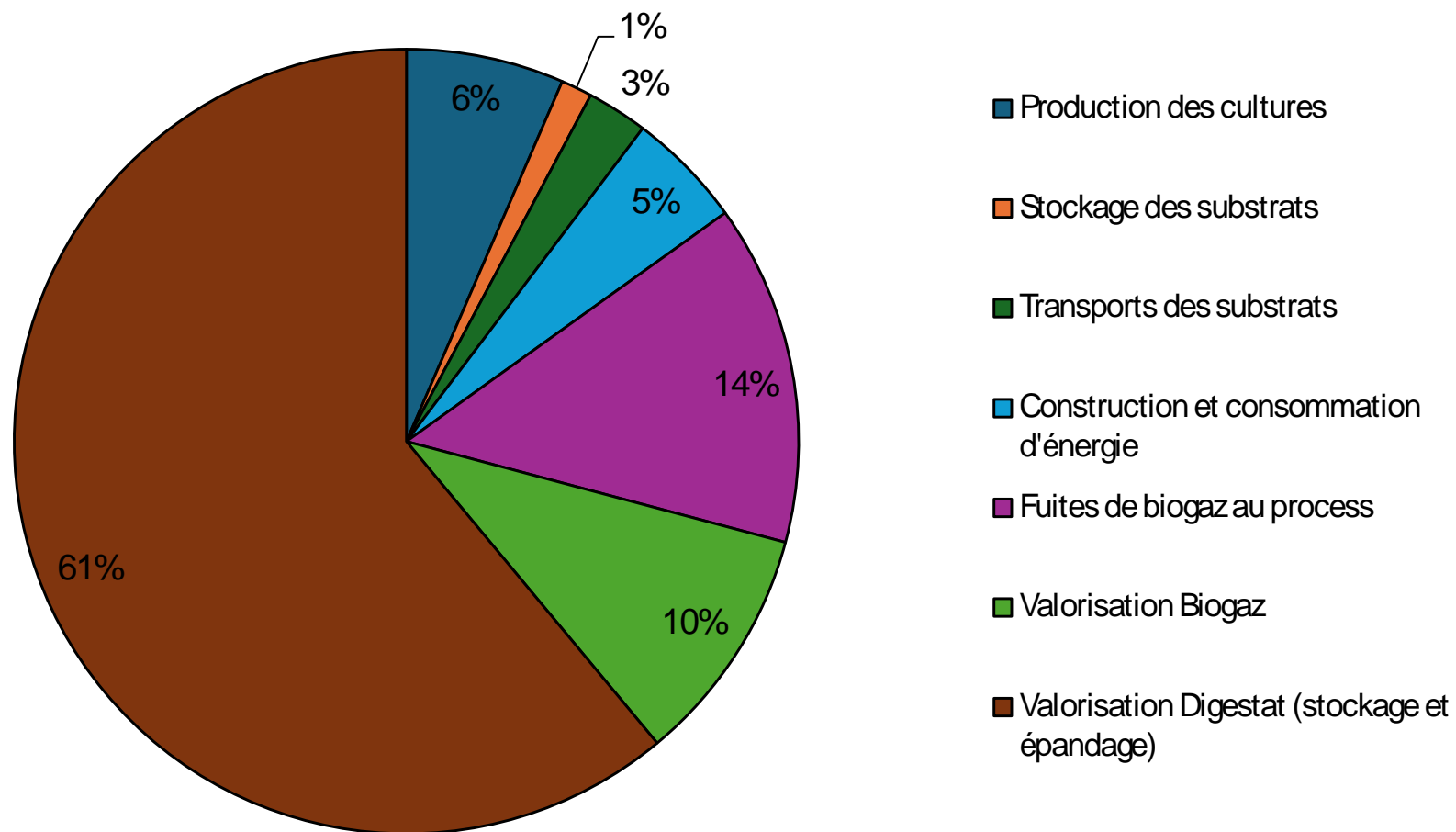


Évités à 100 ans en Cogénération

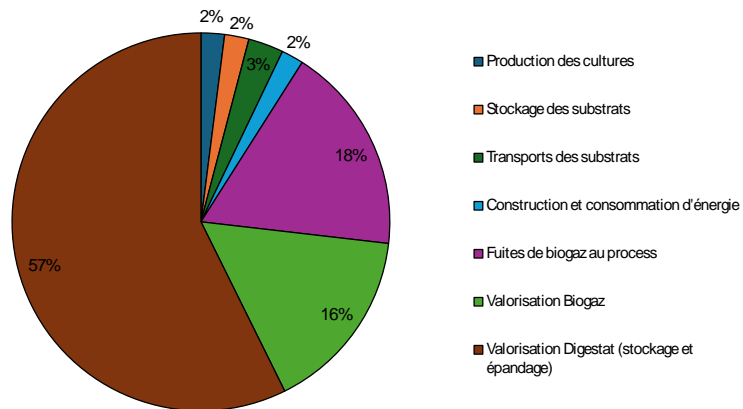


Les émissions additionnelles

Emission additionnelles à 100 ans en Injection



Emission additionnelles à 100 ans en cogénération



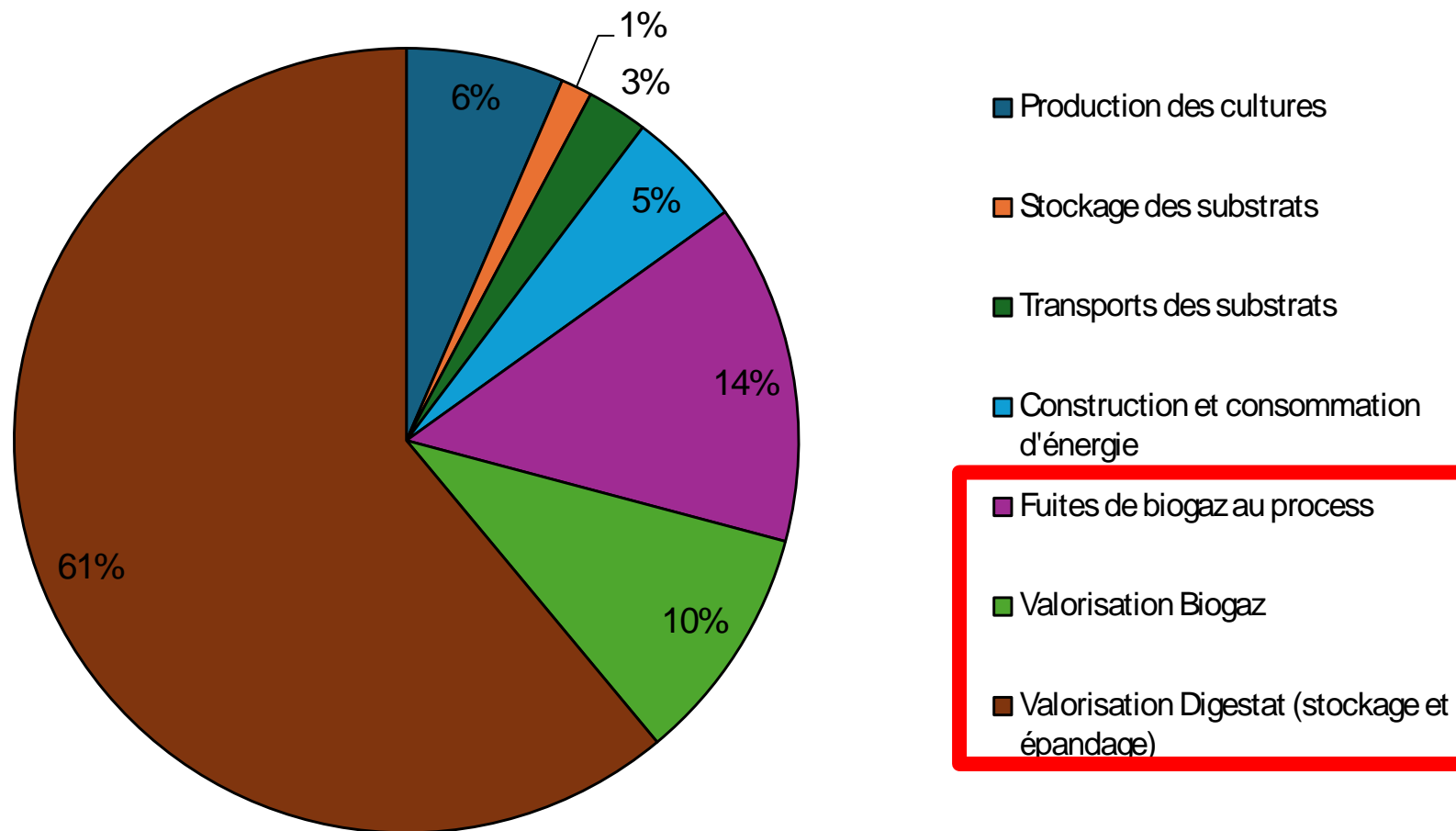
Les émissions additionnelles

85 % des émissions additionnelles sont imputées à 3 postes d'émissions



Ce que l'on voit
(transport, production des cultures, etc.), ce n'est pas ce qui compte vraiment

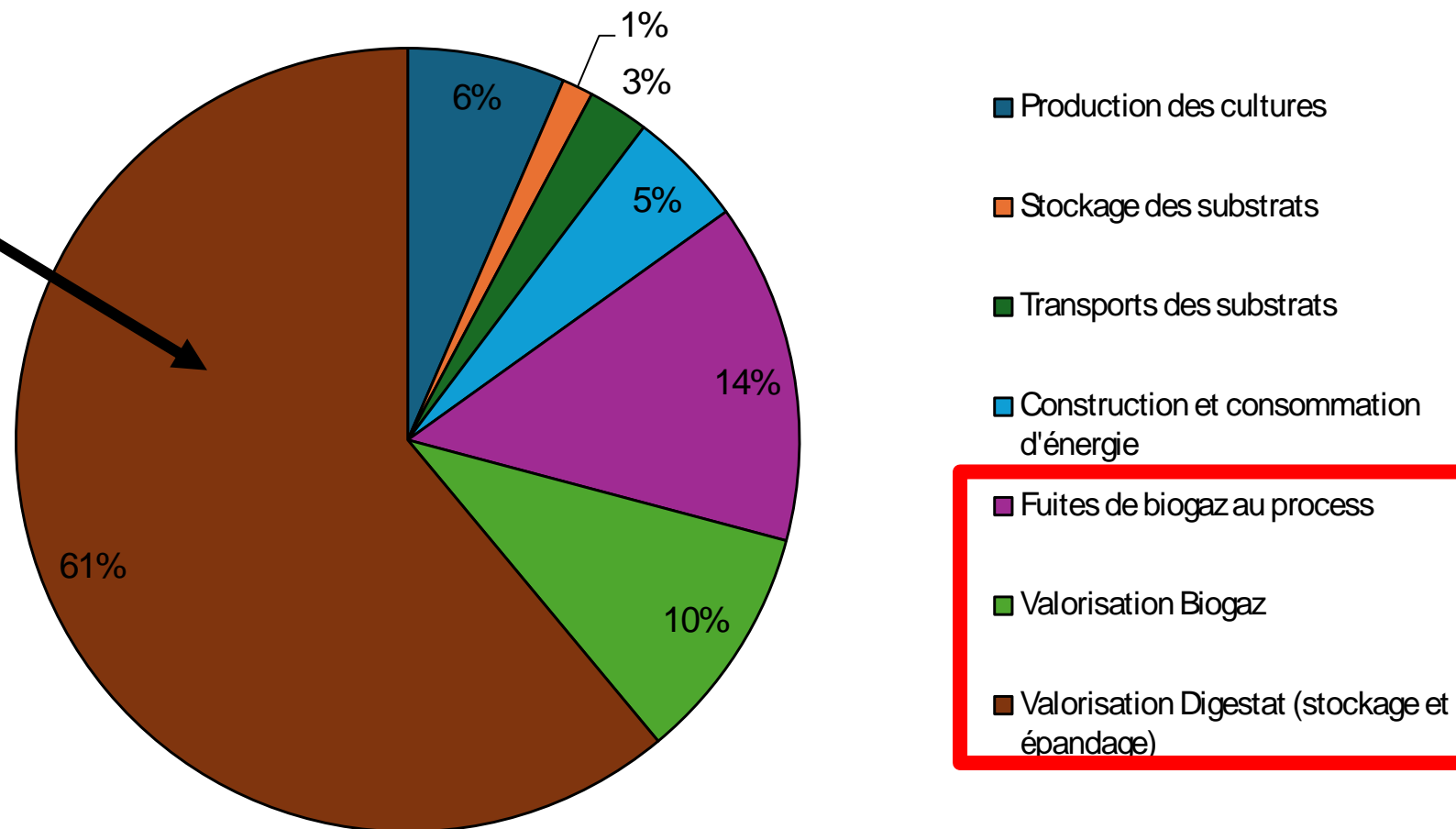
Emission additionnelles à 100 ans en Injection



Les émissions additionnelles

Emission additionnelles à 100 ans en Injection

Emissions de **CH₄** au stockage du digestat + Emissions de **N₂O** à l'épandage

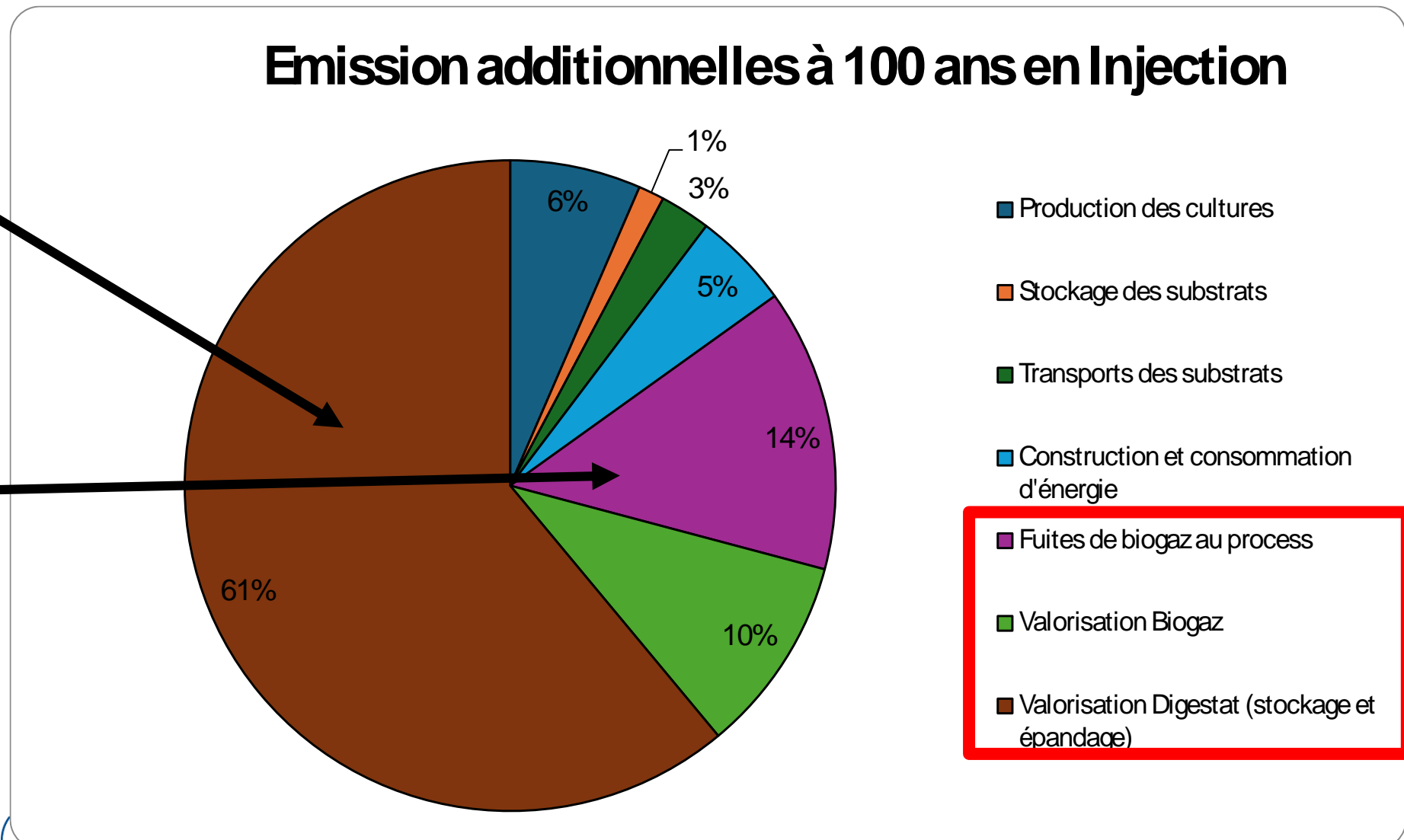


Les émissions additionnelles

Emission additionnelles à 100 ans en Injection

Emissions de **CH₄** au stockage du digestat + Emissions de **N₂O** à l'épandage

Emissions de **CH₄** par les fuites de biogaz



- Production des cultures
- Stockage des substrats
- Transports des substrats
- Construction et consommation d'énergie
- Fuites de biogaz au process
- Valorisation Biogaz
- Valorisation Digestat (stockage et épandage)

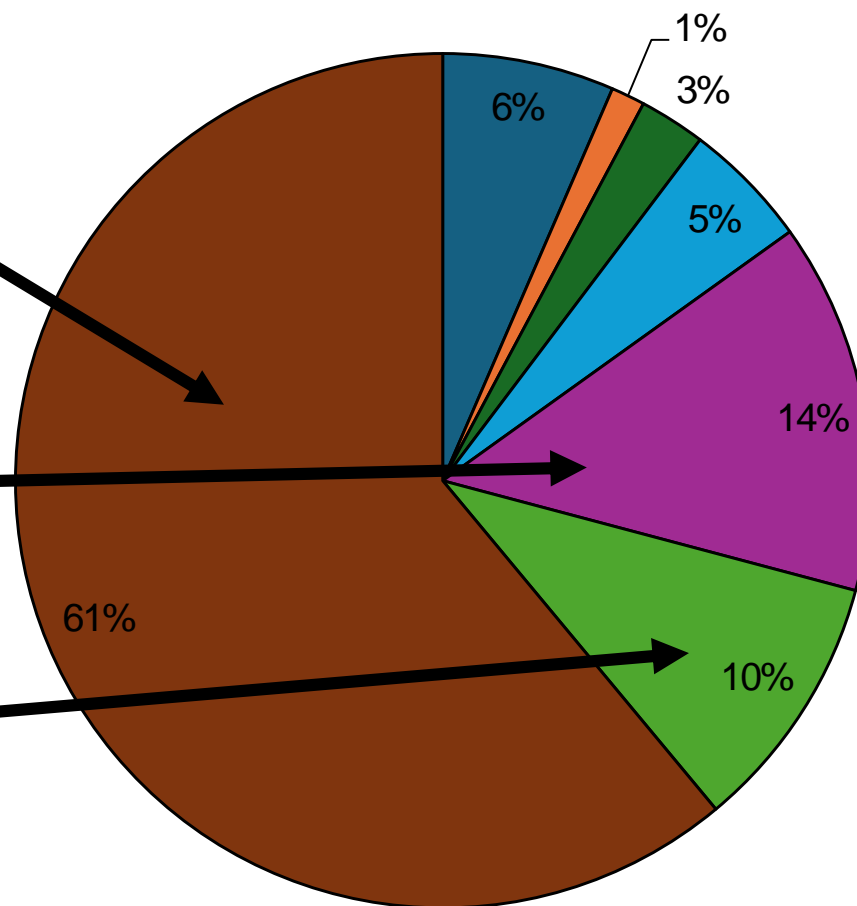
Les émissions additionnelles

Emission additionnelles à 100 ans en Injection

Emissions de **CH₄** au stockage du digestat + Emissions de **N₂O** à l'épandage

Emissions de **CH₄** par les fuites de biogaz

Emissions de **CH₄** à l'épuration

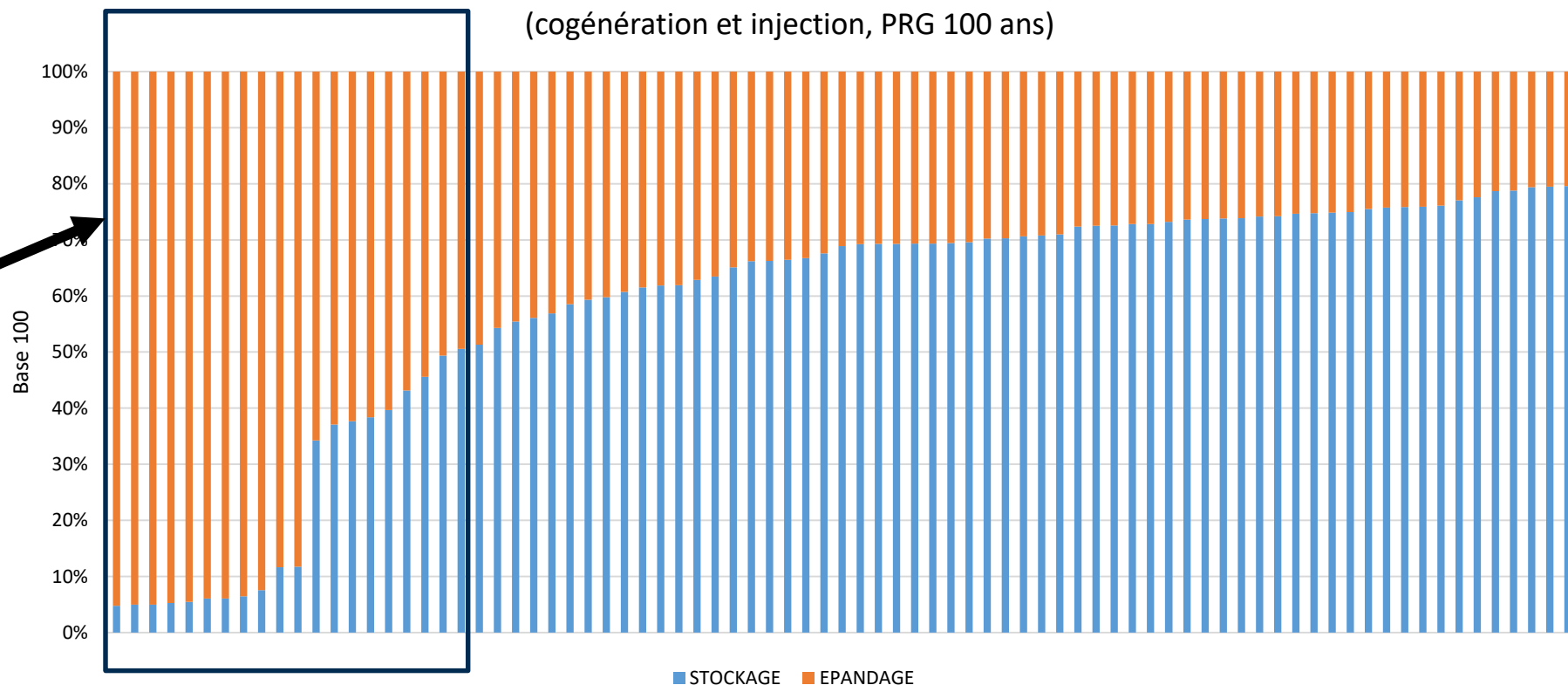


- Production des cultures
- Stockage des substrats
- Transports des substrats
- Construction et consommation d'énergie
- Fuites de biogaz au process
- Valorisation Biogaz
- Valorisation Digestat (stockage et épandage)

Focus sur les émissions liées à la gestion du digestat

Répartition des émissions de la gestion du digestat
(cogénération et injection, PRG 100 ans)

Stockage avec
récupération de
biogaz total ou
partiel



Ce que l'on retient des émissions additionnelles

Priorité 1 ++

GESTION DU DIGESTAT

Avoir une couverture avec récupération de biogaz au stockage

Pour l'injection, ordre de grandeur de réduction des émissions **additionnelles** pour les sites équipés de stockeur tout ou partie couvert avec récupération de biogaz $\approx 40\%$

Ce que l'on retient des émissions additionnelles

Priorité 1 ++

GESTION DU DIGESTAT

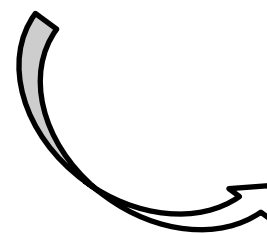
Avoir une couverture avec récupération de biogaz au stockage

Priorité 2a

GESTION DES FUITES

Faire passer une caméra de détection suite au moins 1x/an
Equiper (et former et étalonner) les sites avec des renifleurs biogaz dans une détection au moins une fois par semaine

Des fiches conseils pratico-pratiques pour savoir où chercher des fuites sur son site



UN PROJET DE RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT
POUR MIEUX QUANTIFIER
LES ÉMISSIONS FUGITIVES DE BIOGAZ EN MÉTHANISATION

<https://nextcloud.inrae.fr/s/CHn3Ken4oReaCJC>



Ce que l'on retient des émissions additionnelles

Priorité 1 ++

GESTION DU DIGESTAT

Avoir une couverture avec récupération de biogaz au stockage

Priorité 2a

GESTION DES FUITES

Faire passer une caméra de détection suite au moins 1x/an
Equiper (et former et étalonner) les sites avec des renifleurs biogaz dans une détection au moins une fois par semaine

Les fuites potentielles au niveau des organes de digestion sont estimées par DIGES selon les pratiques des exploitants

- En cogénération : 2,1 % de fuites
- En injection : 1,5 % de fuites

(En % du biogaz produit)

Les niveaux de fuites ci-dessous annuleraient le bilan environnemental positif de

- En cogénération : 6,6 % de fuites additionnelles
- En injection : 13 % de fuites additionnelles



Très variable en fonction de la quantité d'effluents d'élevage !

Ce que l'on retient des émissions additionnelles

Priorité 1 ++

GESTION DU DIGESTAT

Avoir une couverture de biogaz au stockage

Priorité 2a

GESTION DES FUITES

Faire passer une caméra de détection suite au moins 1x/an
Equiper (et former et étalonner) les sites avec des renifleurs biogaz dans une détection au moins une fois par semaine

Priorité 2b

PRODUCTION DE BIOGAZ

Moins de levier (rendement épuratoire et gaz imbrulés cogénération)
Sauf pour les sites en injection avec des épurateurs PSA (rendement 96-98 %)
Sauf pour les sites avec des torchères manuelles

Ce que l'on retient des émissions additionnelles

Priorité 1 ++

GESTION DU DIGESTAT

Avoir une couverture de biogaz au stockage

Priorité 2a

GESTION DES FUITES

Faire passer une caméra de détection suite au moins 1x/an
Equiper (et former et étalonner) les sites avec des renifleurs biogaz dans une détection au moins une fois par semaine

Priorité 2b

PRODUCTION DE BIOGAZ

Moins de levier (rendement épuratoire et gaz imbrulés cogénération)
Sauf pour les sites en injection avec des épurateurs PSA (rendement 96-98 %)
Sauf pour les sites avec des torchères manuelles

ET ENSUITE

Réduire la distance de transport, optimiser l'itinéraire cultural des CIVE, réaliser un audit énergétique, optimiser la quantité de béton sur le site, etc.

IMPORTANT : Dans les systèmes 100 % CIVE, l'optimisation de la fertilisation des CIVE est aussi une priorité 2

Quels leviers mobiliser pour aller vers plus de services écosystémiques avec la méthanisation ?

A. Besancenot^{1}, O. Therond³, O. Godinot¹, V. Parnaudeau¹, H. Kech⁴, V. Martin⁴, A. Haumont⁴, S. Menasseri¹, S. Piutti³, G. Vrignaud⁵, R. Girault²*

¹ UR OPAALE – Inrae, Rennes.

² UMR ECOSYS – Inrae, Palaiseau.

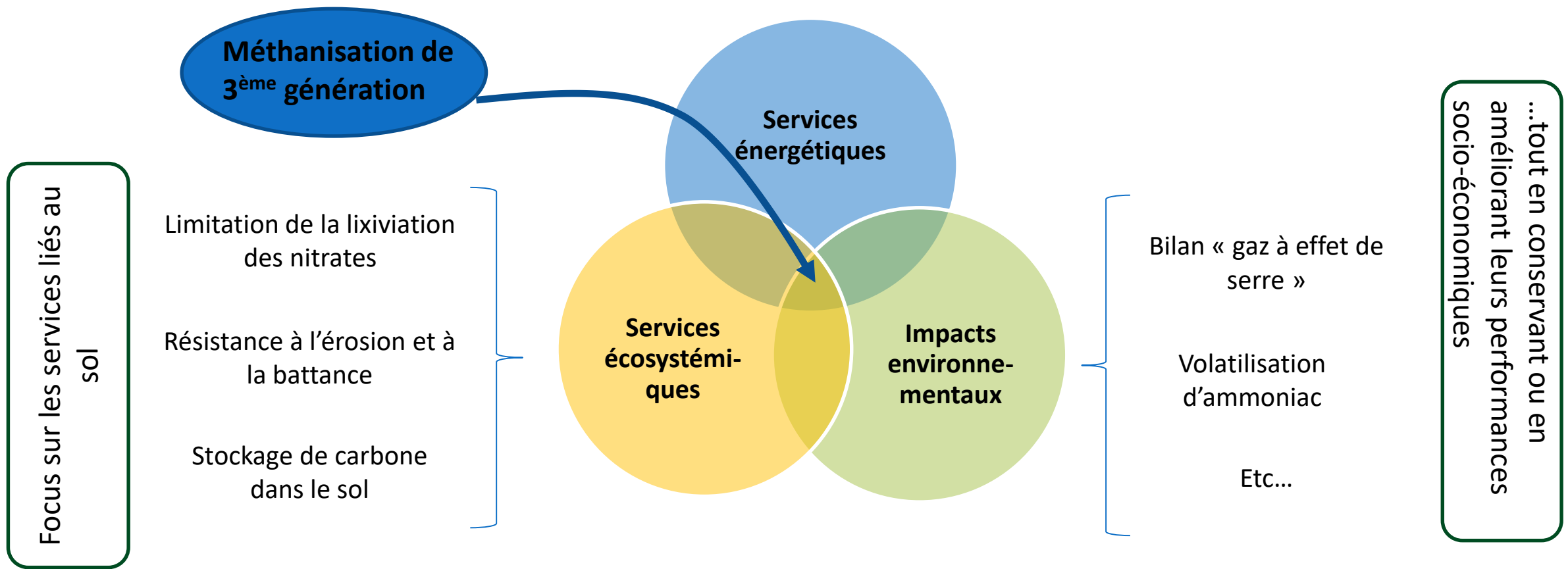
³ EnVisaGES – Methys Inrae Transfert Palaiseau.

⁴ Aile, 19b Bd Nominoë, 35740 Pacé, France

⁵ ACE Méthanisation 102 rue Camille Pelletan, 79100 Thouars, France

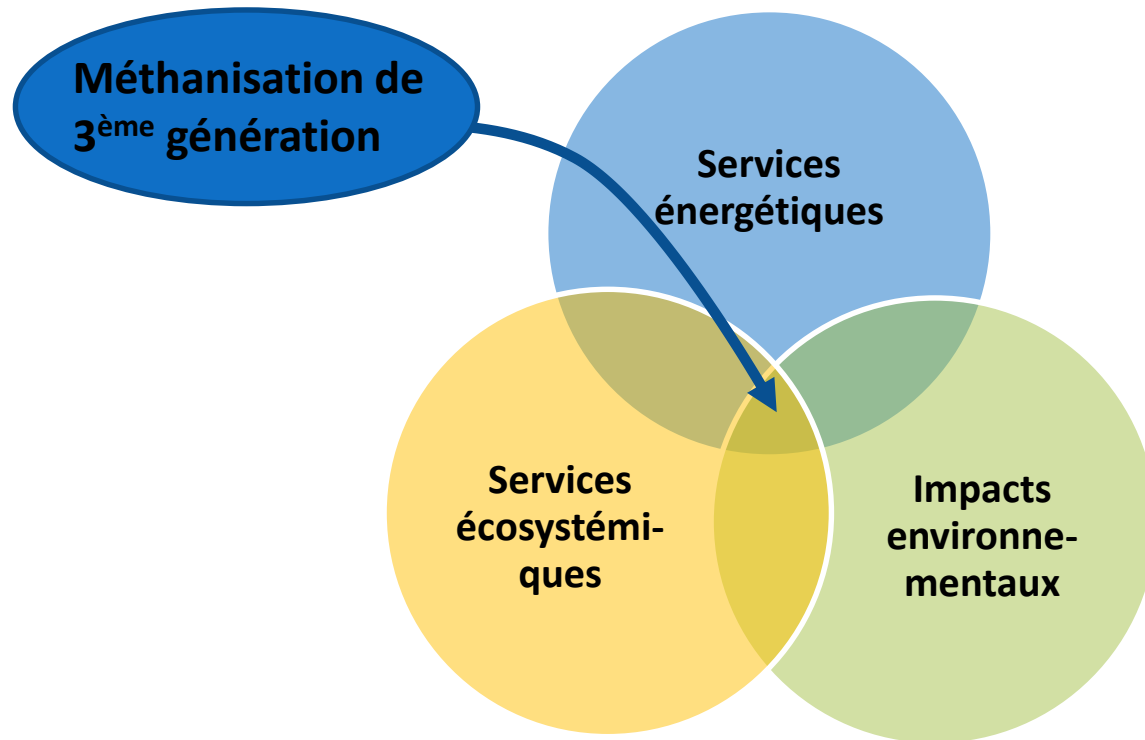
Métha3G : Concept de la 3^{ème} génération de méthaniseurs

➔ 3^{ème} génération de méthaniseurs : Une filière de méthanisation qui optimise ses services environnementaux au même titre que sa production d'énergie (moteur de la transition agro-écologique)



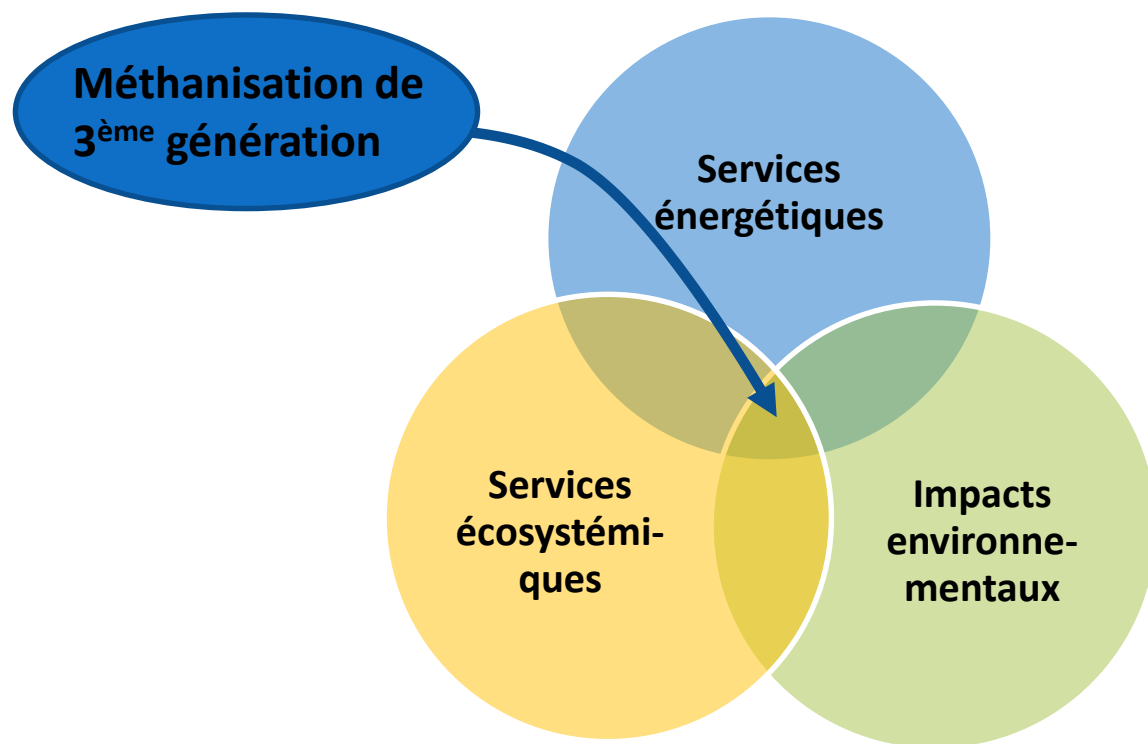
Métha3G : Concept de la 3^{ème} génération de méthaniseurs

➔ 3^{ème} génération de méthaniseurs : Une filière de méthanisation qui optimise ses services environnementaux au même titre que sa production d'énergie (moteur de la transition agro-écologique)



Métha3G : Concept de la 3^{ème} génération de méthaniseurs

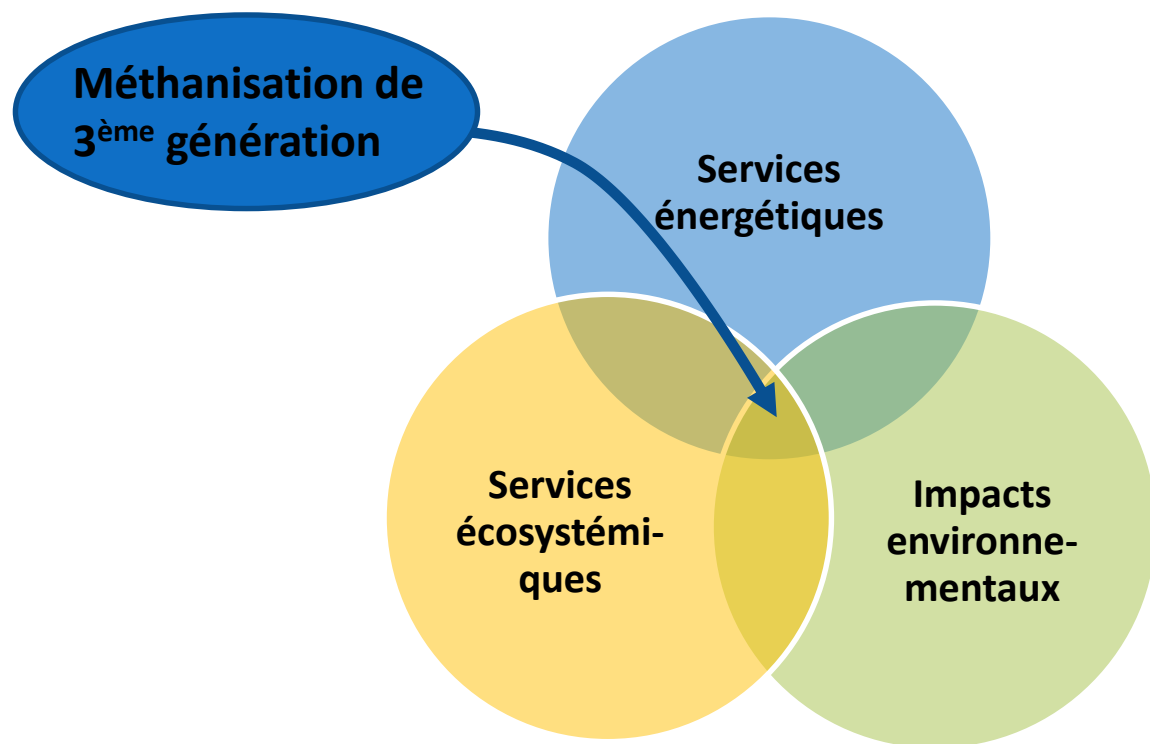
➔ 3^{ème} génération de méthaniseurs : Une filière de méthanisation qui optimise ses services environnementaux au même titre que sa production d'énergie (moteur de la transition agro-écologique)



Généré grâce à Le Chat©

Métha3G : Concept de la 3^{ème} génération de méthaniseurs

➔ 3^{ème} génération de méthaniseurs : Une filière de méthanisation qui optimise ses services environnementaux au même titre que sa production d'énergie (moteur de la transition agro-écologique)



Généré grâce à Le Chat©

Un concept qui existe déjà chez certains pionniers !

Objectifs et choix méthodologiques

Identification et caractérisation des **pratiques innovantes** développées sur le terrain, notamment chez les agriculteurs.

Acquisition des connaissances manquantes pour caractériser **l'effet d'un panel de pratiques** sur : lessivage des nitrates, stabilité structurale des sols, stockage du carbone.

Evaluation de l'effet de scénarios de méthanisation déployant certaines de ces pratiques à l'échelle parcellaire et à l'échelle de deux territoires.

Enquêtes

Mobilisation de groupes d'agriculteurs

Suivis de parcelles en conditions réelles chez des agriculteurs volontaires

Construction de scénarios

Utilisation de l'outil de modélisation Maelia (effet long terme, changement d'échelle...)

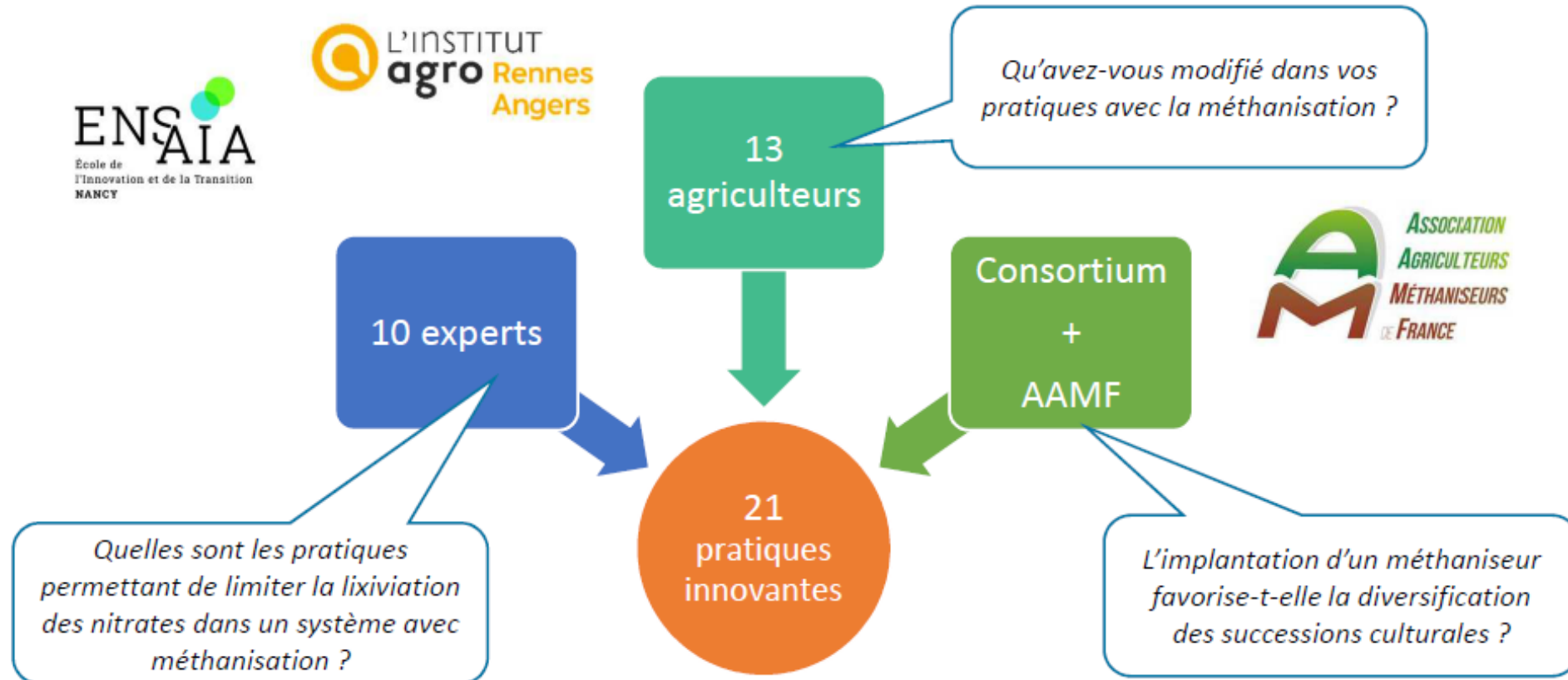
Analyse économique

Projet de 3 années (2021-2024)

Identification des pratiques innovantes visant à aller vers plus de services écosystémiques avec la méthanisation

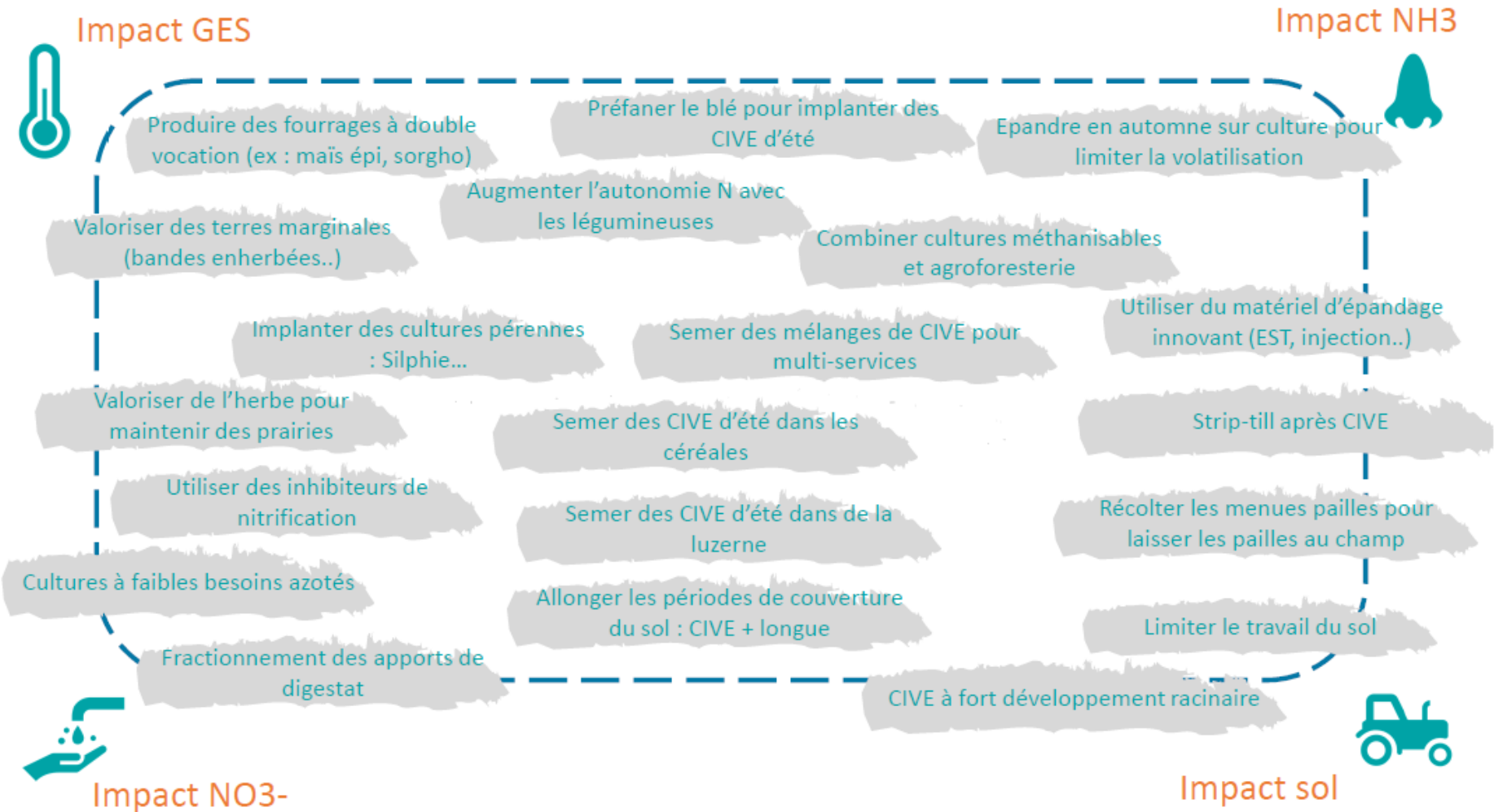
Enquêtes - étudiants

Ateliers de travail



Identification des pratiques innovantes visant à aller vers plus de services écosystémiques avec la méthanisation

Amélioration de pratiques existantes



Valorisation par la méthanisation de systèmes agricoles qui ont prouvé les performances environnementales dans d'autres contextes

Identification des pratiques innovantes visant à aller vers plus de services écosystémiques avec la méthanisation

4 familles de pratiques prioritisées



Valoriser des prairies et cultures pérennes



Produire des CIVEs multi-services



Améliorer l'autonomie azotée

Combiner méthanisation et ACS

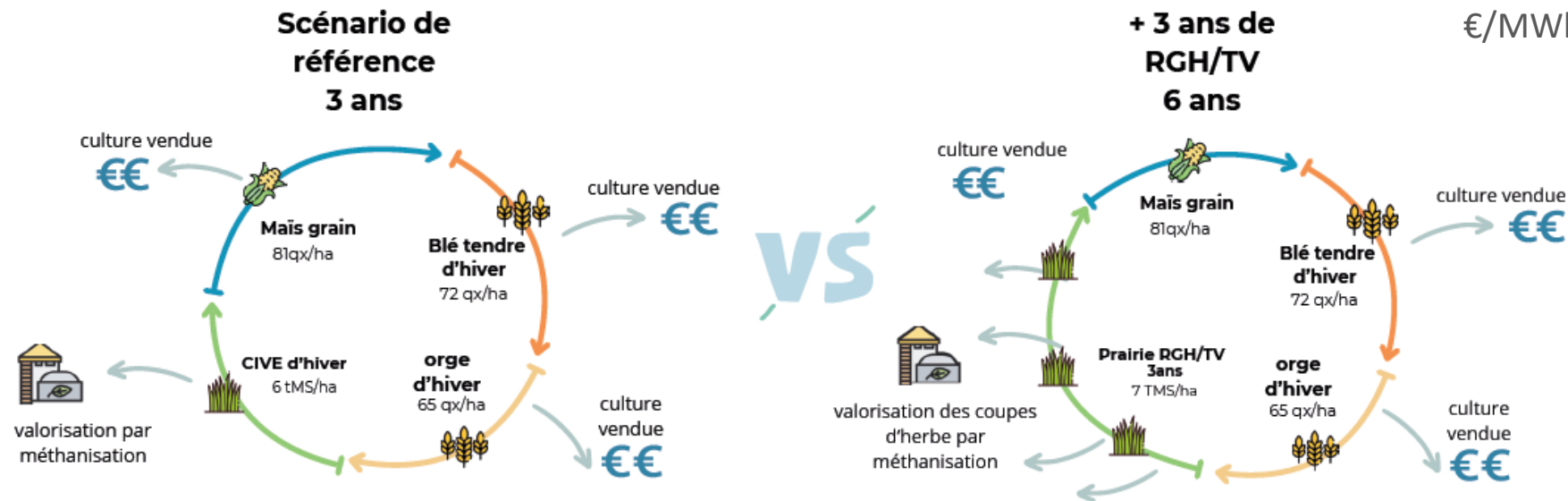
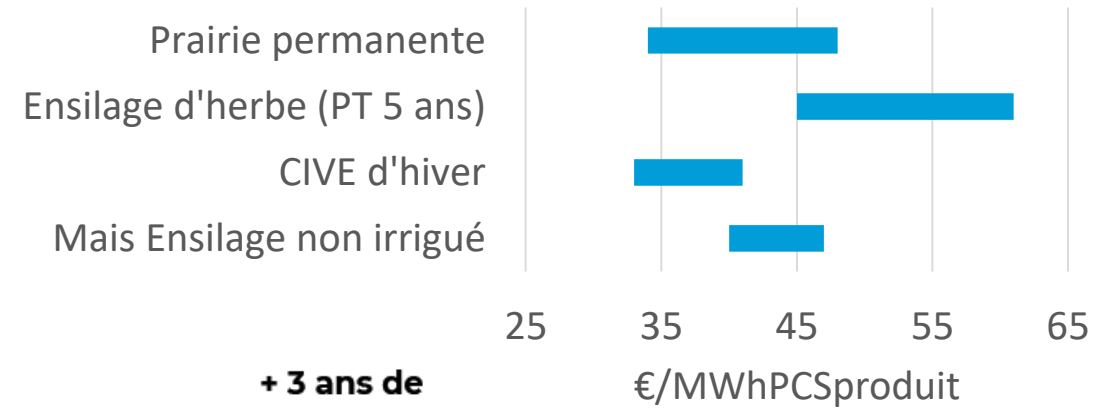


Exemple de pratique documentée

➔ Réintroduction ou maintien de prairies :

- Maintien des surfaces en prairies en zone de déprise de l'élevage
- Débouché économique pour une réintroduction en zone céréalière
- Zones à forts enjeux environnementaux

Coût de production rendu silo



Marge semi-nette

477€/ha/an

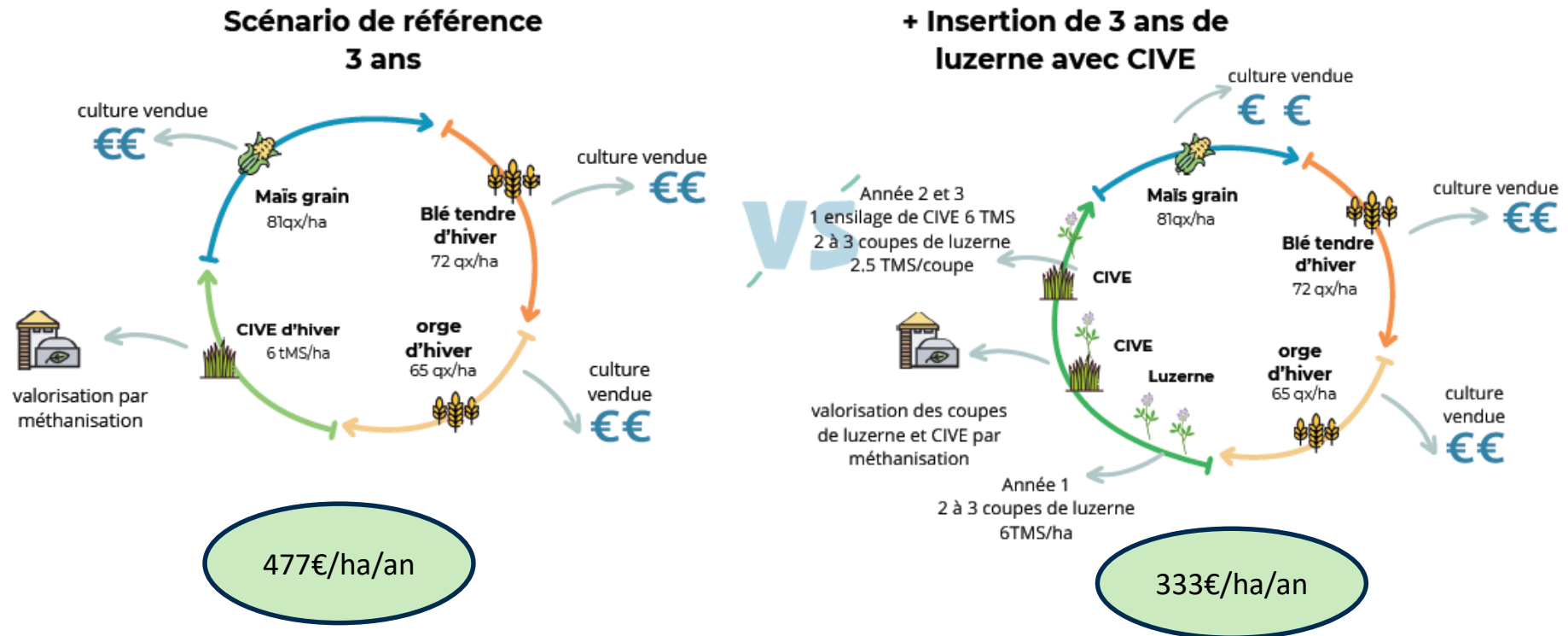
443€/ha/an

Exemple de pratique documentée



Luzerne après récolte de cive (G. Vrignaud)

- ➔ Réintroduction d'une légumineuse pérenne couplée à une cive en sur-semis :
- Objectif de développement de l'autonomie azotée du système avec utilisation du digestat pour transfert de fertilité.



➔ Nécessite une compensation ou bien un couplage avec une valorisation de la luzerne en élevage ou déshydratation

Quel effet du déploiement des pratiques innovantes à l'échelle de territoires agricoles?

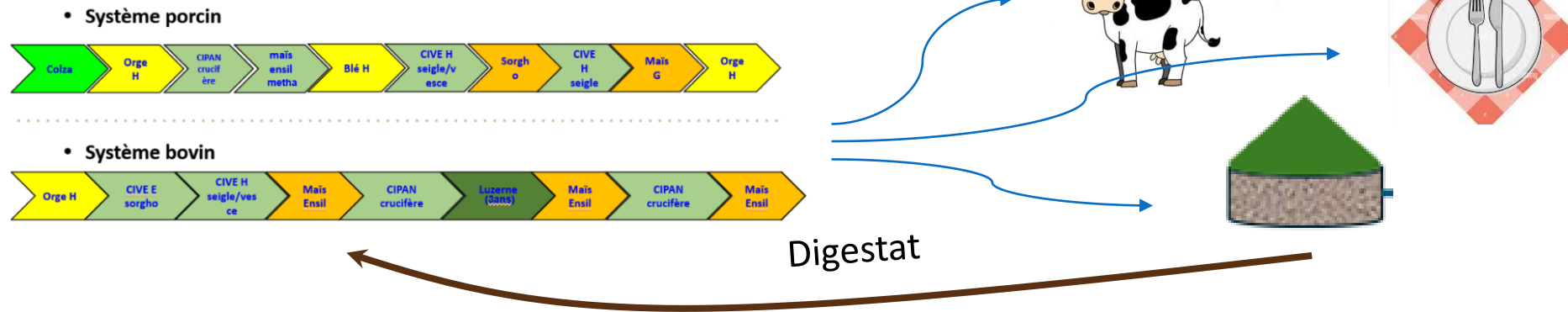


Deux territoires agricoles contrastés :

- Un territoire d'élevage (bovin princ.) du Grand-Ouest
- Un territoire de polyculture-élevage (élevage en déprise) du Grand-Est



Atelier pour concevoir des évolutions de rotations avec des objectifs de maximisation des services écosystémiques



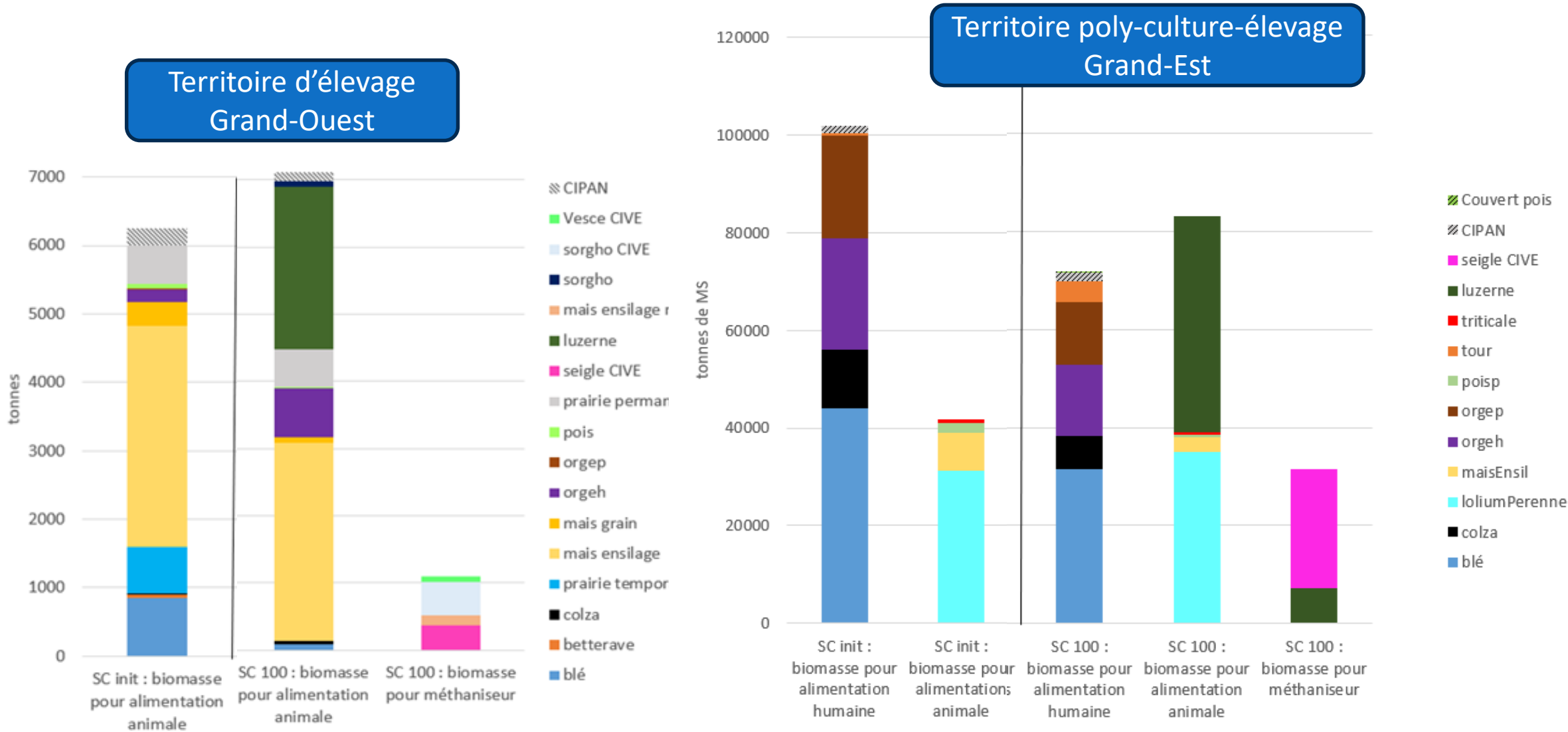
Evaluation de l'effet de différents scénarios de déploiement avec une plateforme de modélisation et d'évaluation intégrée des territoires agricoles et des systèmes de bioéconomie territorialisés.

Leviers mobilisés pour la conception de nouvelles successions

	Un territoire d'élevage (bovin princ.) du Grand- Ouest	Un territoire de polyculture- élevage (élevage en déprise) du Grand-Est
Diversification des assolements (intégrant légumineuses à graines)	✘	✘
Insertion de luzerne (3 ans) avec Cive d'hiver	✘ (Bovin)	✘
Cive associée avec légumineuse	✘	✘
Couvert d'été opportuniste pouvant devenir une Cive d'été	✘	
Couverture maximale des sols (CIPAN pendant certaines intercultures)	✘	✘
Valorisation optimisée du digestat	✘	✘
Maintien des prairies	✘	✘

Quel effet du déploiement des pratiques innovantes à l'échelle de territoires agricoles?

Evolution des fonctions de production



Quel effet du déploiement des pratiques innovantes à l'échelle de territoires agricoles?

Evolution des performances environnementales

	Territoire d'élevage Grand-Ouest	Territoire poly-culture-élevage Grand-Est
Fourniture d'azote	Baisse de 10% de la quantité totale d'azote apportée Proportion d'engrais minéraux passant de 35 à 17%	Baisse de 20% de la quantité totale d'azote apportée Proportion d'engrais minéraux passant de 94 à 66%.
Pertes par lixiviation	Pas d'effet significatif	Baisse de 30%
Pertes par volatilisation de l'ammoniac	+60% (10=>17kgN/ha/an)	+20% mais reste faible (8=>10kgN/ha/an)
Séquestration du carbone dans les sols	Pas de différence significative (insertion de cultures pérennes + Cives compensent la mobilisation des fumiers)	Diminution de la dynamique de déstockage (cultures pérennes + remplacement Civan « courtes » par CIVES.)
Effet sur les indicateurs de stabilité structurale	Neutre	Positif

Synthèse des principaux leviers et leurs effets

Principaux leviers	Autonomie azotée	Limitation du risque de lixi-viation des nitrates	Stockage de carbone dans les sols	Stabilisation de la structure des sols
Insertion de légumineuses pérennes	++	-		
CIVEs en mélange avec des légumineuses	+			
Systèmes réintroduisant ou maintenant des prairies permanentes ou temporaires (+ de 4 ans) valorisées tout ou partiellement en méthanisation		Baisse du nombre jours de sol nu		
Systèmes innovants pour optimiser la valorisation agronomique des digestats				
Modifications des successions pour aller vers une diversification et optimisation la valorisation des reliquats liés à la fertilisation avec digestats.		Baisse nombre jours de sol nu		
Aller vers une couverture permanente des sols au-delà de l'insertion de CIVEs				
Développer des systèmes permettant de coupler méthanisation et agriculture de conservation des sols.				

Merci pour votre attention !

Fiche n°2
Valoriser des prairies ou des cultures pérennes en méthanisation : rêve ou réalité ?

Fiche n°3
Utiliser la méthanisation pour aller vers une autonomie azotée de mon exploitation

Fiche n°1
Produire des CIVE en maximisant les bénéfices environnementaux

Fiche n°4
L'agriculture de conservation des sols dans un système de méthanisation

<https://aile.asso.fr/projet-rd/metha-3g/>

SOUTENU PAR :



PARTENAIRES :



METADATURA

La méthanisation agricole comme levier agroécologique dans la gestion du Datura en Nouvelle-Aquitaine

M. Heredia¹, C. Aliaga¹, C. Lagnet³, S. Marsac²

1 ARVALIS - Institut du végétal, 21 chemin de Pau, 64121 Montardon, France

2 ARVALIS - Institut du végétal, 110 chemin de la Côte Vieille, 31450 BAZIEGE, France

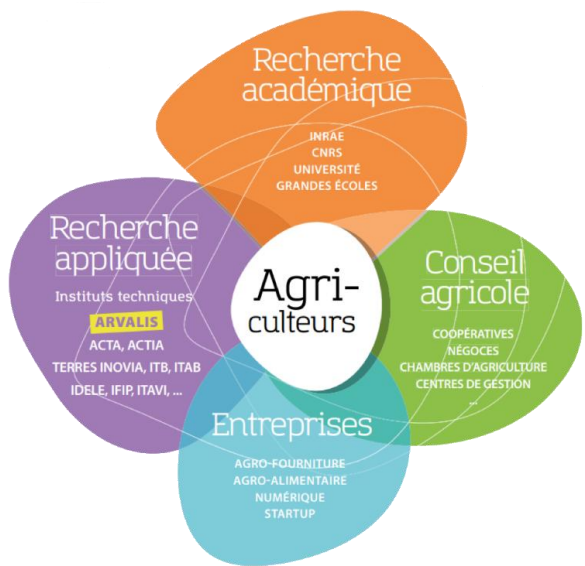
3 APESA – Pôle valorisation, 3 chemin de Sers, 64121 Montardon, France

2022/2025



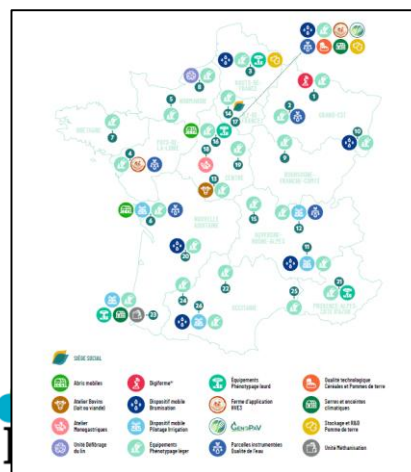
Mobiliser notre expertise pour permettre l'émergence et accompagner l'adoption de **techniques de production** et de **systèmes d'exploitation agricoles multi-performants** conciliant dans **tous les territoires de l'Hexagone** :

- **Performance économique** (productivité, rentabilité, compétitivité).
- **Adéquation aux marchés** (alimentation humaine, alimentation animale, bio-énergie, bio-matériaux...) en France et à l'international.
- **Résilience** (aux évolutions réglementaires, économiques et aléas climatiques).
- **Contribution positive aux enjeux de l'environnement et de la biodiversité** (réduction des intrants, sobriété en eau, stockage du carbone, services éco-systémiques).



440

collaborateurs



Plus de
1600
essais agronomiques
représentant
100 000 micro-parcelles



50
COLLABORATEURS

3,5 M€
DE CA EN 2023

DEPUIS
1995

ACCOMPAGNER LES ORGANISATIONS DANS LEURS PROJETS DE TRANSITIONS SUR LES PLANS ENVIRONNEMENTAL, SOCIAL ET ÉCONOMIQUE

- le **conseiller réglementaire du quotidien** en matière de SSE (Santé, Sécurité & Environnement),
- le **maître d'œuvre des transitions** environnementales et socio-économiques,
- l'**accélérateur de solutions technologiques** de valorisation de bioressources.



PÔLE VALORISATION

Procédés biologiques de valorisation des déchets, biomasses et effluents

Pour le développement de vos projets et de vos solutions innovantes et soutenables dans le domaine de la valorisation des déchets, biomasses et effluents.

NOTRE OFFRE

- Analyses spécialisées
- Prestations pilotes et expérimentations
- Expertise et Conseil
- Formation
- R&D appliquée



METHANISATION
METHANATION



COMPOSTAGE



EFFLUENTS
MICROALGUES



MATERIAUX
BIODEGRADABLES

NOS CLIENTS

- Porteurs de projets
- Agriculteurs et industriels
- Bureaux d'études
- Financeurs
- Constructeurs
- Collectivités



PLATEFORME EXPÉRIMENTALE DE 1 000 M²

Gisements : **BMP**, Flash BMP, inertes, biodégradabilité emballages

Pilote de méthanisation et méthanation (15 pilotes de 5 à 500L, toutes technologies) : recherche de ration optimale, validation de dimensionnement et performances, étude inhibitions, ...



METHANISATION
METHANATION

Qualité des **digestats**

Suivi **biologique** des unités

Etude et conseil, projets de **R&D**

Formations « initiation à la méthanisation » et « suivi biologique »





PÔLE DE COMPÉTENCES SUR LA MÉTHANISATION AGRICOLE



Pôle de compétences dédié à la Méthanisation ET à l'Agronomie



3 outils

pour un continuum unique de l'échelle du laboratoire jusqu'à l'échelle préindustrielle à la fois sur la Méthanisation et l'Agronomie



Laboratoire spécialisé pour la méthanisation depuis 20 ans

Plateforme expérimentale
1 000 m²
Laboratoires, outils analytiques de pointe
Et réacteurs pilotes pour pré-validation, faisabilité



Unité expérimentale : un outil maniable MAIS représentatif

Méthaniseur expérimental
150m³
Méthaniseur psychrophile
Nenuphar
Stockage/Séparation de phase
Cogénération

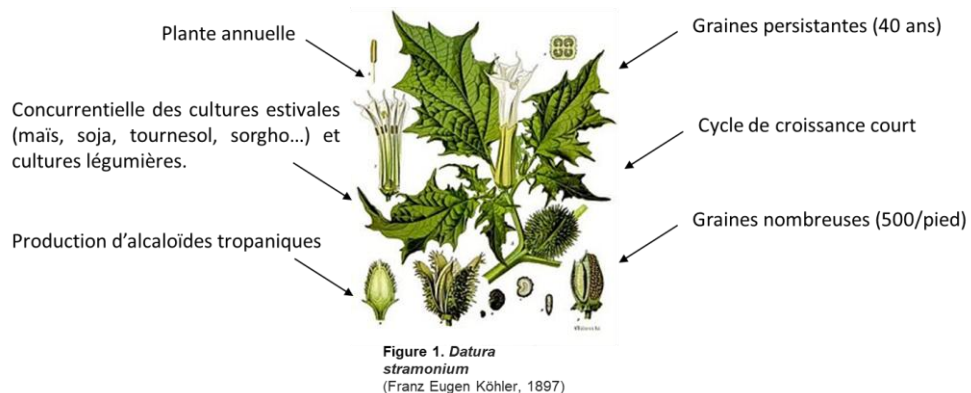


Les compétences agronomiques du plus grand institut de recherche appliqué agricole en France
Serre expérimentale
Parcelle d'essai in-situ

Avec le soutien de



Contexte du projet



Le DATURA = un fléau agricole en France

➔ **Mortel pour l'Homme /les animaux (fleur, feuille, graine, sève)**

➔ **Seuil de tolérance à la récolte abaissés ($\mu\text{g}/\text{kg}$)**

➔ **Déclassement et élimination des lots de cultures**

Comment réduire les pertes de lots, valoriser les lots contaminés ?

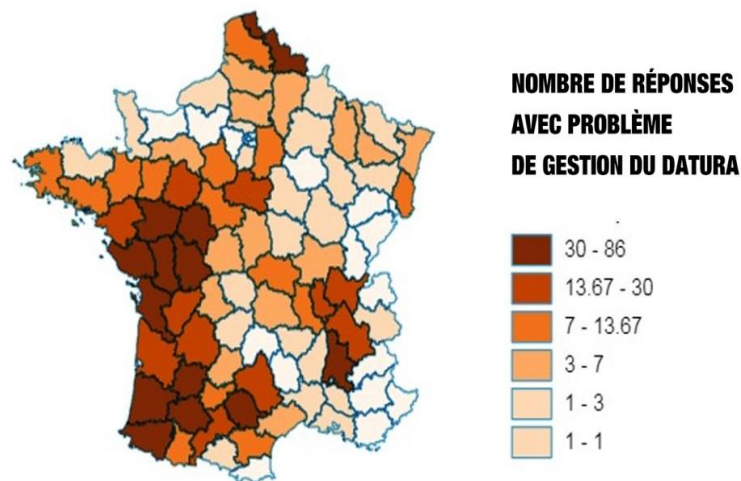


Figure 2. Enquête Arvalis 2020 chez les producteurs de grandes cultures - Occurrence du datura sur le territoire français - 1970 réponses.

- *Quelle toxicité pour le procédé : influence des alcaloïdes sur les procédés biologiques ?*
- *Quelle innocuité du digestat : nécessité d'inactiver la graine pour éviter la dissémination ?*

Aperçu global du plan expérimental mis en œuvre

DATURA vs METHA

METHA vs DATURA

Echelle paillasse



Dose max en alcaloïdes

Test de toxicité sur produits purs (batch) + analyse populations microbiennes

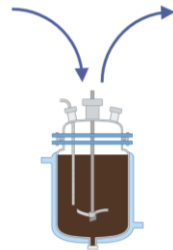
Conditions de destruction des graines (T°C, milieu, TSH, prétraitement, post compostage, ...)

Incubations batch et test Faculté Germinative + mortalité graines

Devenir des alcaloïdes des graines dans le digestat

Incubations batch et dosage alcaloïdes

Echelle pilote



Valider en conditions continues l'absence d'impact sur la méthanisation

Essais en pilotes de 20L continu avec et sans datura

Destruction des graines en conditions continues (TSH variable)

Immersion de graines à différents temps de séjour en pilote de 20L continu test FG + mortalité graines

Echelle méthaniseur préindustriel



Valider à échelle industrielle les résultats (conditions représentatives pour préparation, stockage intrants, rhéologie digestat...)

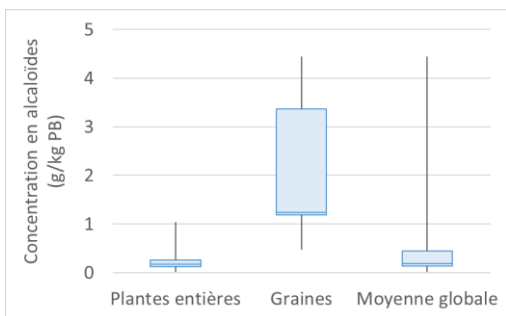
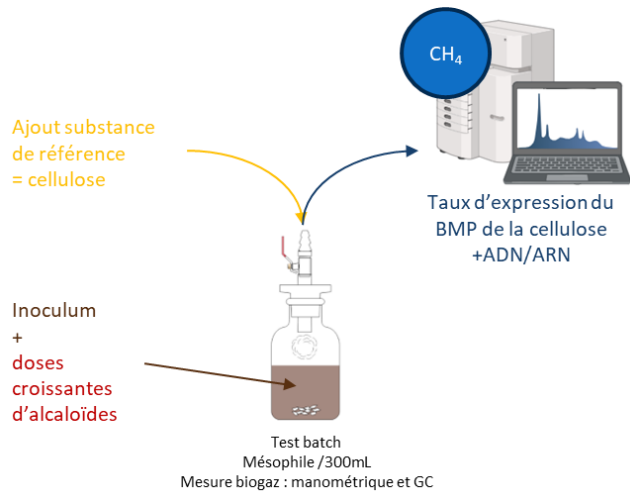
Essais en méthaniseur 150 m³

Valider à échelle industrielle les résultats (conditions représentatives pour préparation, stockage intrants, rhéologie digestat...)

Essais en méthaniseur 150 m³
Répartition graines après séparation de phase
Suivi retour au sol en essais parcelle

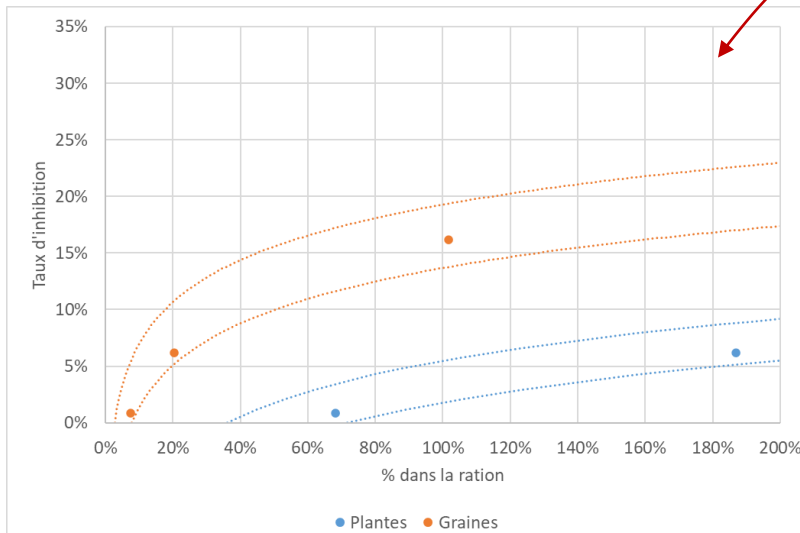
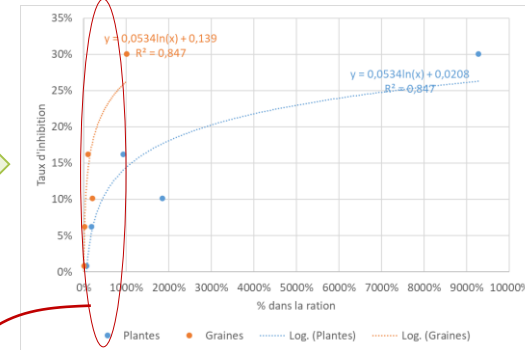
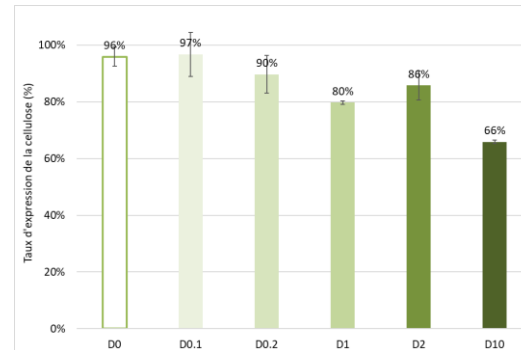
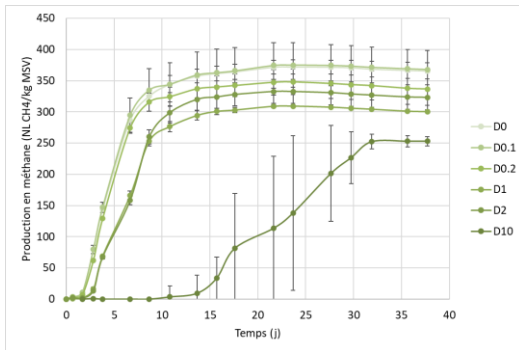
DATURA vs METHA

Essais de toxicité sur produits chimiques purs



Sources bibliographiques + mesures METADATURA

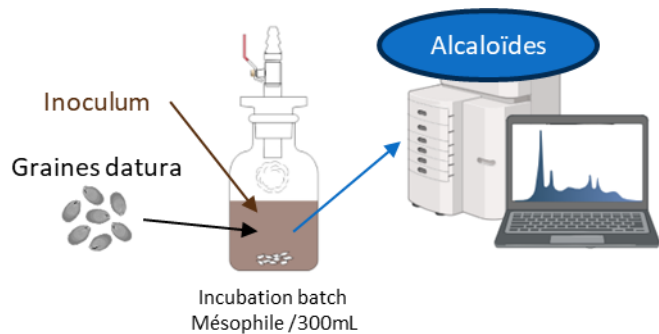
Doses	g d'alc./ L dig.	Correspondance % dans la ration	
		Graines	Plantes entières
D0,1	0,09	7%	68%
D0,2	0,25	20%	187%
D1	1,25	102%	930%
D2	2,50	203%	1853%
D10	12,49	1015%	9269%



→ Confirmation des résultats par analyses des populations microbiennes (ADN/ARN) (*en cours*)

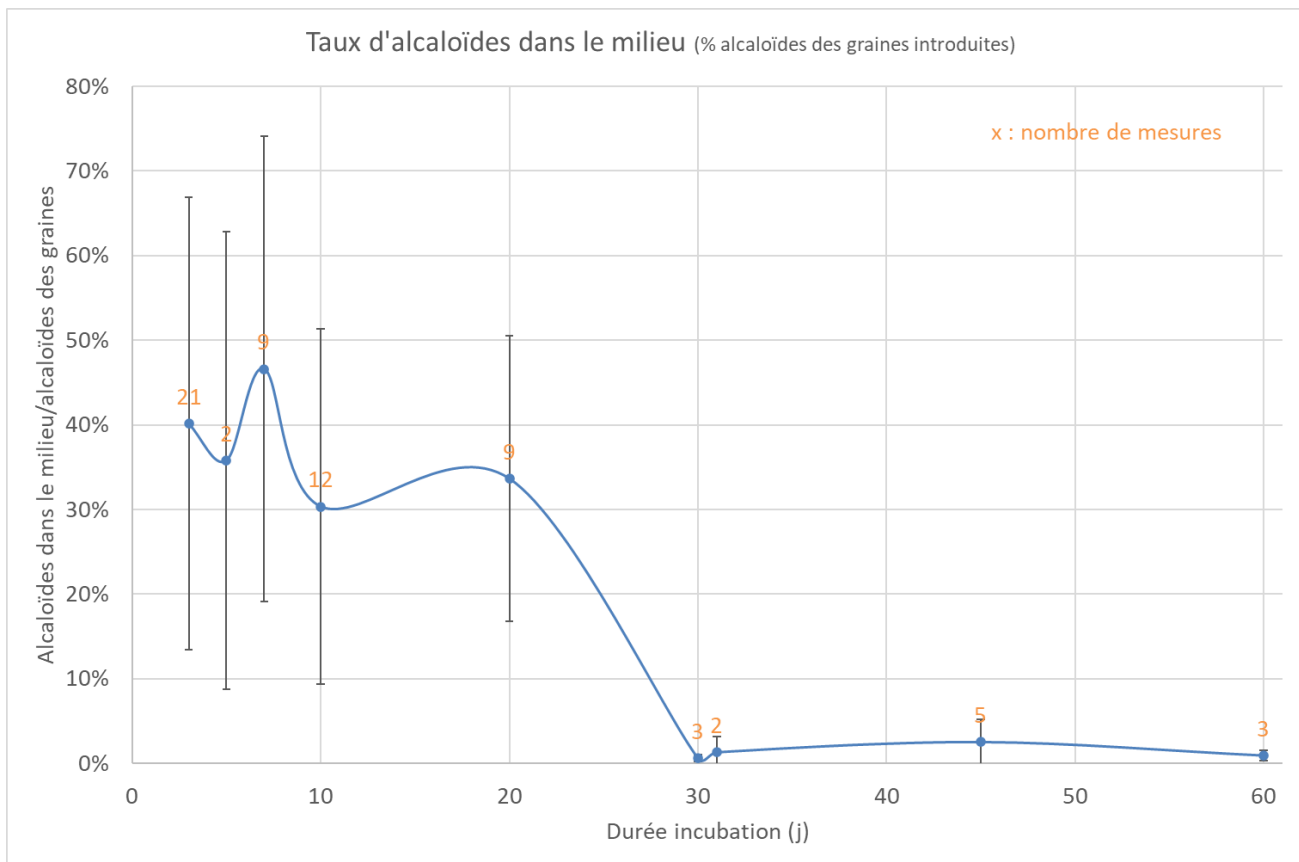
→ En protocole batch : doses non inhibitrices d'alkaloïdes jusqu'à 80/100% de la ration en plants de datura et 10/20% de graines (selon teneur en alcaloïdes des matières) → A confirmer en régime continu

PERSPECTIVES : tests sur atropine uniquement, scopolamine serait à tester + doses intermédiaires



Devenir des alcaloïdes des graines > digestat

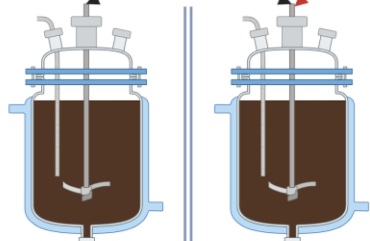
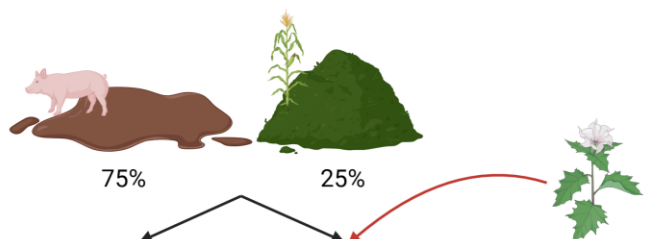
Variation : Durées,
Milieux (eau, digestats...)



- Transfert rapide des alcaloïdes des graines vers le milieu
- Cinétiques et taux max libérés (et mesurés) non répétables :
 - impact fréquence de mesure
 - impact milieu biologique, conditions physico-chimiques, ... ????
- Disparition ensuite : Dégradation ? Transformation en métabolites ?

PERSPECTIVES :

- Travailler sur la répétabilité, l'impact des milieux
- Compréhension des phénomènes de disparition



Pilotes mésophiles (39°C)
infiniment mélangé
TSH = 37j
Durée = 16 semaines (3 TSH)

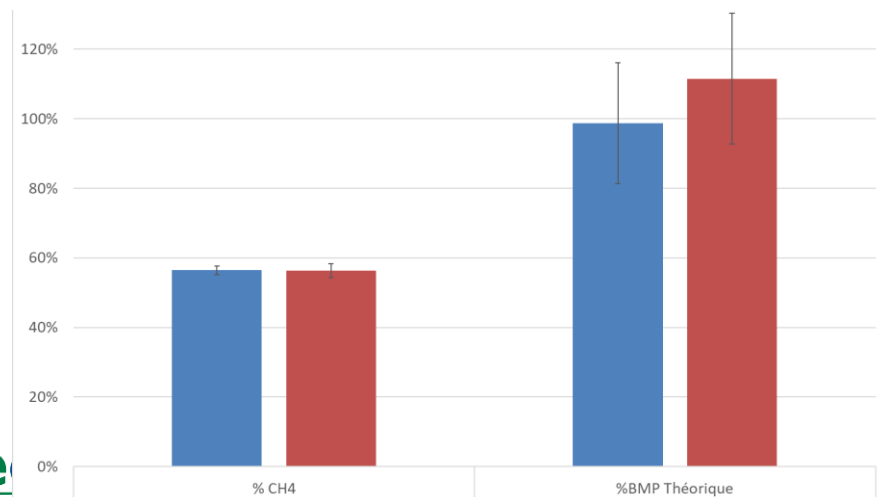
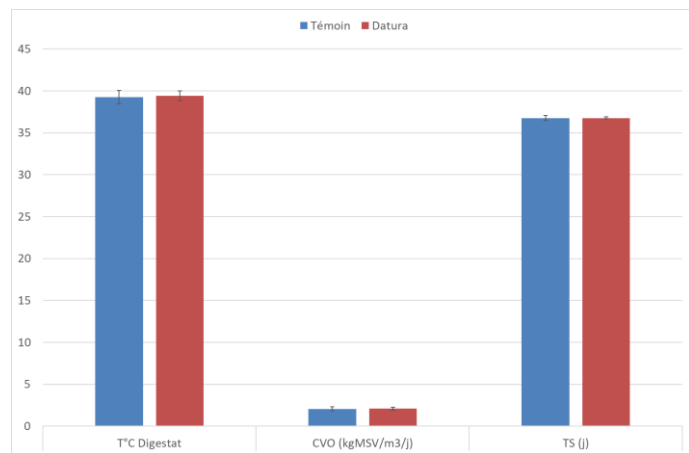
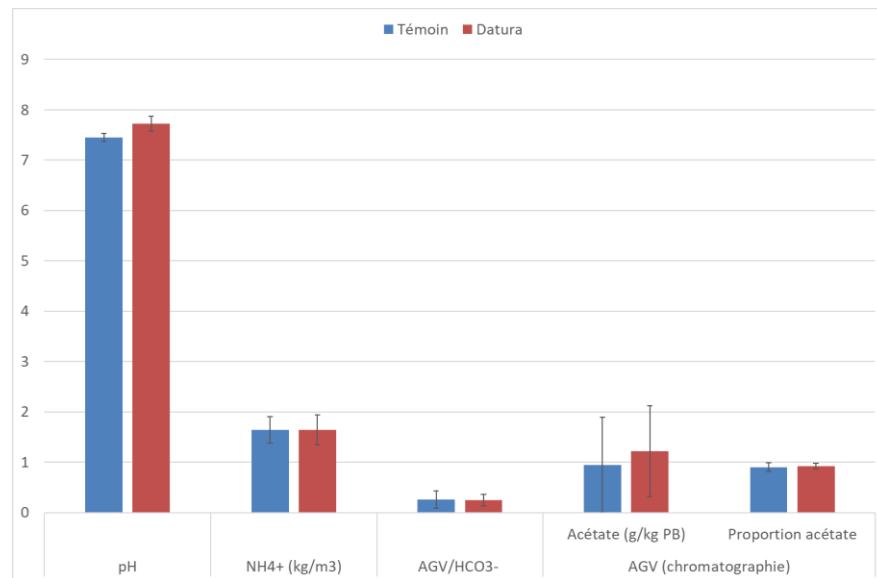


Impact

Equilibre paramètres biologiques
Production de biométhane
+ADN/ARN

Simulation contamination CIVE
à 10%
(2,5% de la ration globale)

Essai en pilotes continus

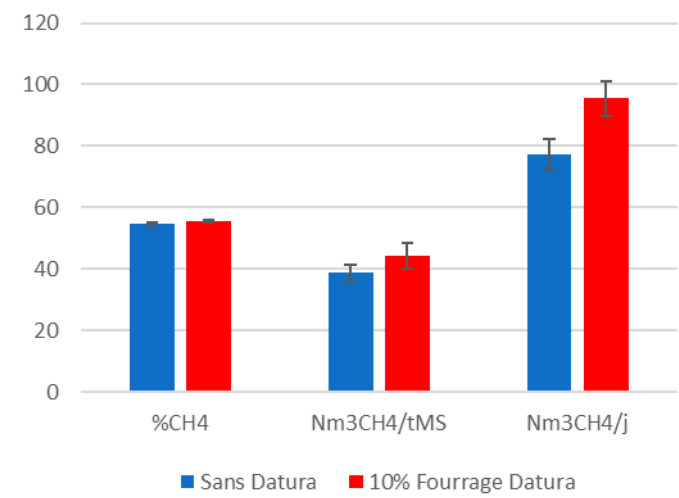
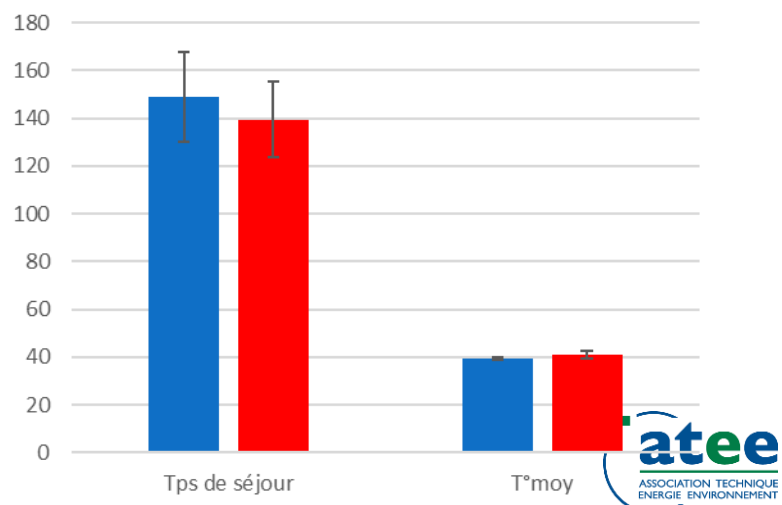
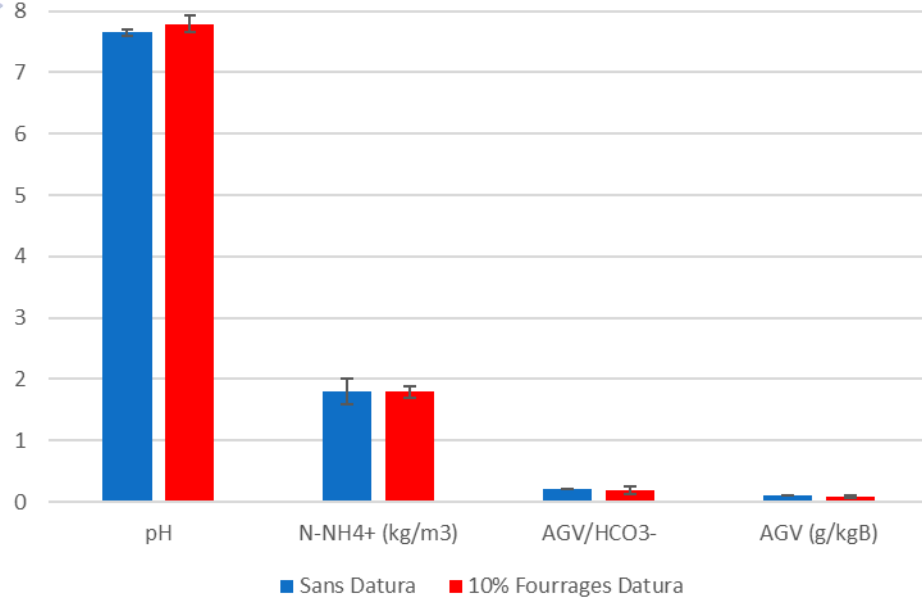
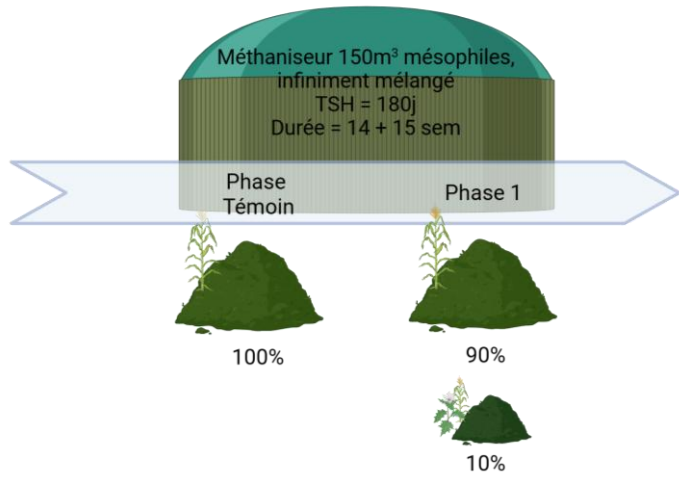


- Pas d'impact de l'ajout du datura sur les paramètres biologiques et de production de biométhane
- Confirmation des résultats par analyses des populations microbiennes (ADN/ARN) (*en cours*)
- validation taux d'incorporation (attention variabilité teneurs)

PERSPECTIVES : tests quantités limites max en méthanisation continue (scénario d'intégration massive d'un lot déclassé)



Essai en pilote industriel



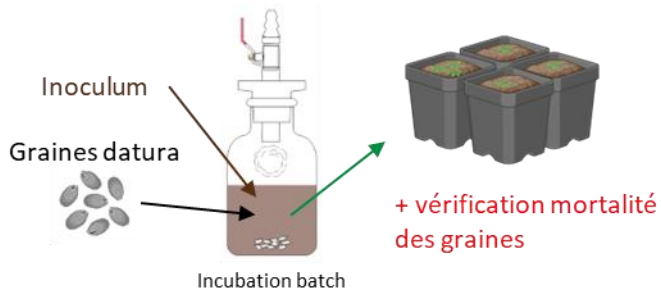
➔ Pas d'impact de l'ajout du datura sur les paramètres biologiques et de production de biométhane à la dose testée

➔ Validation taux d'incorporation à hauteur de 10% pour ce fourrage (attention variabilité concentrations en datura dans le fourrage)

PERSPECTIVES : tests quantités plus importantes (scénario d'intégration massive d'un lot déclassé)

METHA vs DATURA

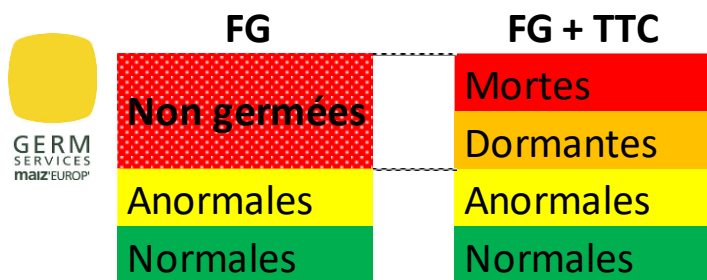




Impact de la méthanisation sur les graines de datura

Qualification de l'état des graines :

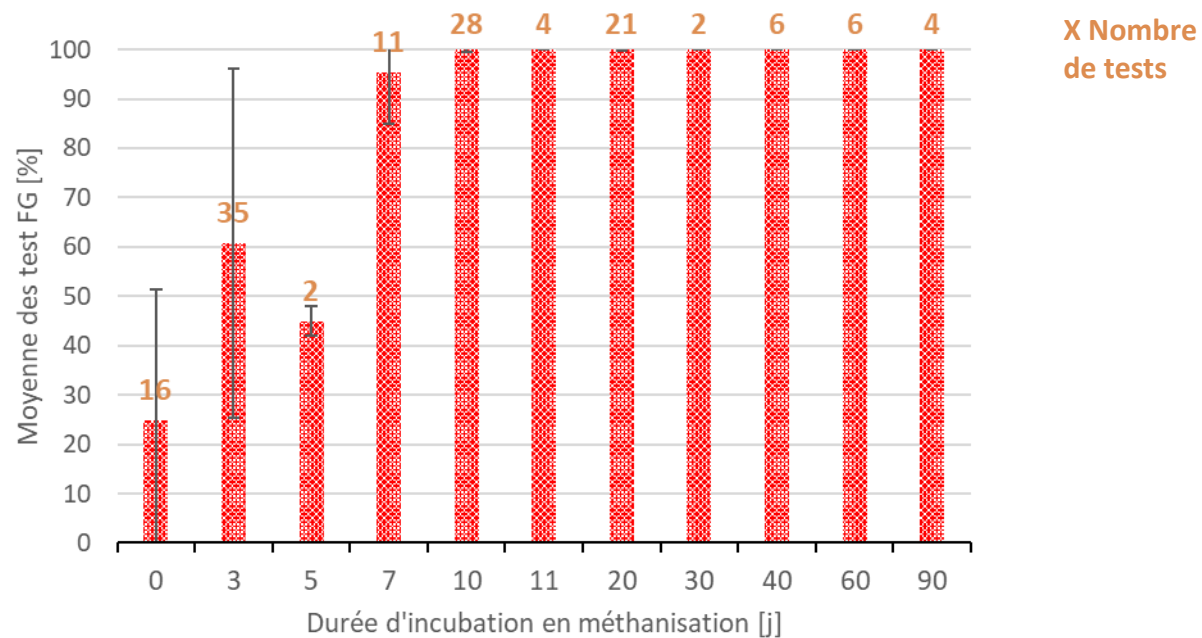
- FG : test de germination 15j sur buvards
- TTC : test indiquant la mort ou non des cellules de l'embryon



Développement des tests par GERM Services
1 test FG : 200 à 400 graines

300 tests FG, plusieurs séries d'essais sur le projet

Effet de l'incubation en conditions mésophile [37-41°C] sur la faculté germinative des graines de datura



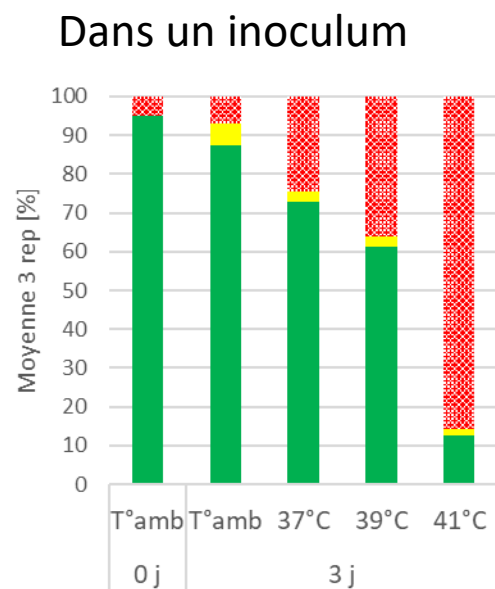
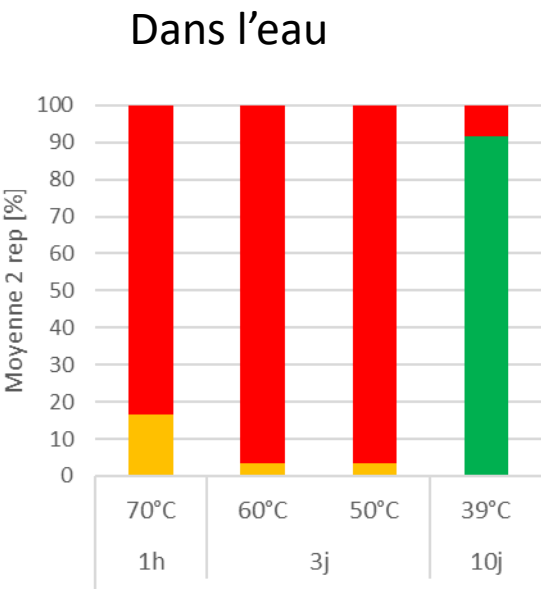
- Variabilité en conditions mésophiles !
- Après 20 j toutes les graines sont mortes
- => À mettre en relation au temps de séjour

FG	FG + TTC
Non germées	Mortes
Anormales	Dormantes
Normales	Normales

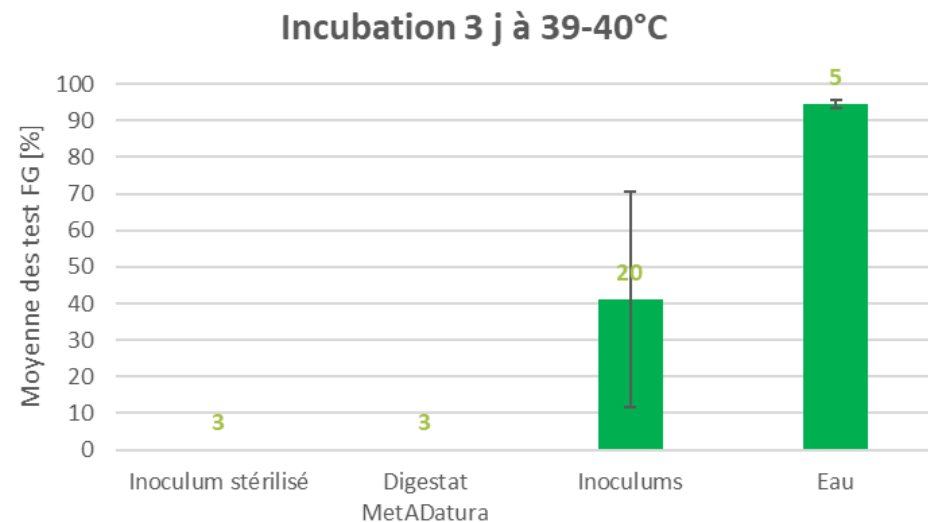
Impact de la méthanisation sur les graines de datura

Qualification de l'état des graines

- Impact de la température



- Impact du milieu



L'hygiénisation impact fortement les graines
 La gamme thermophile est rapidement létale
 La gamme mésophile n'est pas létale

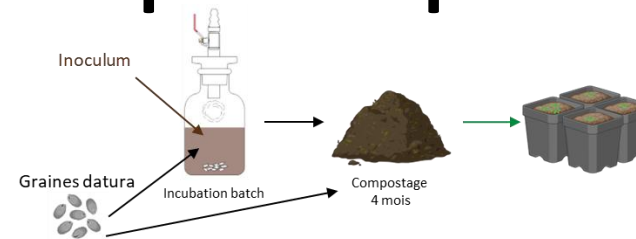
La température est un facteur important dans la gamme mésophile

- Variabilités d'efficacité entre les digestats
- Conditions physico-chimiques ? Activité biologique ? Impact ration, charge organique ?

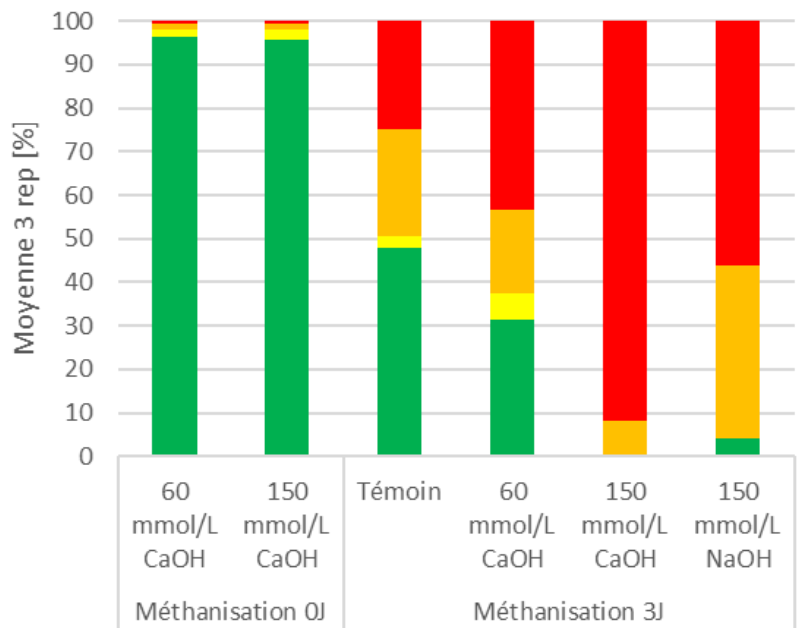
FG	FG + TTC
Non germées	Mortes
Anormales	Dormantes
Normales	Anormales
	Normales

Impacts complémentaires de post ou pré-traitements

Qualification de l'état des graines

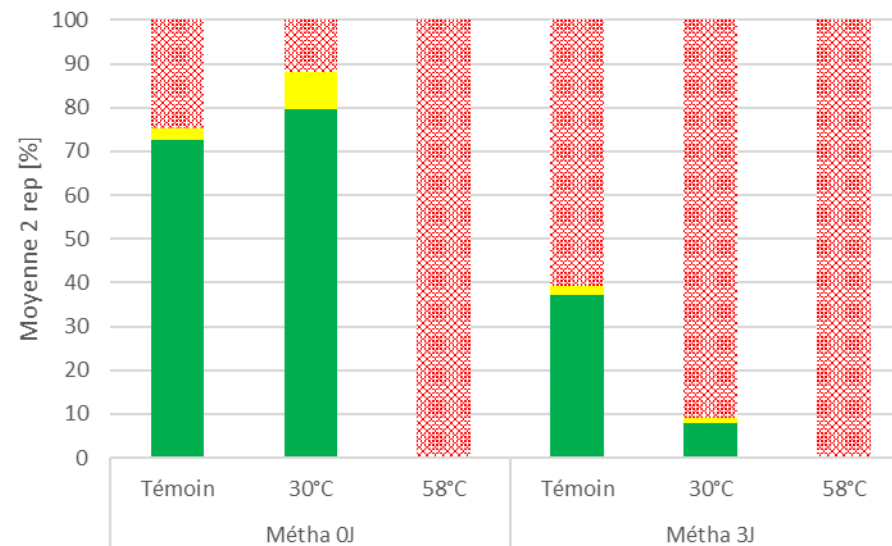


Prétraitements alcalins sur les graines



- Amélioration de la destruction des graines en méthanisation par le prétraitement alcalin à 150 mmol/l

Compostage 125 jours de graines saines ou préalablement passées par la méthanisation



- Le régime thermique >50°C d'un compost optimal est létal pour toutes les graines (cf. test dans l'eau)
- Les phases de compostage même non optimales complètent le prétraitement par la méthanisation

A RETENIR/PERSPECTIVES



Datura VS Métha

- Traitement possible par méthanisation en codigestion, de fourrages déclassés sans inhibition de la méthanisation
- Taux d'incorporation dans les rations à adapter selon concentrations en alcaloïdes

Métha VS Datura

- La digestion thermophile est rapidement létale pour les graines
- La digestion mésophile est létale en 20 jours, la T°C accélère l'effet létal
- Le compostage de graines passées en méthanisation sécurise le risque (atout de la séparation de phases)
- Des prétraitements alcalins peuvent aider à traiter des lots très chargés en graines (issues de tri, lots déclassés)

PERSPECTIVES

Datura VS Métha

- Compréhension phénomènes de transfert et disparition des alcaloïdes dans le milieu
- Etablir les taux max d'incorporation(scénarii d'intégration massive d'un lot déclassé)

Métha VS Datura

- Des variabilités d'impacts sur les graines entre digestats à explorer
- Des mécanismes (physico-chimie, biologie, ...) à étudier plus finement pour conclure à l'échelle de la filière

AGRONOMIE ET ENVIRONNEMENT

MICROPLASTIQUES ET BIODÉGRADABILITÉ DES MATÉRIAUX

Animateur
Thierry Ribeiro

1 **Patrick Dabert, INRAE**

Biodégradation de composites PHBV/Cellulose en méthanisation mésophile

2 **Dominique Patureau, LBE INRAE**

Devenir de microplastiques au cours de la méthanisation et impact après retour au sol des digestats

3 **Laura Andre, Uilassale**

Elaboration de films plastiques biosourcés et évaluation de leur biodégradabilité en digestion anaérobie

4 **Patrick Dabert, INRAE**

Les sacs plastiques compostables ne se dégradent pas en méthanisation

Biodégradation de composites PHBV/cellulose en méthanisation mésophile

P. Dabert ¹, P. Derkenne ¹, L. Chatellard ², M. Rabiller-Baudry ³, A-C. Pierson-Wickmann ⁴,
C. Rondeau-Mouro ¹, N. Gontard ², F. Béline ¹

¹ INRAE – UR1466 OPAALE, 17 Av. de Cucillé, 35044 Rennes, France.

² UMR IATE, Univ. Montpellier, 163 rue Auguste Broussonnet, 34090 Montpellier, France.

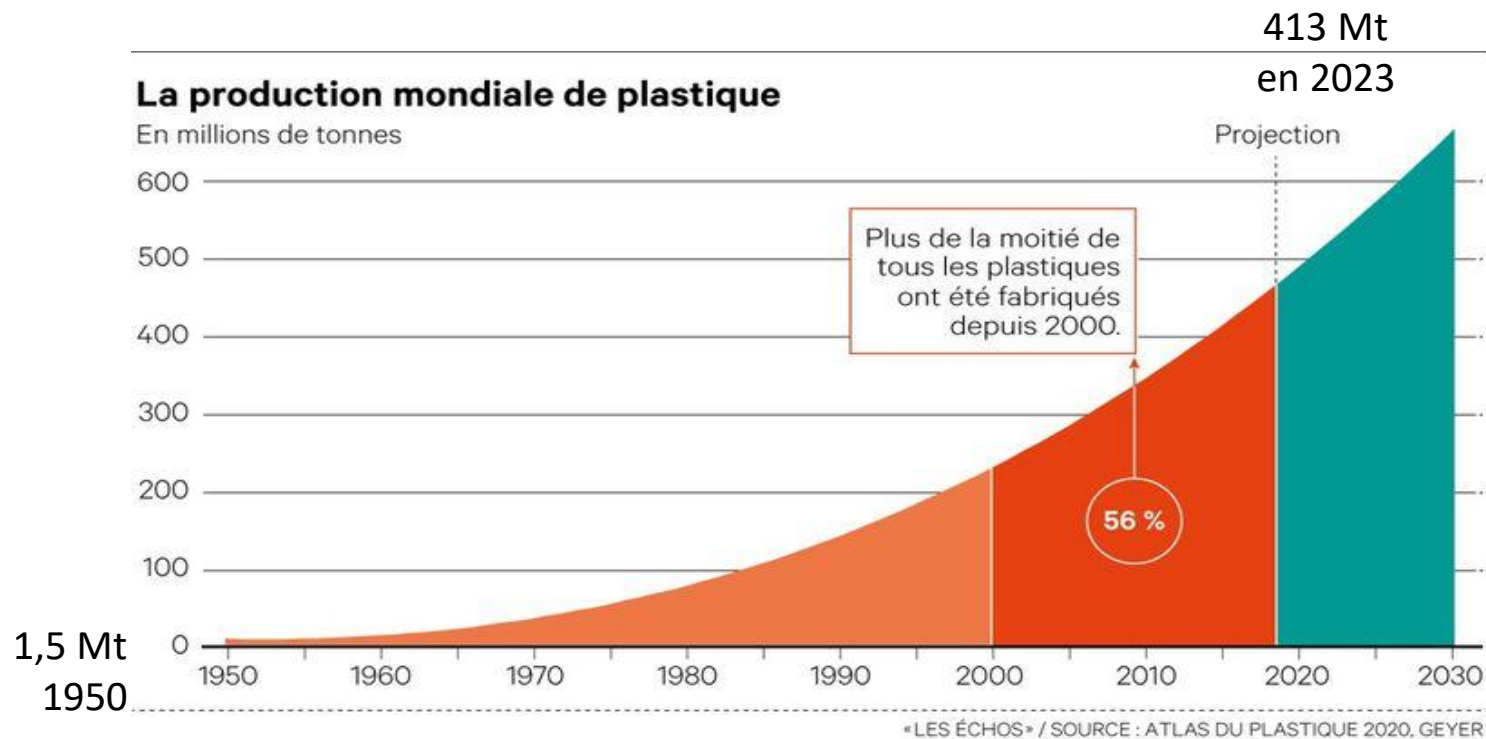
³ ISCR-UMR CNRS 6226, Université de Rennes, 263 av. Général Leclerc, 35042 Rennes, France

⁴ UMR Géosciences, Université de Rennes, 263 av. Général Leclerc 35042 Rennes, France.

patrick.dabert@inrae.fr

BioCyPlast

La production de plastiques

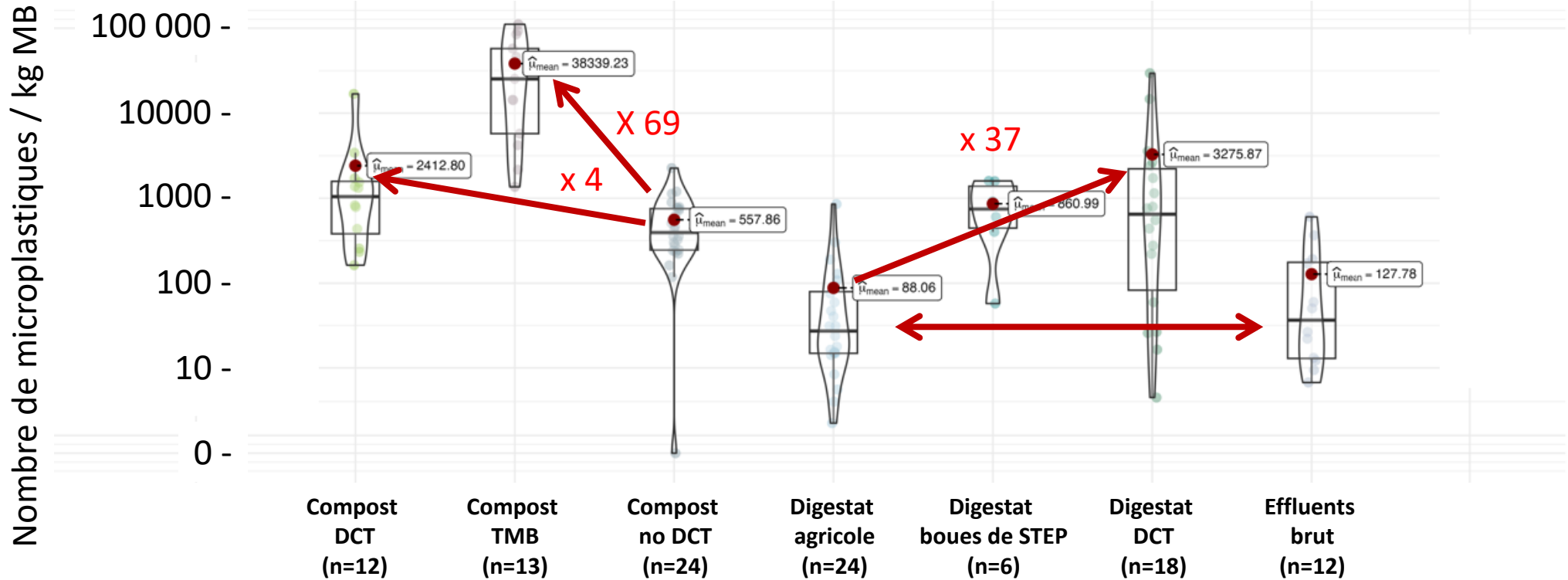


- 413,8 Mt de plastiques produits en 2023 dont 145 Mt pour des emballages alimentaires
- Geyer, R. et al. (2017), pour tous ces plastiques
 - 9% ont été recyclés
 - 12% incinérés
 - 80% mis en décharge ou dans l'environnement => **Microplastiques**

Les emballages plastiques dans les composts et digestats

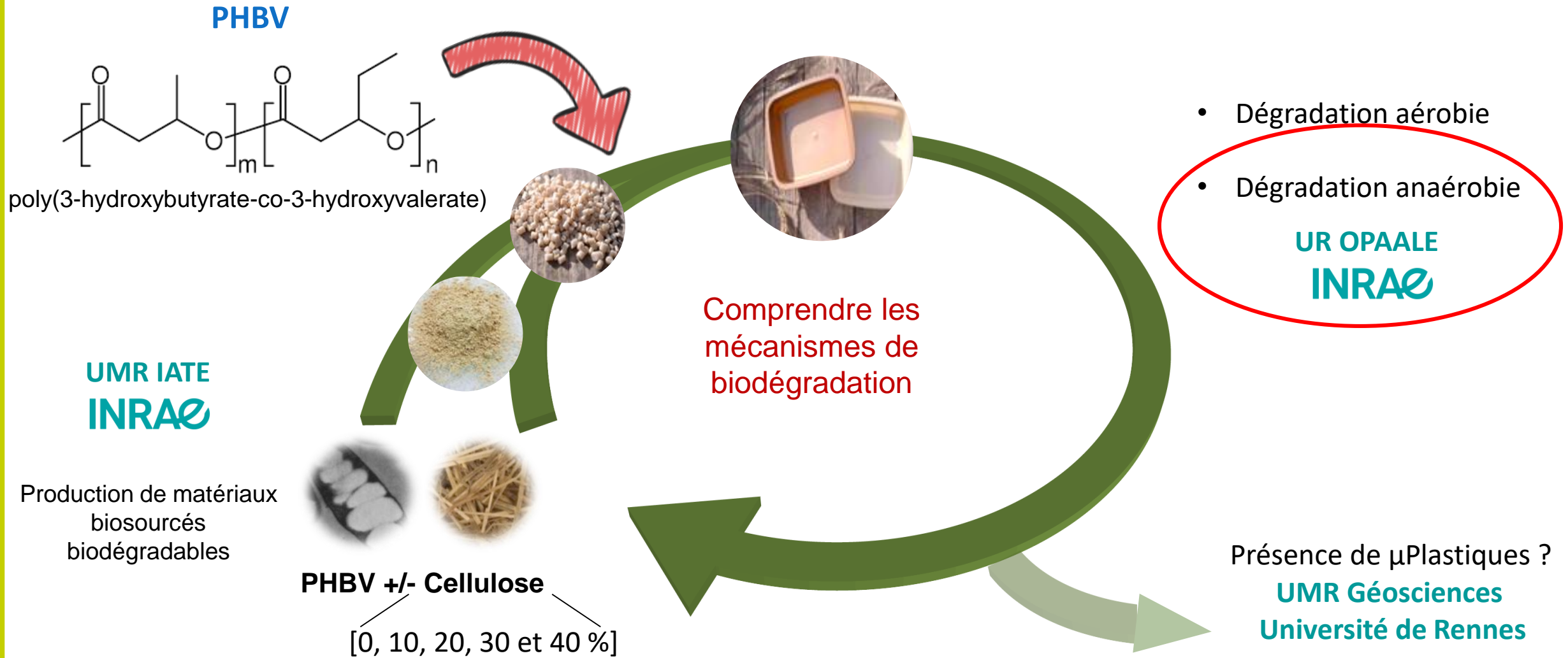
ADEME, et al. (2023). Microplastiques (< 5 mm) présents dans les produits résiduels organiques en France métropolitaine: 81.

DCT, déchets de cantine et de table, TMB, tri mécano-biologique



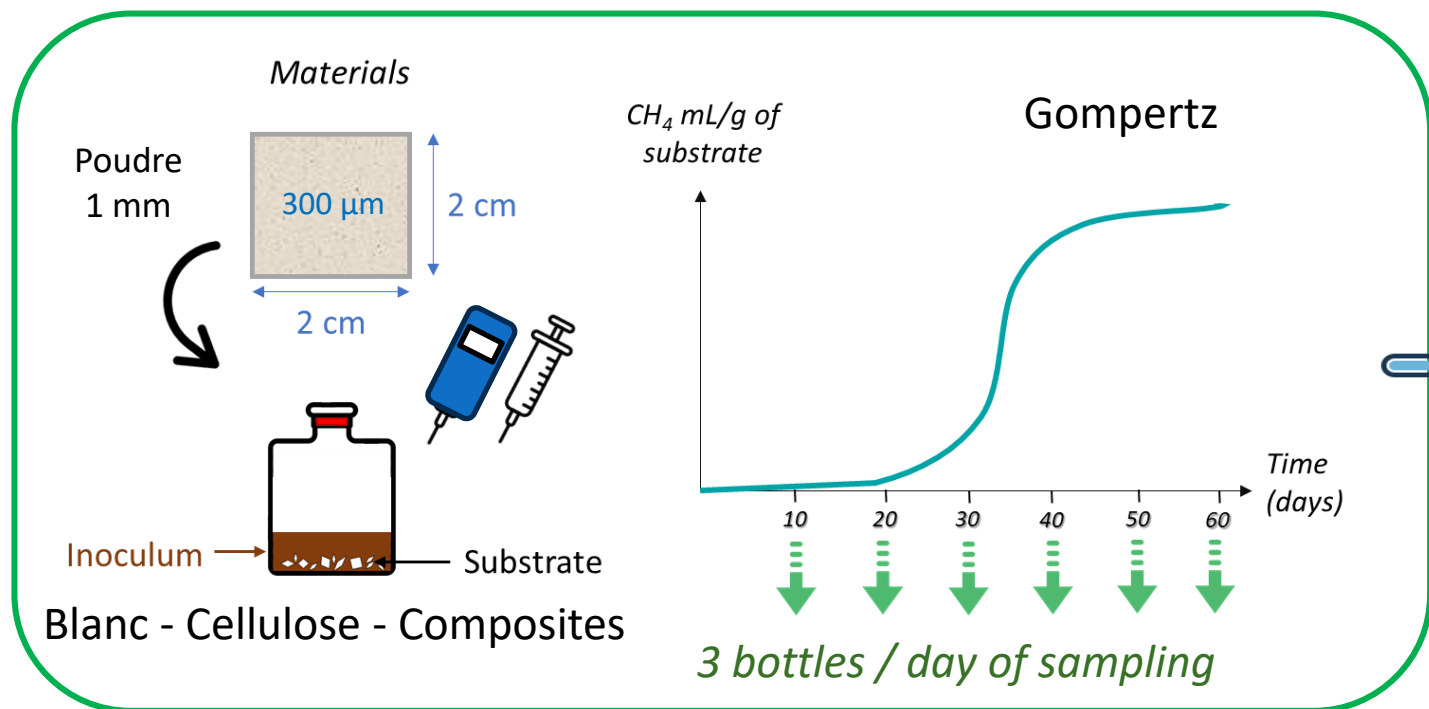
- La teneur en plastique des composts et des digestats dépend de la quantité de déchets municipaux traités
- PE (films, sacs), du PP (barquettes), du PS (barquettes, pots de yaourts) et du PVC (films et pots)

BioCyPlast (Biological Cycle of Plastics) - ANR Bioeconomy – 2022/26



Matériels & Méthodes

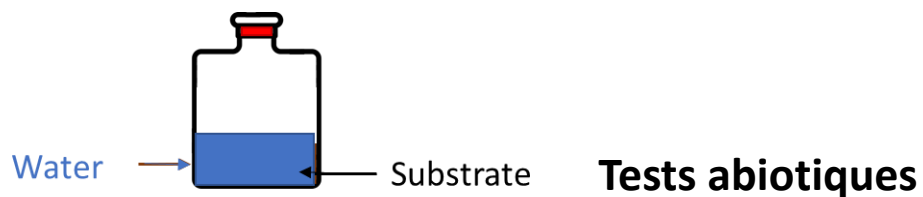
Séries de BMP à 38°C



Tests analytiques

Collecte des:

- *Plastiques*
 - caractéristiques (MEB, ATG, CES, FT-IR, DSC, RMN, etc.)
 - communauté microbienne attachée
- *Digestat*
 - métabolites de dégradation (HPLC, LC-MS)
 - tamisage à 500 µm et 100 µm
 - communauté microbienne libre

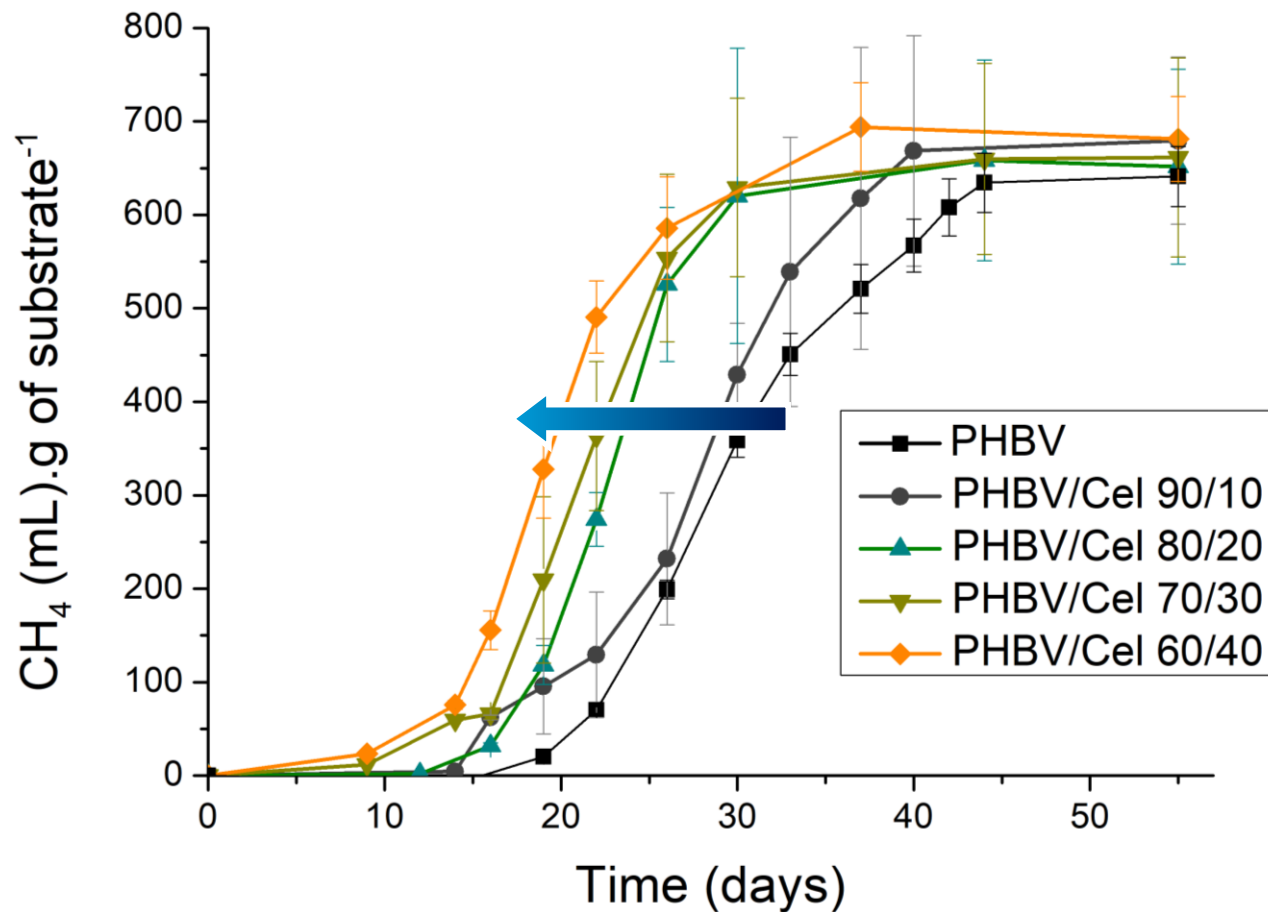


Résultats



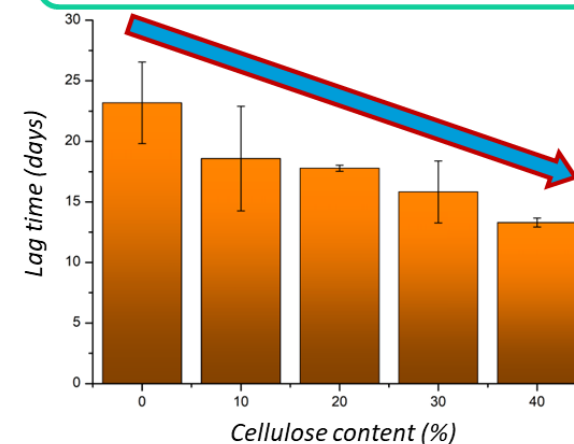
La cellulose accélère la dégradation des composites de PHBV/Cellulose

Production cumulée de méthane pour les composites PHBV/cellulose*

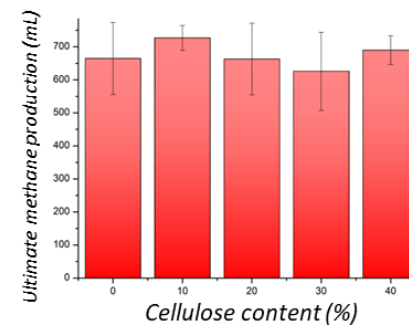


* En poudre 1 mm

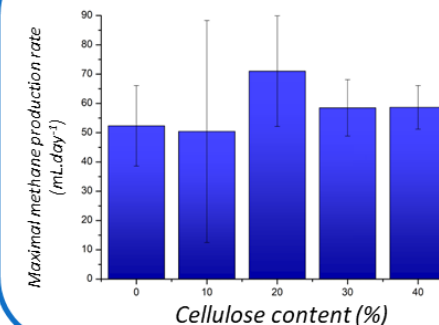
Temps de latence



P_{max} max. production

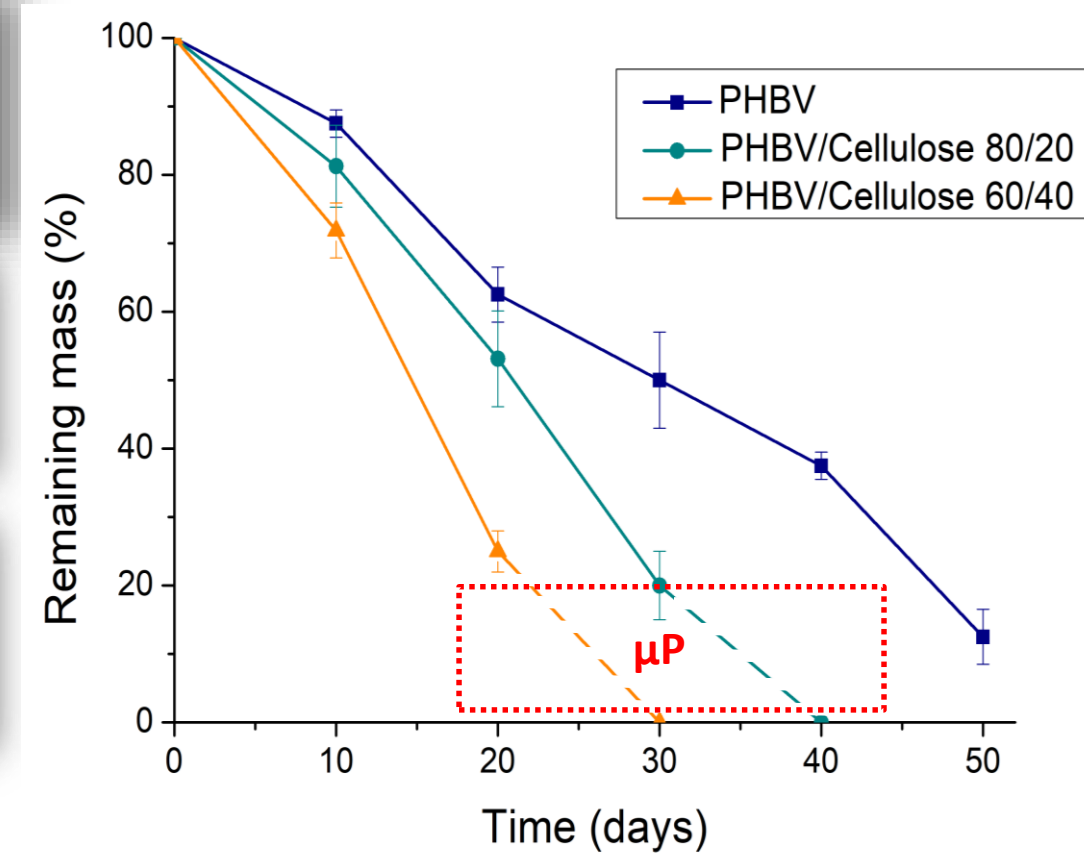
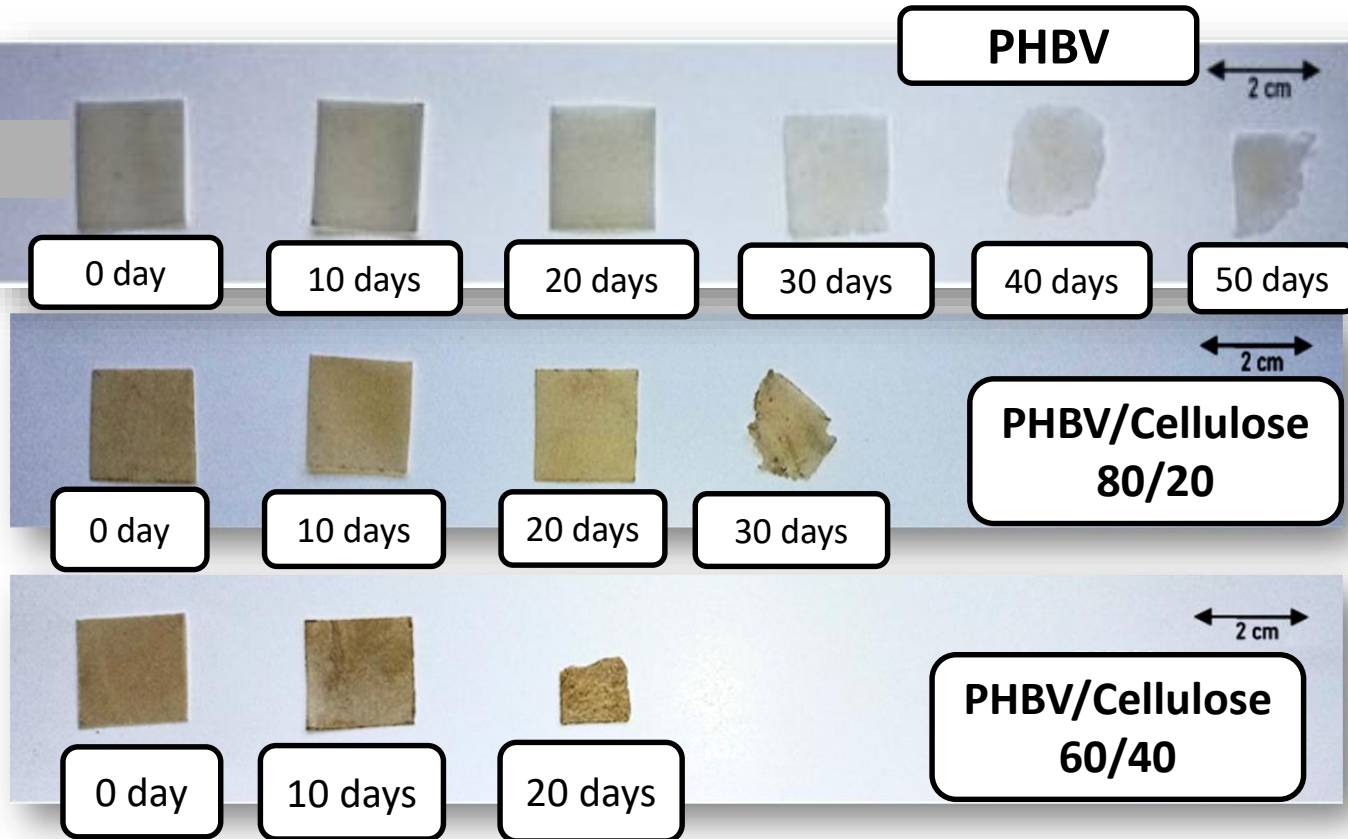


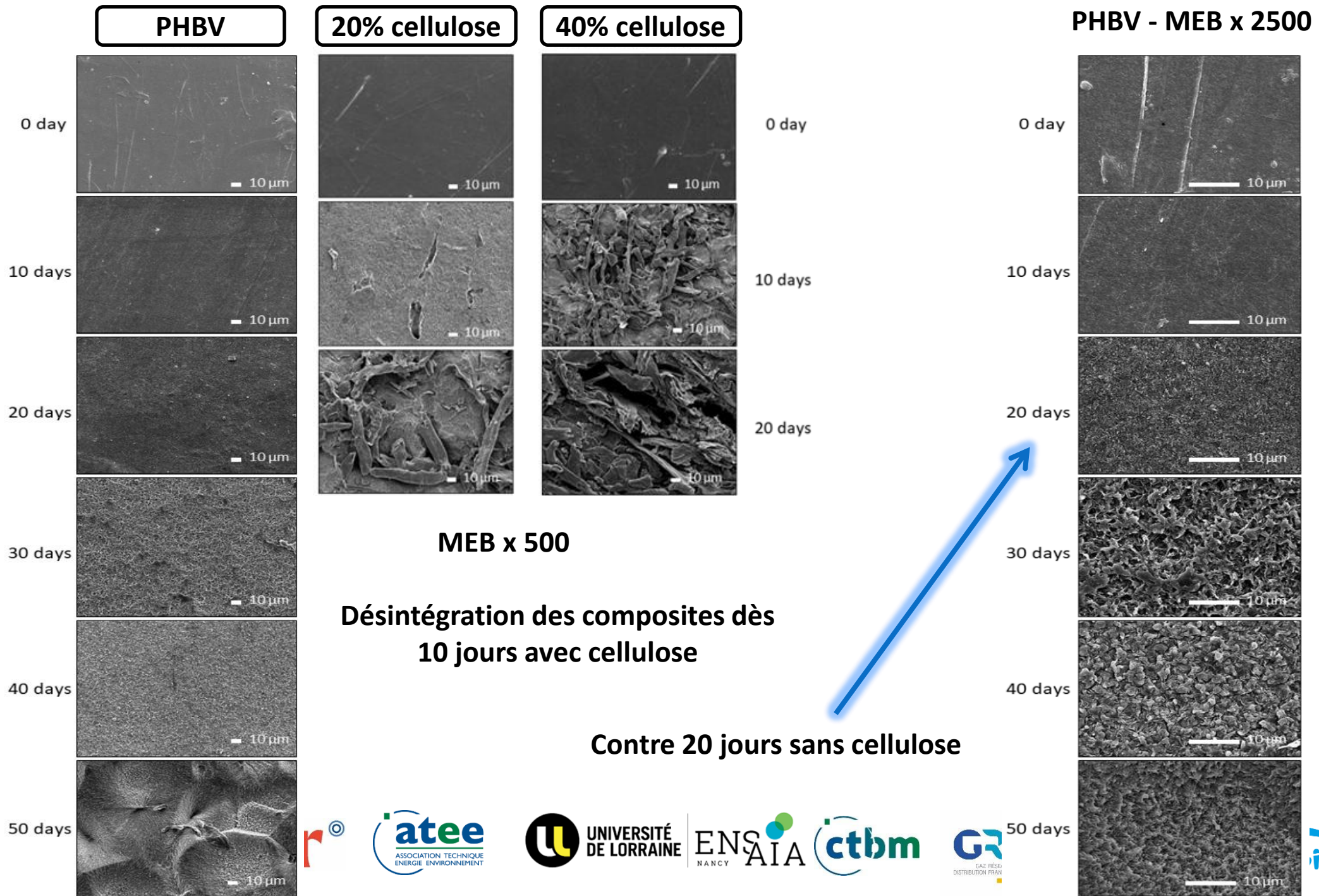
V_{max} max. rate



La cellulose accélère la désintégration des composites de PHBV/Cellulose

Evolution de la masse des composites PHBV/cellulose



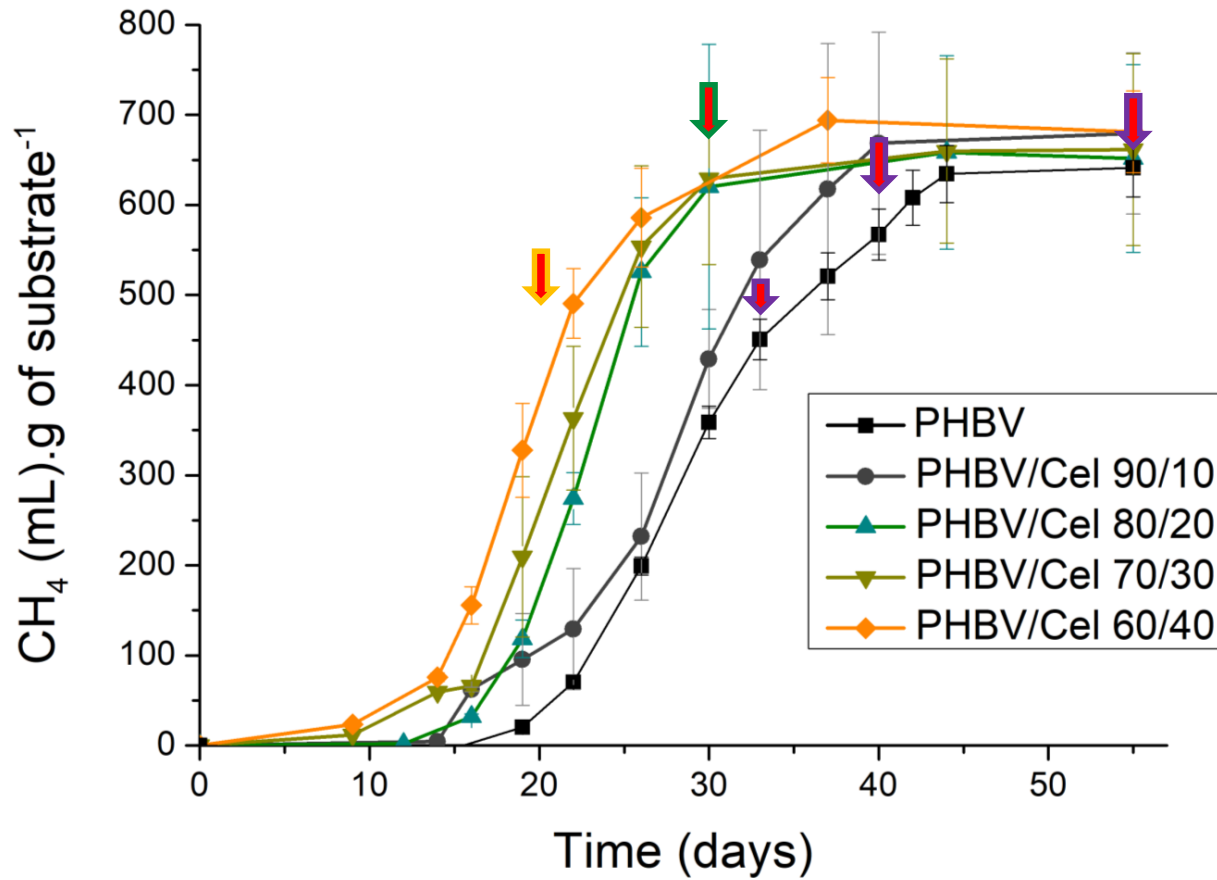


50 days

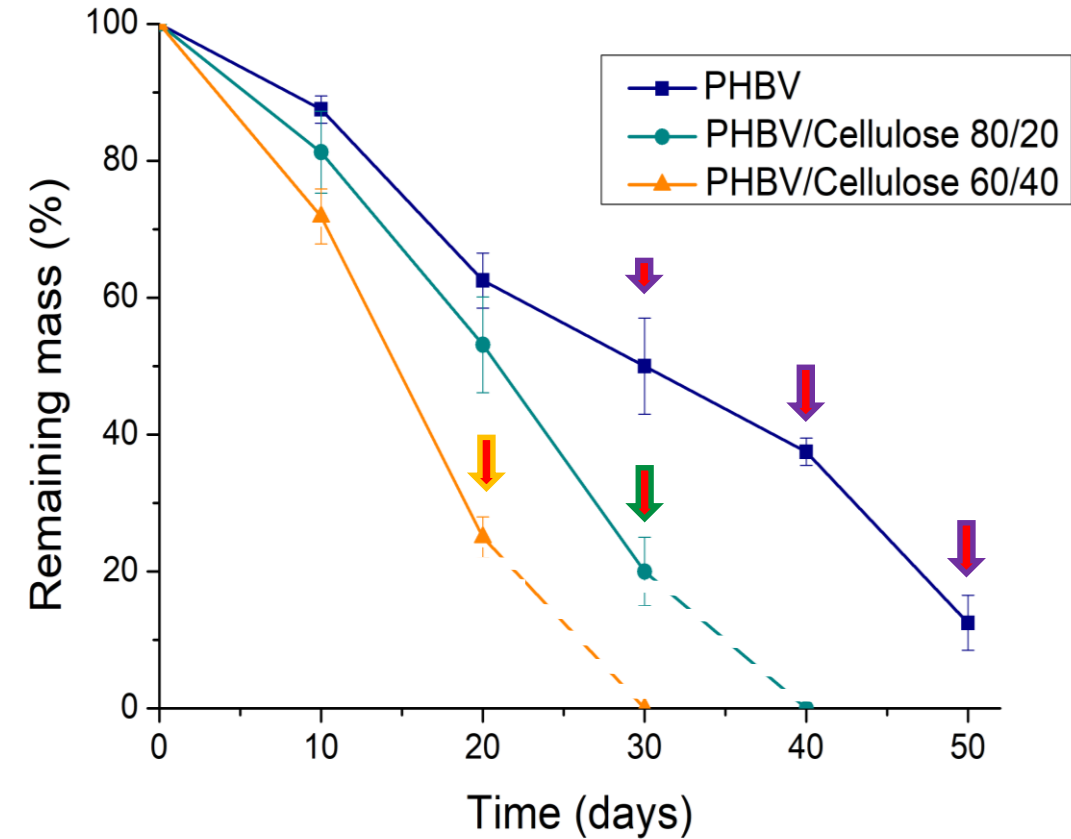


On observe un pic de métabolites lors de la désintégration

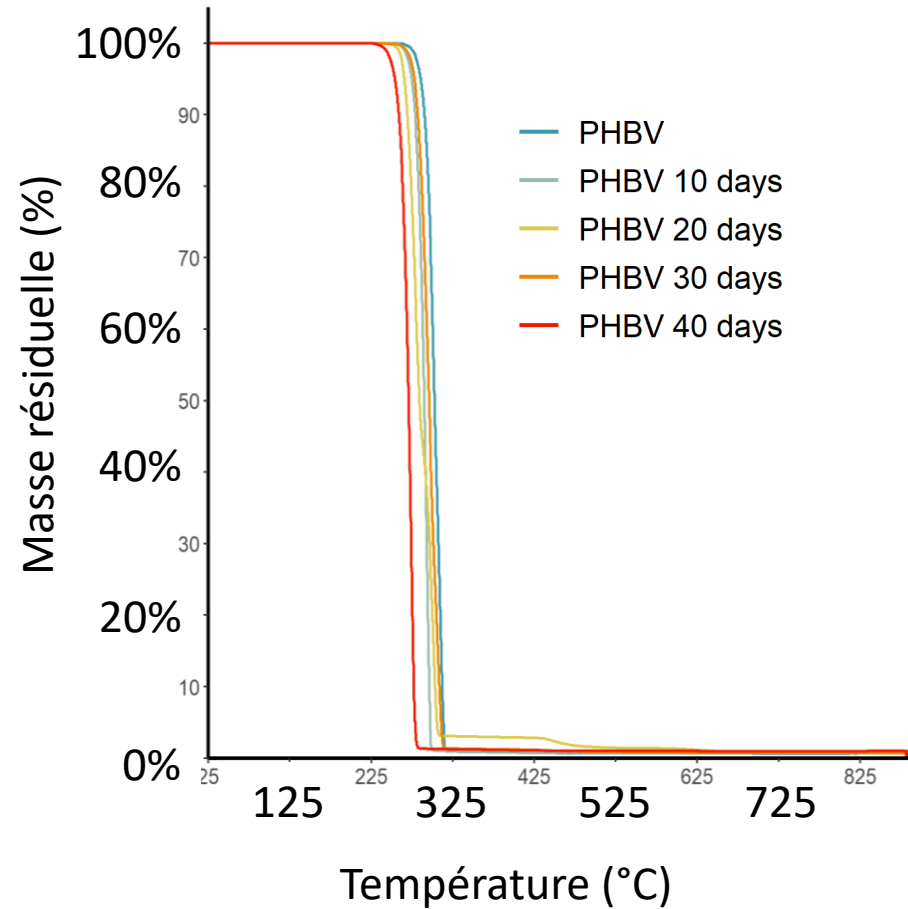
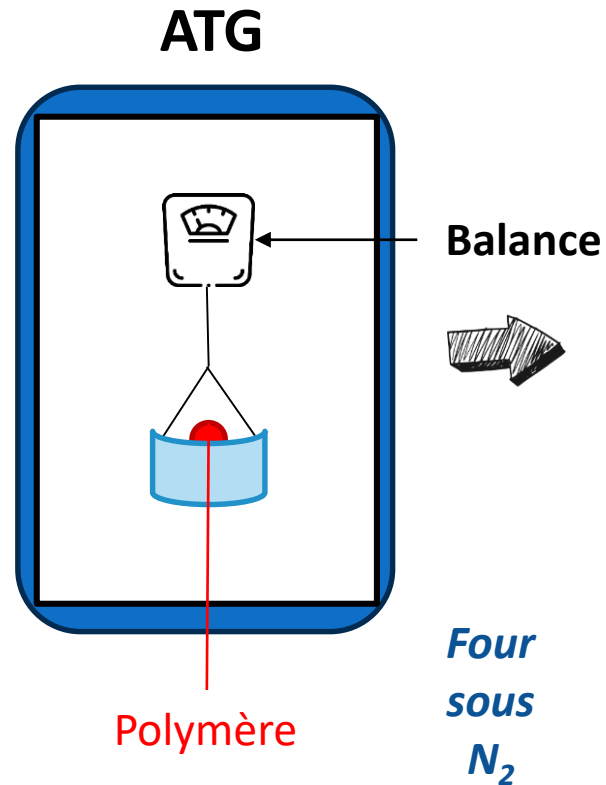
Production cumulée de méthane pour les composites PHBV/cellulose



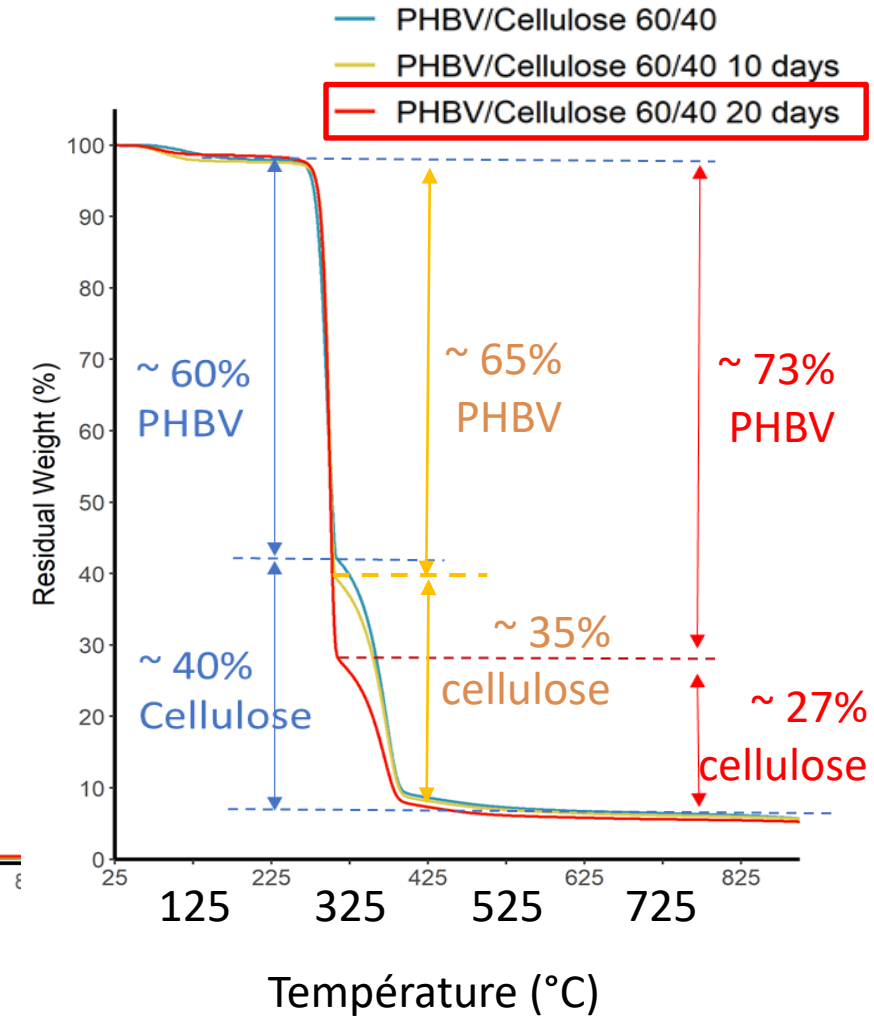
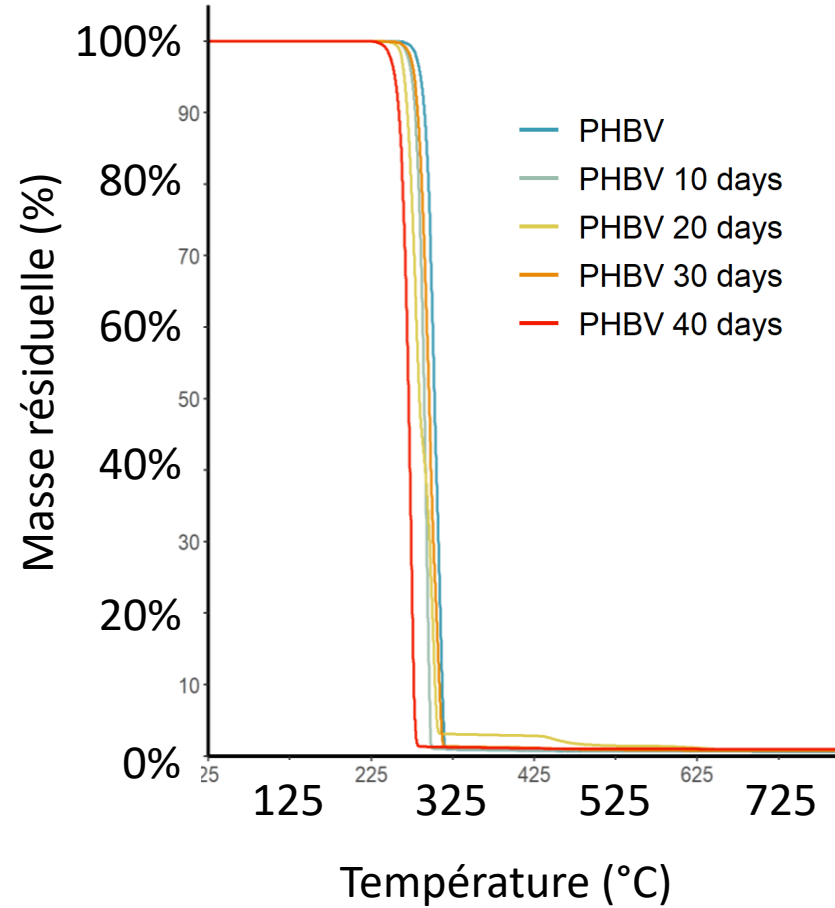
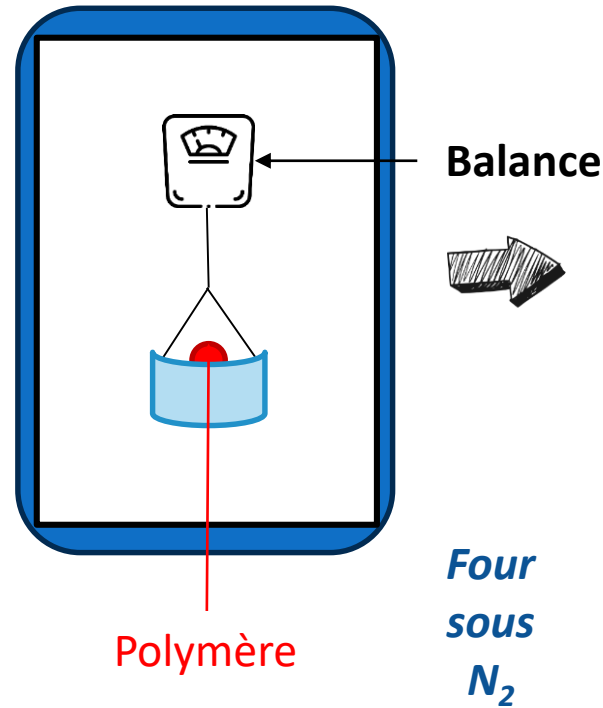
Détection de pics d'acétate, butyrate et isobutyrate dans le digestat



Comment se dégrade le composite PHBV/cellulose ?



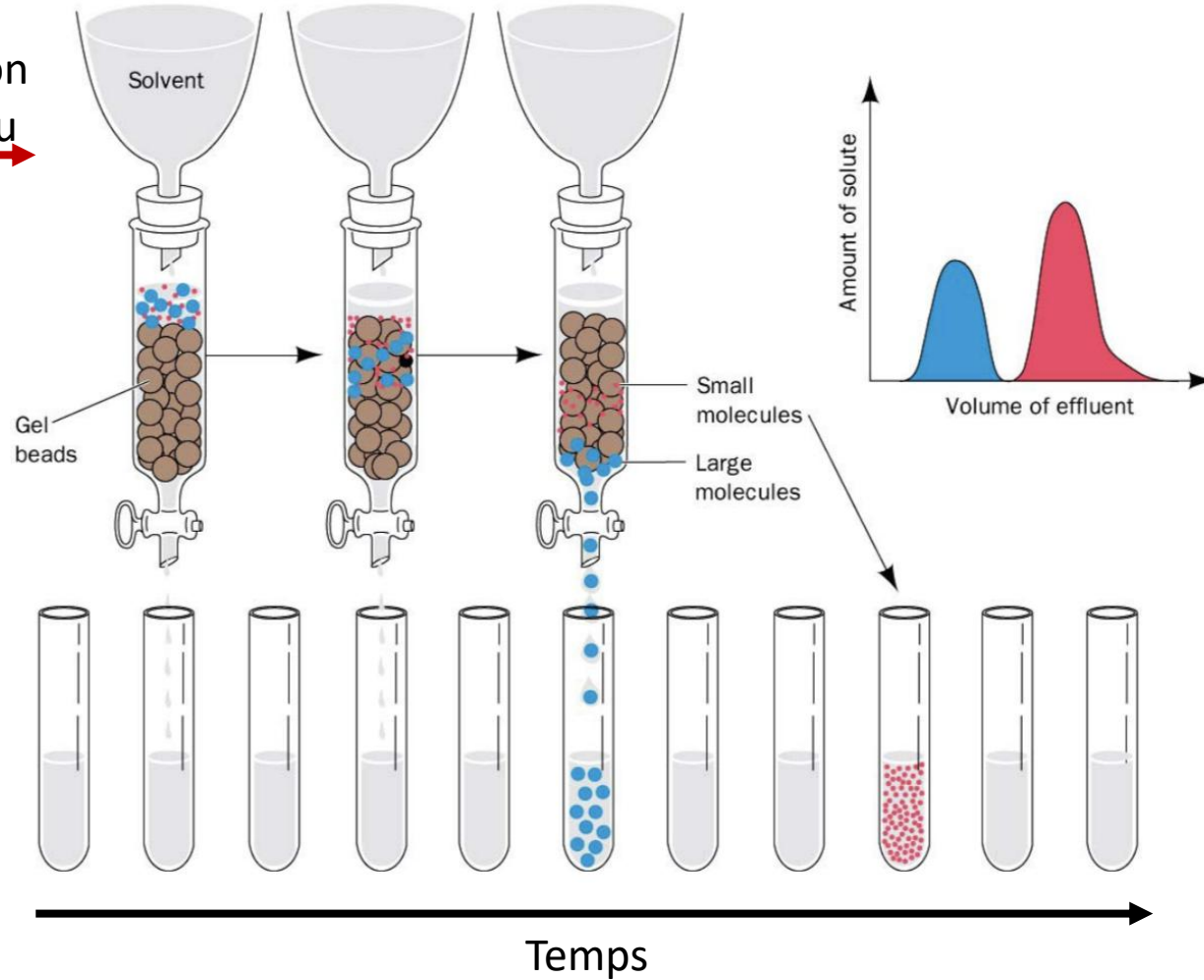
La proportion de cellulose diminue pendant la dégradation (ATG)



Evolution de la masse moléculaire du PHBV en cours de digestion (SEC)

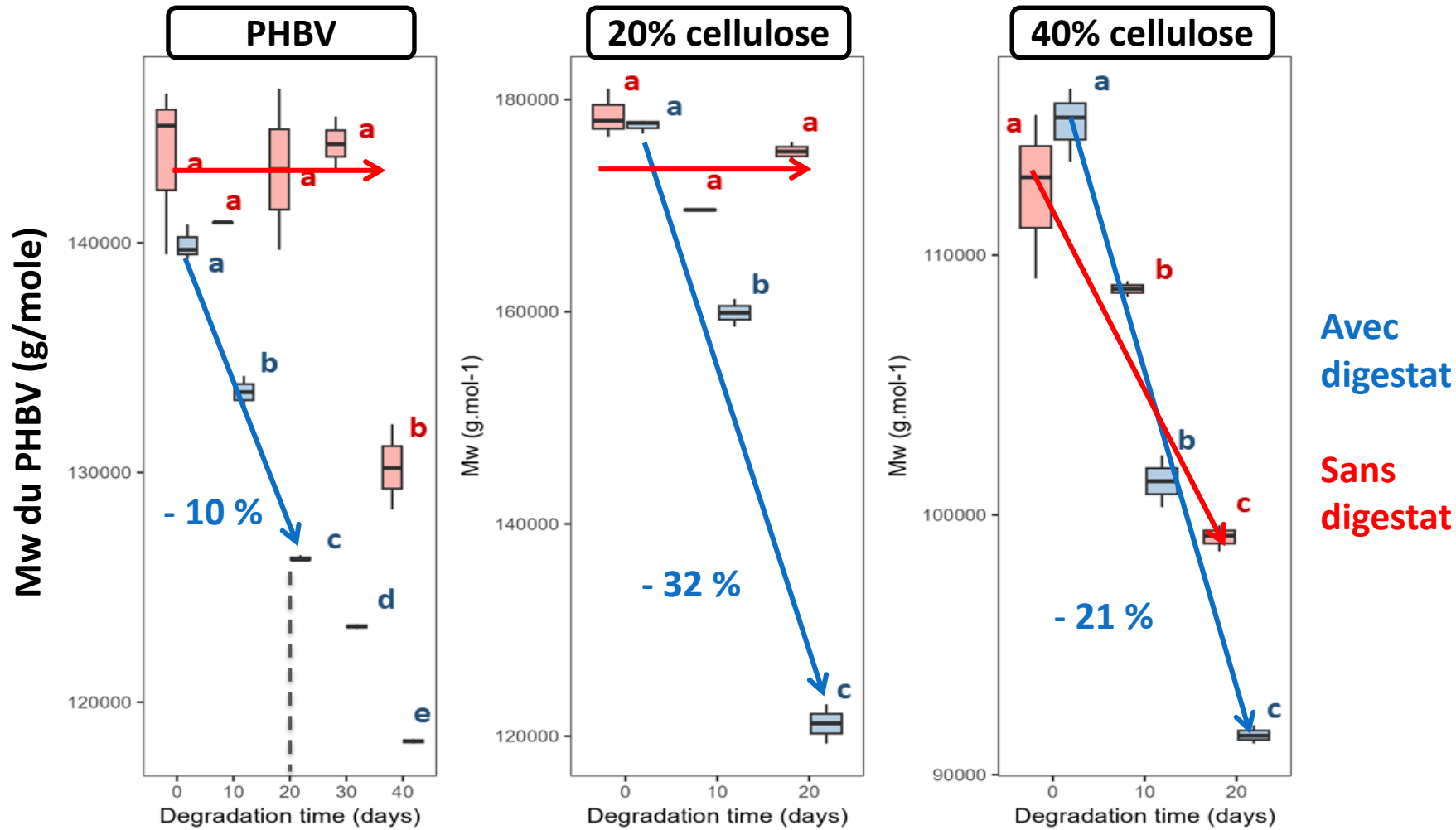


Solubilisation
du matériau



<https://bstorefr.bigfestassl.com/content?c=chromatographie+filtration+sur+gel&id=5>

Evolution de la masse moléculaire du PHBV en cours de digestion (SEC)



La masse du polymère diminue avec le temps en présence de digestat.

L'incorporation de cellulose dans le PHBV accélère la dégradation du PHBV.

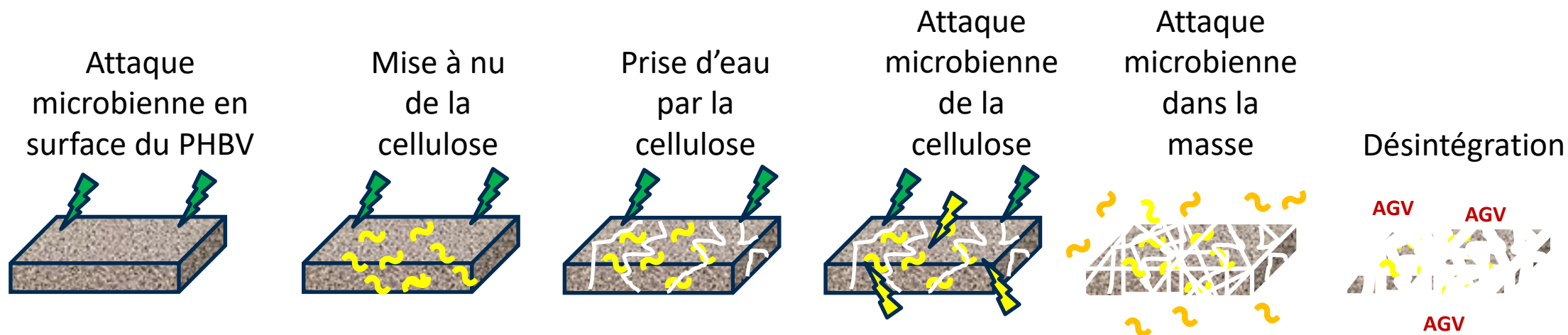
La dégradation est principalement biotique sauf pour le composite avec 40% de cellulose.

Avec digestat

Sans digestat

Conclusions

- Il est possible de créer des barquettes biosourcés en PHBV/cellulose (80/20)
- Ces barquettes sont biodégradables en compostage et digestion anaérobie mésophile
- La présence de cellulose accélère la désintégration des barquettes, et facilite l'attaque du polymère PHBV



- Des études sont en cours pour évaluer leur biodégradabilité dans le sol
- Un second projet ANR (SCIRDE) est en cours pour optimiser leur alimentarité et recyclage

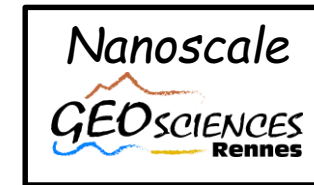
Merci à



Héloïse Bazart
Valérie Guillard



Martine Sarrazin
Anne Le Bihan
Anne Trémier



Tom Rainbow



Co-funded by
the European Union



Devenir de microplastiques au cours de la méthanisation et impact après retour au sol des digestats

D. Patureau^{1,*}, E. Barraud¹, M. Gallant¹, C. Pagès¹, A. Richaume², C. Armanet², A. Cantarel², F. Gimbert³, F. Watteau⁴, I. Kowalewski⁵, P. Navard⁶, M.F. Dignac⁷

¹INRAE, Univ. Montpellier, LBE, 102 Avenue des étangs, 11100, Narbonne, France.

²Ecologie Microbienne, CNRS, UMR 5557, INRAE, UMR 1418, Université Lyon 1, 69622 Villeurbanne, France.

³Chrono-environnement - UMR 6249 CNRS/UFC, Campus de la Bouloie, 25030 Besançon cedex France

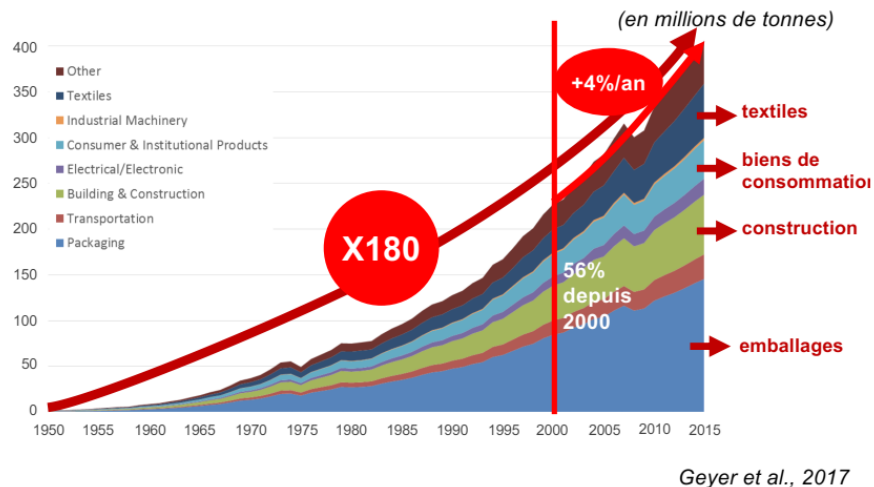
⁴UMR LSE, Université de Lorraine, INRAE Nancy, France

⁵IFP Energies nouvelles–Sciences de la Terre et Technologies de l'Environnement, 92852 Rueil-Malmaison Cedex, France

⁶CEMEF (Centre de Mise En Forme de Matériaux), MINES ParisTech - ARMINES, Sophia Antipolis, France

⁷Institute of Ecology and Environmental Sciences of Paris (iEES-Paris), Sorbonne University, INRAE, Paris 75005, France

Une production mondiale qui s'accélère



10 milliards tonnes plastique produit depuis 1950

30% encore en usage

7% recyclé

10% incinéré

50% environnement (5,5 milliards T ou 137 500 milliards de bouteille de 1,5L)

En 2019 : 353 M tonnes déchet produit (3/4 de la production)

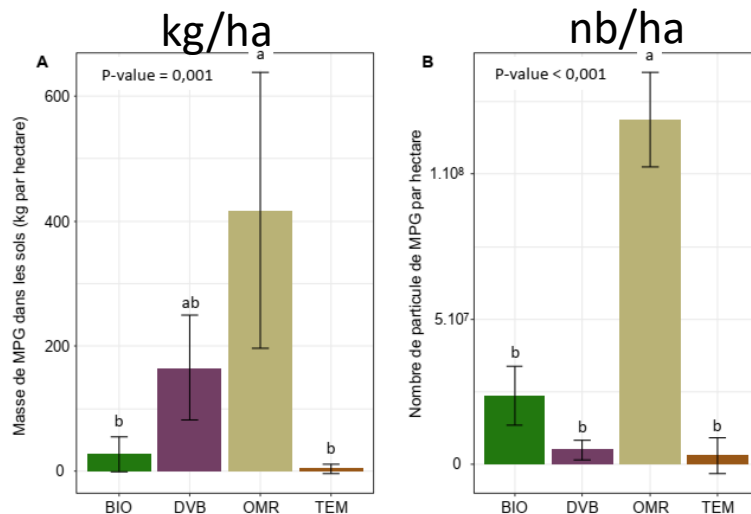
9% recyclé

23% incinéré

69% environnement

Contamination des océans
Milliards de particules
(Eriksen et al., 2023)

Contamination des sols
4 à 23 fois plus importante
que dans les océans
(Horton et al., 2017)



Sols de Colmar (SOERE PRO) amendés par des composts depuis 20 ans (Colombini et al., 2022) <2 - 5 mm>

Rapport Ademe (Mortas et al., 2024) <250 µm – 2 mm>

Composts et digestats avec biodéchets et pulpes de déconditionnement : 10 000 et 50 000 part/kg

Composts et digestas de boue : 2000 à 4000 part/kg

Digestat agricole : 500 part/kg



Objectifs du projet ANR e-DiP

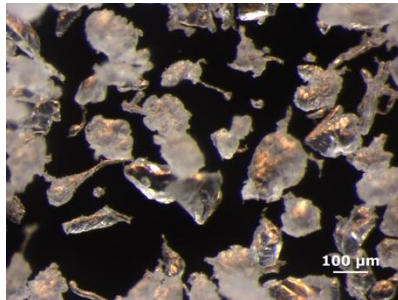
Devenir et impact dans le sol de mélange polymère + additifs (7% de la composition)

Impacts sur les fonctions de l'écosystème (cycle CN) et les microorganismes contributeurs

Toxicité sur microorganismes, plantes, macrofaunes

Apport direct ou après vieillissement au contact de la matière organique par digestion anaérobie

Particules de plastique produites à façon : PE basse densité (plus utilisé en emballage alimentaire)

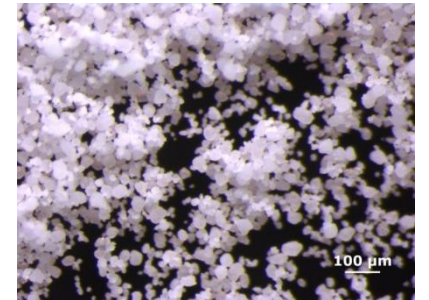


LDPE projet

- 250 µm et <30-250 µm>
- Sans additif (PE0), 6 additifs (PE1), 6 additifs en concentration ×10 (PE10)

LDPE sigma

CAS 9002-88-4
34-50 µm



✓ Vieillissement du LDPE en réacteur de méthanisation



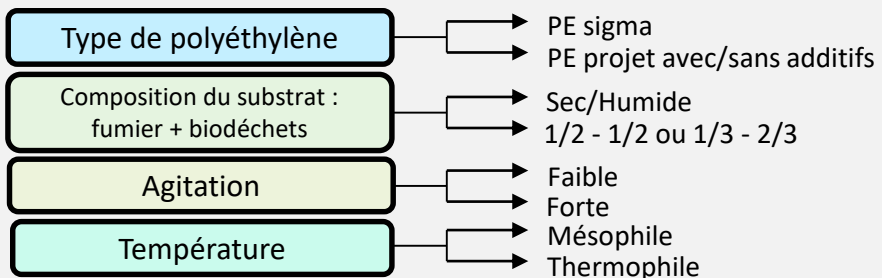
Fumier (2/3)
lyophilisé broyé 1mm



Biodéchets (1/3)
lyophilisés broyés 1mm

AMPTS (Automatic Methane Potential Test System) :

➤ Paramètres étudiés



Pour 4 concentrations
de PE différentes :
0, 1, 100, 1000 mgPE/gMS

➤ Calcul du **BMP** (Biochemical Methane Potential)

➔ **Pas d'effet sur le BMP**

Réacteur continu :



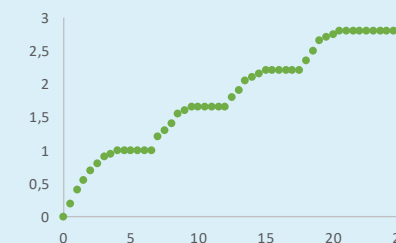
PE sigma
5 L
TSH : 20 jours
Durée : 120 jours
Avec et Sans PE : 100 mgPE/gMS

➔ **Aucun effet observé**

Réacteurs fed-batch

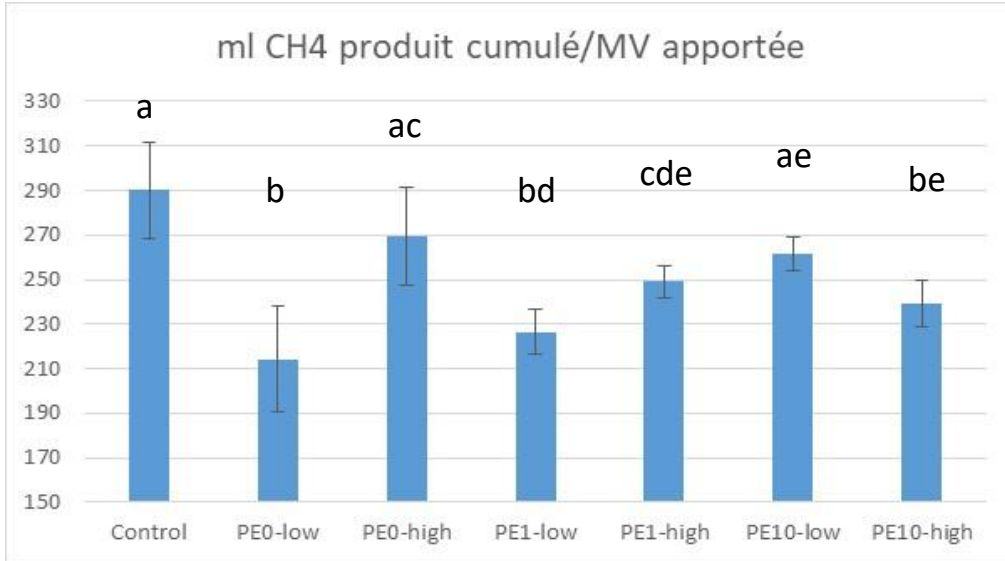
PE ajouté au début, 11 ajouts de substrat
Sept digestats produit en 53 jours
<30-250 μm>

control	PE0 – 0,1%	PE1 – 0,1%	PE10 – 0,1%
	PE0 – 1%	PE1 – 1%	PE10 – 1%



✓ Vieillissement du LDPE en réacteur de méthanisation

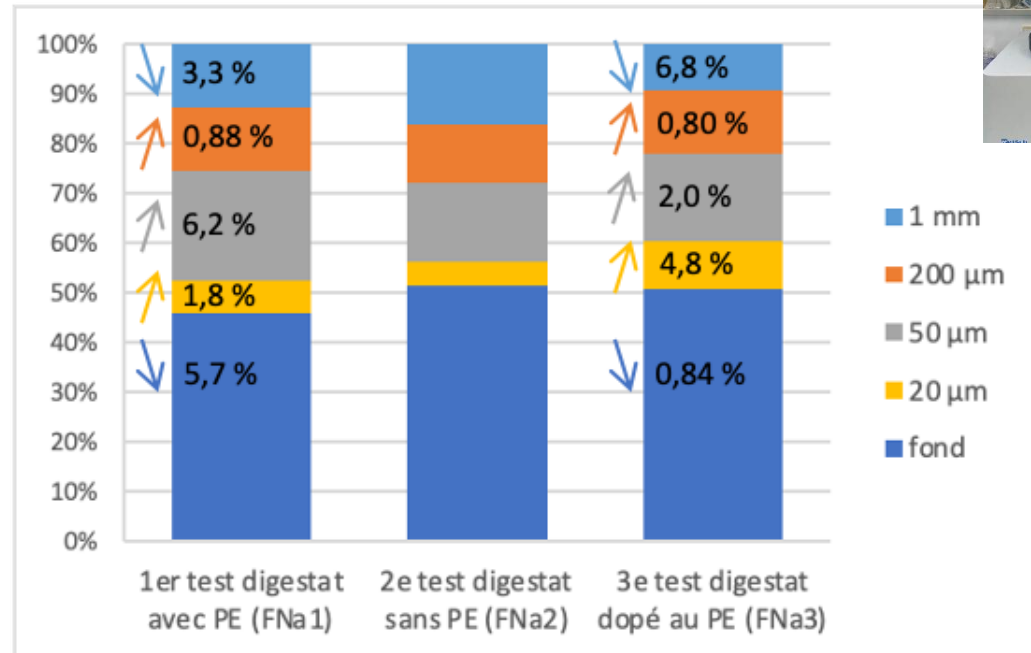
PE → DA



- Effet global de l'ajout des PE avec réduction de la production de méthane et plus marqué aux faibles doses d'additifs (PE0 et PE1)

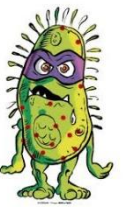
DA → PE

Part de la MS récupérée dans chaque tamis (%MS totale récupérée)

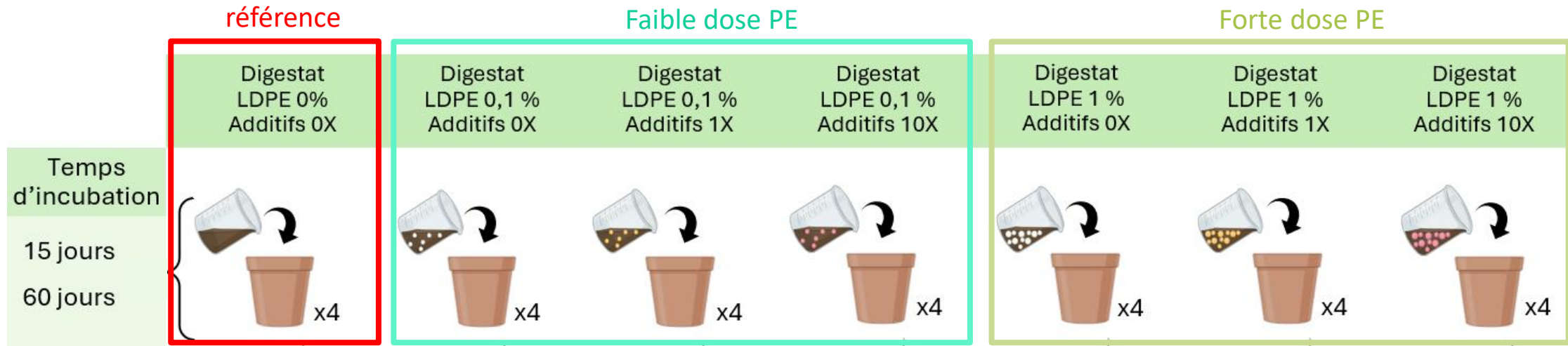


- Interactions entre PE et matière organique
- Observation MET confirmant ces interactions
- Pas de modification de la signature RockEval et proche IR des PE

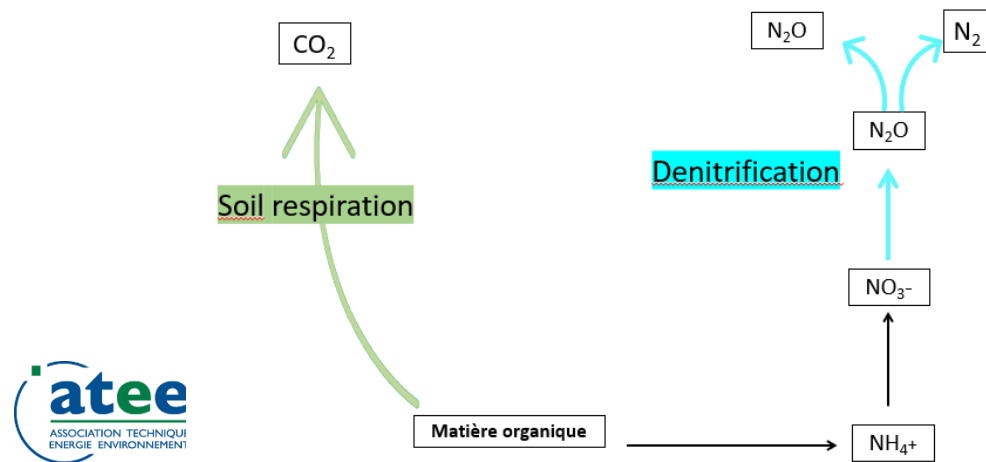
✓ Effet du vieillissement PE-MO sur le microbiote du sol



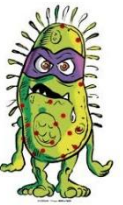
Sol (SOERE PRO, control plot), séché et tamisé, exposé aux 7 digestats, comparaison avec apport PE seul



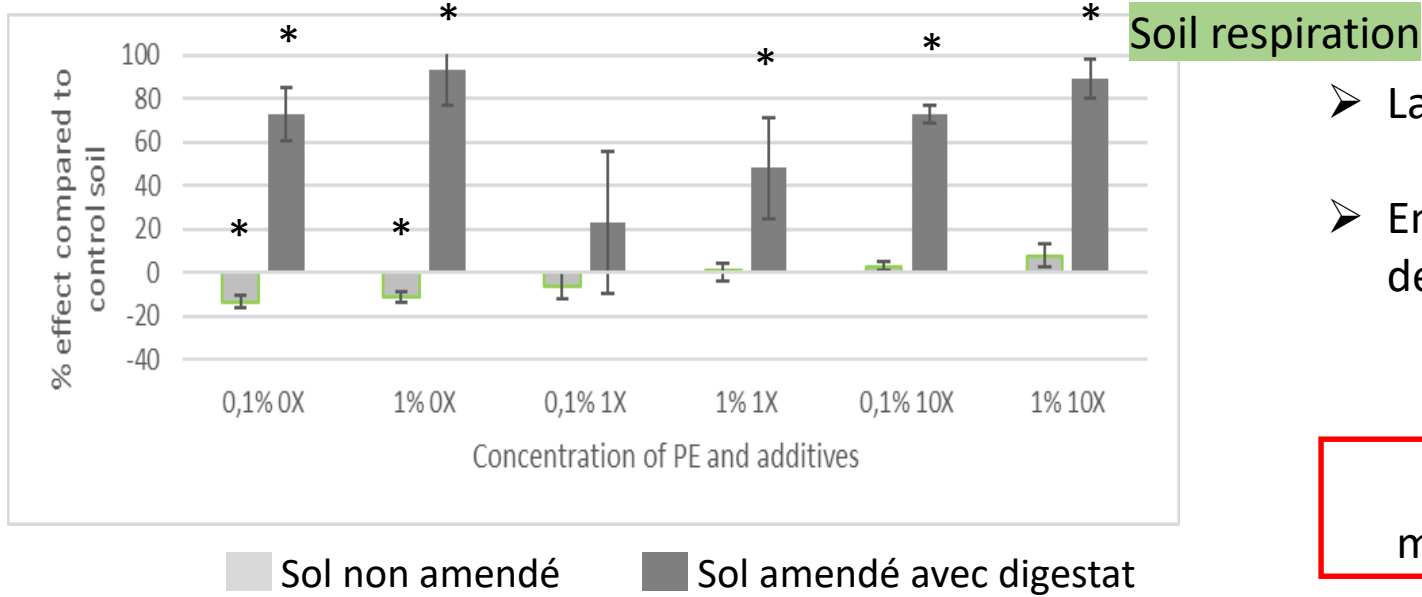
Mesure des activités enzymatiques de **respiration** (Substrate Induced Respiration- SIR) et de **dénitrification** potentielle (DEA) par chromatographie en phase gazeuse



✓ Effet du vieillissement PE-MO sur le microbiote du sol

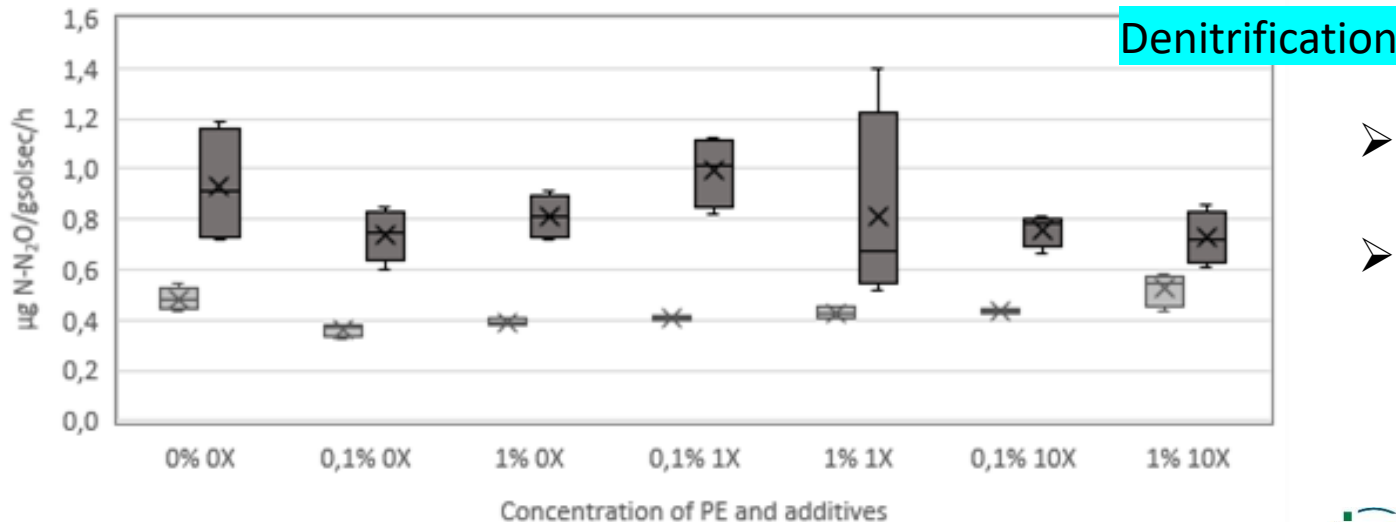


Comparaison par rapport au sol sans apport de PE après 60 jours d'exposition



- La respiration est stimulée en présence de digestat
- En présence de digestat, on n'observe plus les effets délétères du LDPE et des additifs

Effet contrasté du digestat selon les activités microbiennes en présence de LDPE et d'additifs



- La dénitrification est stimulée en présence de digestat
- La toxicité du LDPE et des additifs est observée même dans le sol amendé avec le digestat

✓ Effet du vieillissement PE-MO sur la macrofaune du sol

Cantareus aspersus



- material = glass (3L containers + Petri dishes)
- 300 g dry soil
- 10 juvenile snails (about 1 g) (fed with organic flour)
- exposure source = soil (digestive and cutaneous routes)
- 3 months of exposure
- 3 PE exposure concentrations
 - 0 (control)
 - 0.1 % (m/m) = 1 g/kg
 - 1% (m/m) = 10 g/kg
- 3 doses of additives in PE
 - 0
 - x1
 - x10
- 2 modes of PE introduction in soil
 - Brut (raw PE)
 - Dig (PE in digestates)

Measured responses:



- growth
- **sexual maturation**
- reproduction (**fecundity** and fertility)
- oxidative stress level

✓ Effet du vieillissement PE-MO sur la macrofaune du sol

Cantareus aspersus

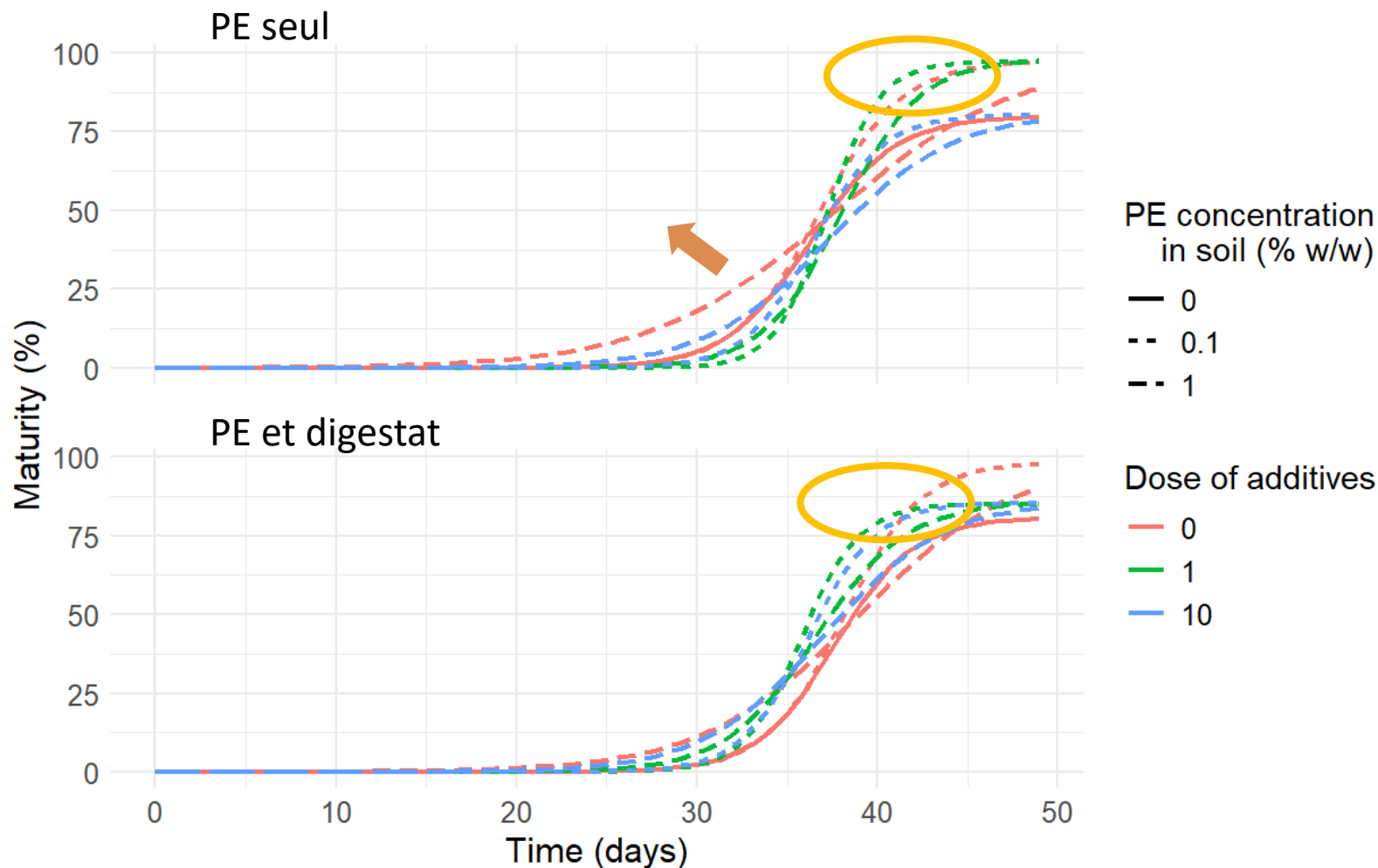


Snail sexual maturation (logistic modeling over 2 months)

→ The presence of PE in soil modifies the sexual maturation dynamic, notably at 0.1%

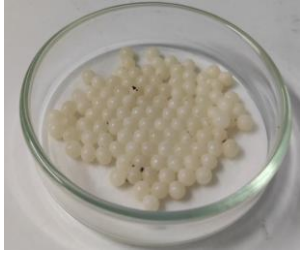
→ The effects are more marked for the **additive dose x1**

→ When PE come from digestates, an **additive dose x1** led to an early sexual maturity



✓ Effet du vieillissement PE-MO sur la macrofaune du sol

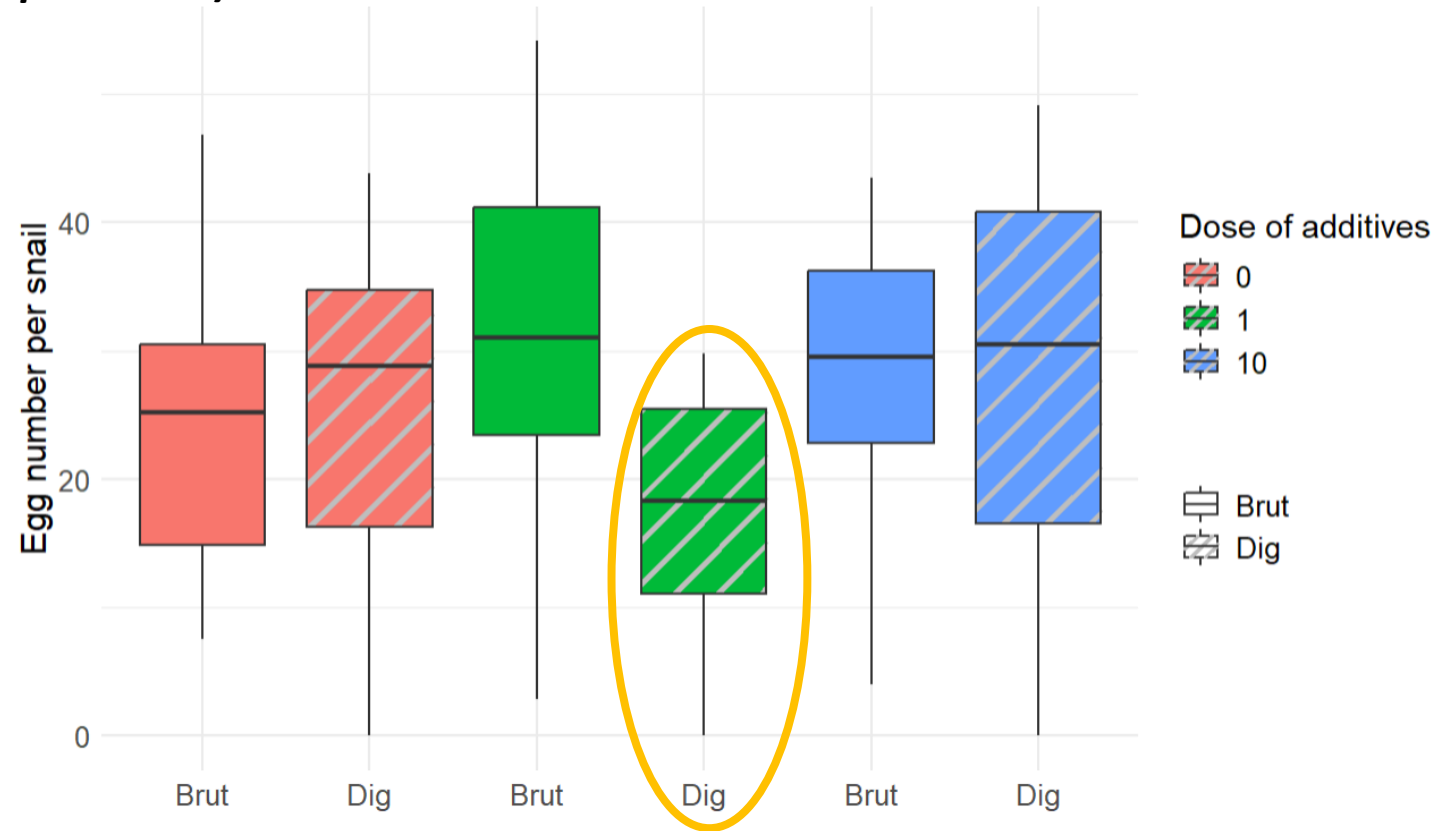
Cantareus aspersus



Snail fecundity (egg number per clutch)

→ no effect of PE concentration

→ significant effect of **additives at dose x1** when the PE are introduced through the digestate (p=0.042)





Egg number per snail exposed to PE (0.1 and 1%) according to the dose of additive and the application mode (Brut=raw PE; Dig=PE in digestate).

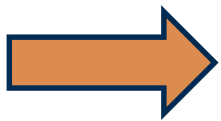
Conclusions et perspectives

→ *Additifs = facteur clé des effets observés*

- Effets observés sur la digestion, la respiration, la dénitrification, la maturité sexuelle et la reproduction des escargots, **plutôt aux faibles doses**¹
- Modèle dose-réponse non monotone²
- Relargage et dégradation des additifs = source de carbone ? effet perturbateur endocrinien?³

→ *Influence significative du mode d'introduction des PE dans les sols*

- Effets variables des PE ou PE+Digestat selon les cibles considérées  
 - Réduction de la respiration microbienne et de l'activité dénitrifiante en présence de PE (PE0, PE1)
 - Apport PE+digestat : annule les effets sur la respiration
 - Modulation des effets sur les escargots du PE en présence de digestat



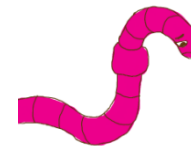
Facilitation du relargage, de la dégradation pendant et après la DA⁴?

Plus forte exposition des escargots du fait de la présence de la MO?



MERCI AU CONSORTIUM, AUX FINANCEURS (ADEME, ANR, INRAE),

ET AUX...



MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Les sacs plastiques compostables ne se dégradent pas en méthanisation

P. Dabert, M. Artaud, P. Derkenne, B. Saulier-Le Dréan, A. Trémier

INRAE – UR1466 OPAALE, 17 Av. de Cucillé, 35044 Rennes, France.

patrick.dabert@inrae.fr



Pourquoi étudier les plastiques compostables en méthanisation ?

2017 – interdiction des sacs plastiques à usage unique
2020 – interdiction des couverts plastiques jetables

Développement de sacs et objets en plastiques biodégradables

Lois pour la valorisation des biodéchets :
2025 - tri à la source des biodéchets par tous les français



Compostage



pouvant être jetés avec les biodéchets



Méthanisation

MAIS

- Retour des filières : dégradation incomplète en compostage, voire nulle en méthanisation !!!
- Quel est le devenir des microplastiques ?

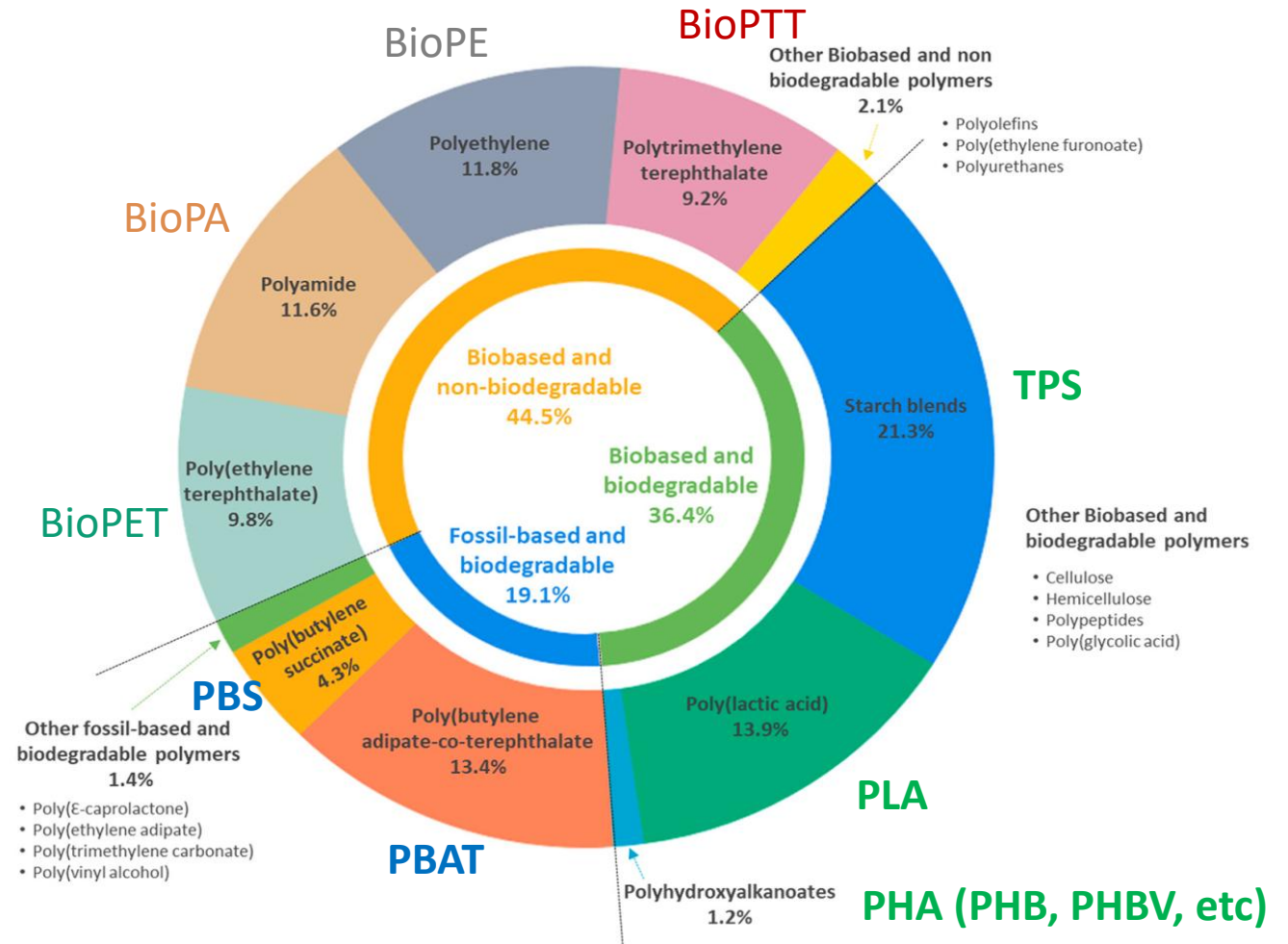
Les bioplastiques

Définitions :

Les bioplastiques sont les plastiques qui sont soit **biosourcés**, soit **biodégradables**

Les plastiques **compostables** sont une sous classe des plastiques **biodégradables**

Les microplastiques = particules entre **1µm et 5 mm**



Adapté de Cazaudehore et al. 2022

Fig. 2. Global production capacities of bioplastics in 2019 (Source: [European Bioplastics, 2019](#), Nova Institute).

Objectifs

- Mesurer la dégradation de plusieurs sacs commerciaux de collecte de biodéchets
- Comprendre les freins à la dégradation

Matériaux utilisés

- Sacs plastiques commerciaux

Pel = à base de PLA

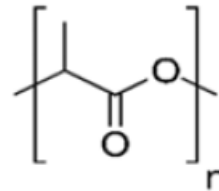
Dei = à base de PLA

Bio = à base d'Amidon

Pri = à base d'Amidon

Mbi = à base d'Amidon

Alf = biosourcé compostable (Fabriqué à partir de matières végétales renouvelables (féculé de pommes de terre))



Poly(lactic acid) (PLA)

- Sacs papiers

2F = 10 litres 2 soufflets

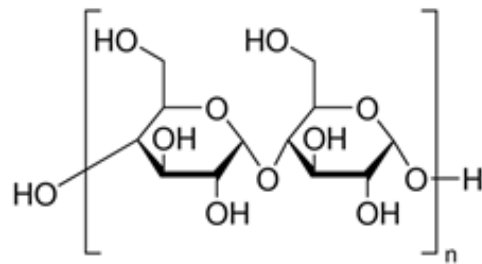
3F = 10 litres 3 soufflets

DV = 100 litres déchets verts 3 soufflets

SM = fruits et légumes marché

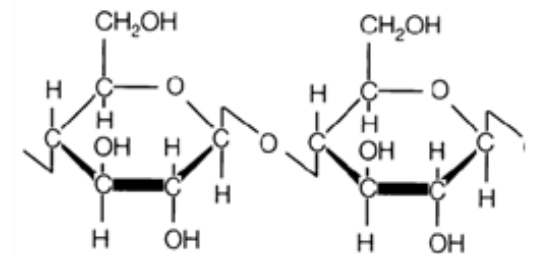
SP = Sum parois

SF = Sum Fond



Starch

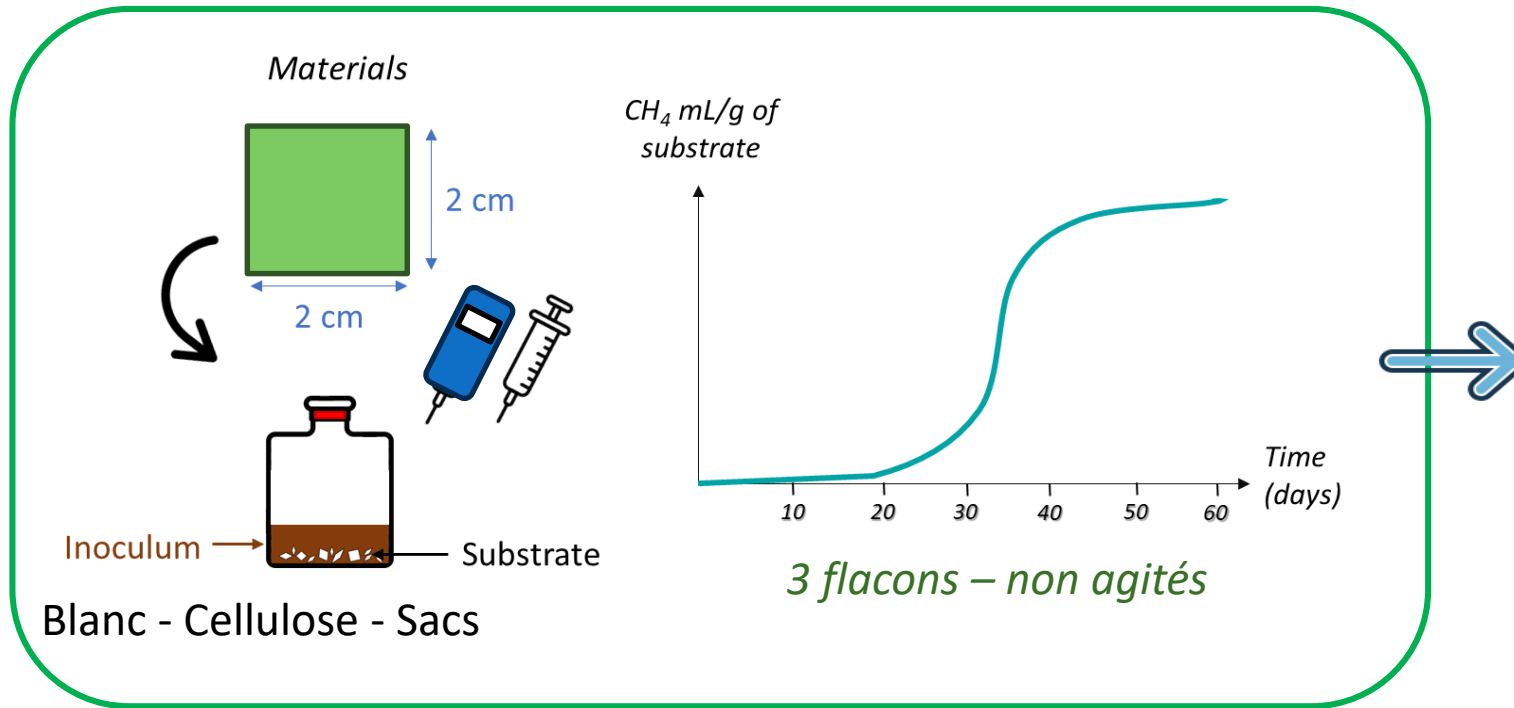
Tous avec la certification TÜV OK HOME compost



Cellulose

Suivi de la dégradation du matériau

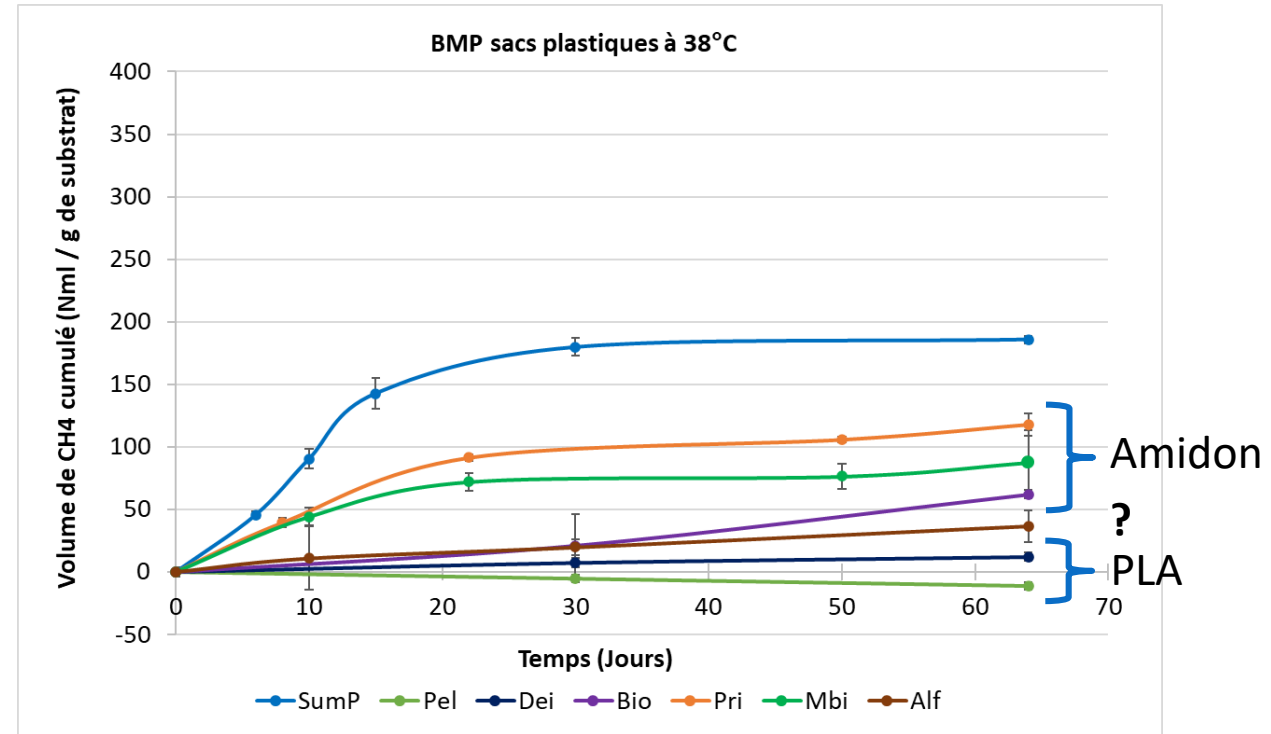
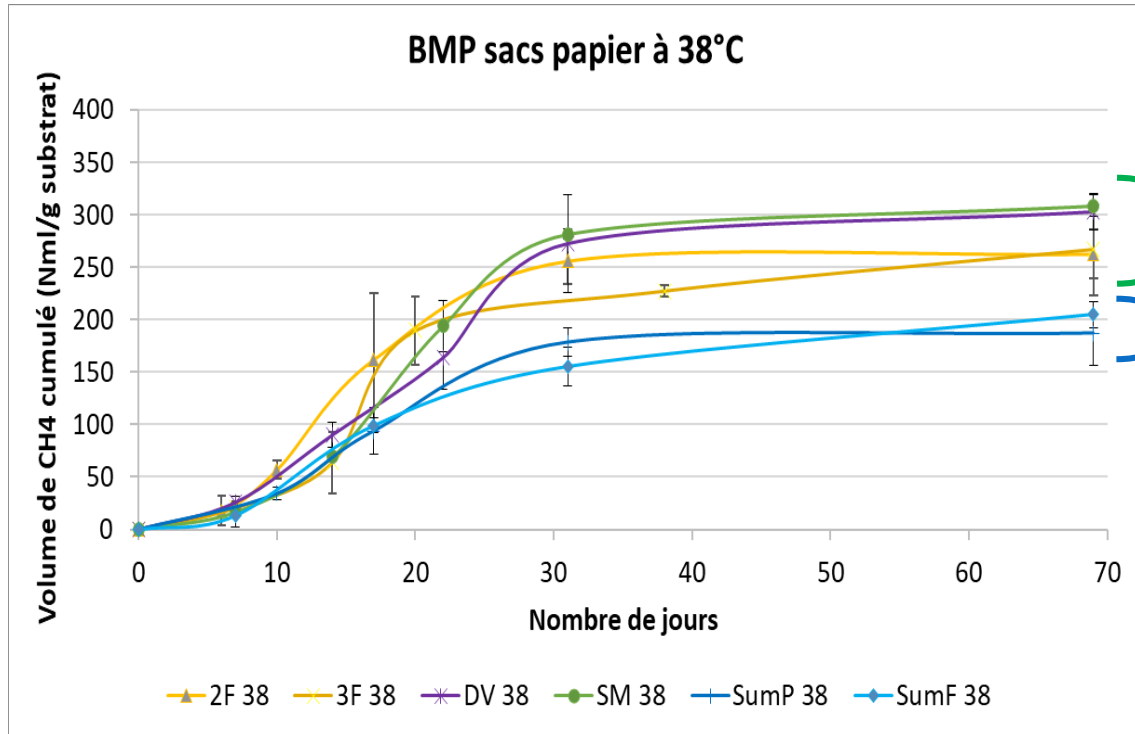
Séries de BMP à 38°C et 55°C



Calcul du taux de biodégradation par rapport à sa DCO

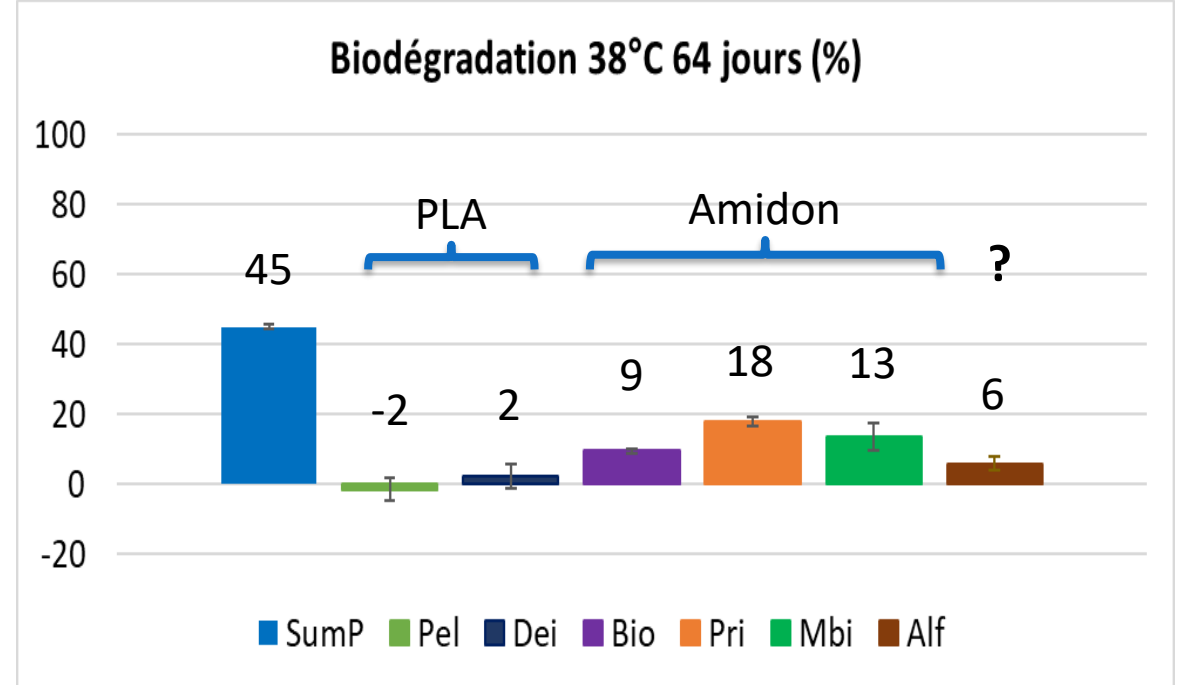
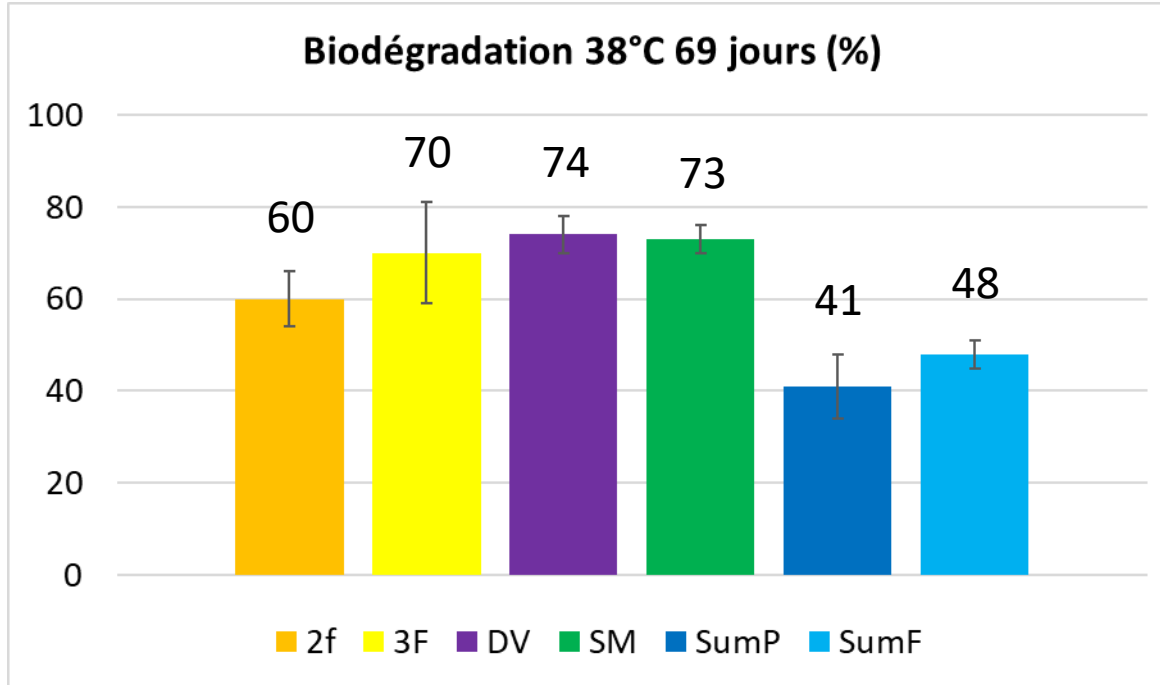


Production cumulée de méthane à 38°C



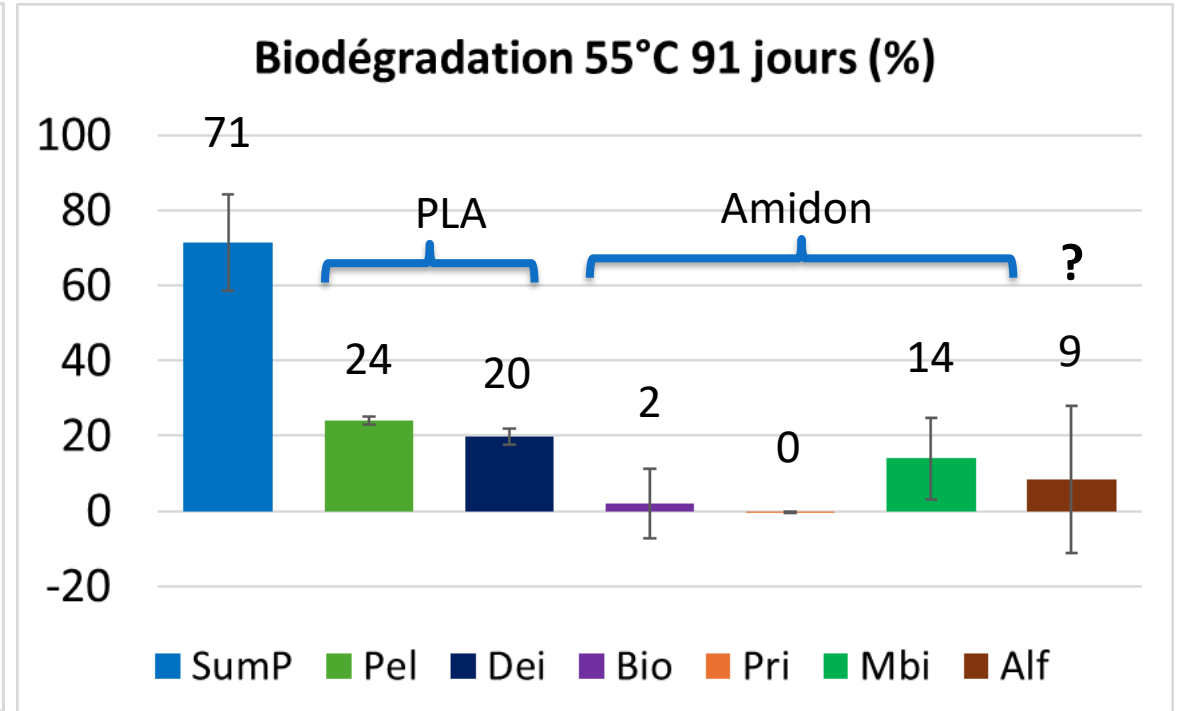
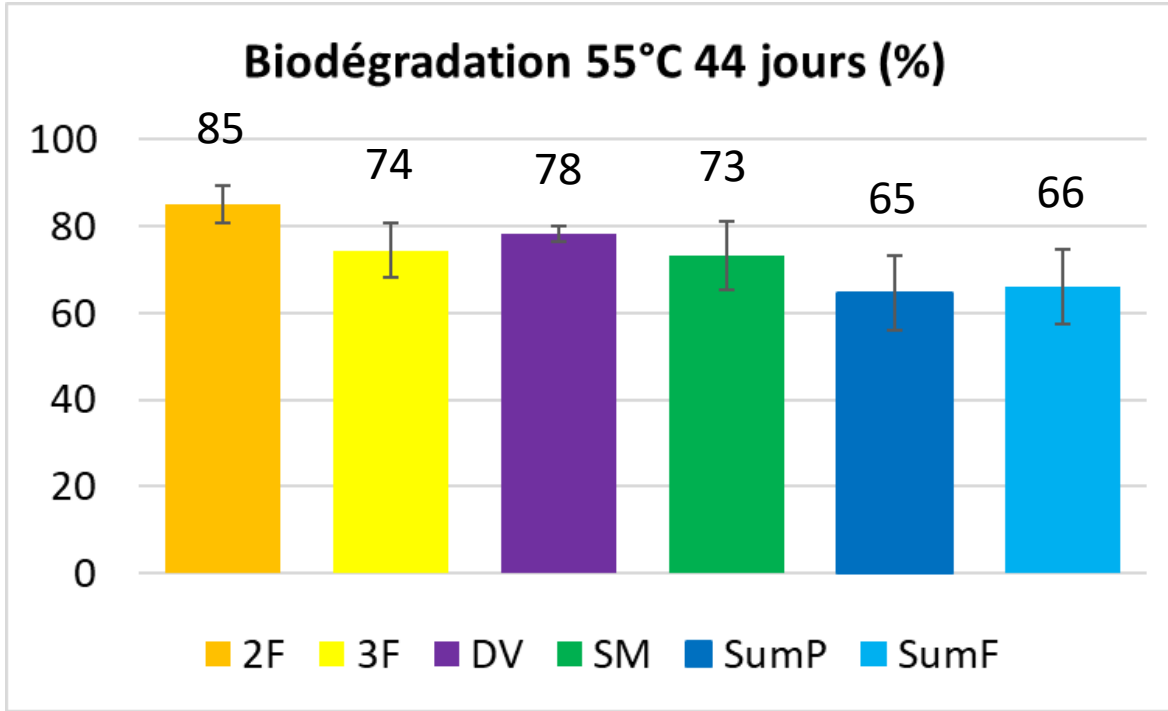
- 2 groupes dans les sacs Kraft et dans les sacs plastiques
- Les sacs SumP et les sacs de fruits et légumes gardent leur forme mais deviennent déchirables
- Biodégradation des sacs Krafts supérieure à celle des sacs plastiques

Biodégradation des sacs à 38°C



- Les sacs à biodéchets Sum ont un apprêt
- Les sacs à base de PLA ne se dégradent pas du tout
- Les sacs à base d'amidon ne se dégradent qu'à < 20%

Biodégradation des sacs à 55°C



- Les sacs Krafts se dégradent suffisamment
- Les sacs à base de PLA se dégradent mieux mais restent < 25%
- Les sacs à base d'amidon se dégradent moins bien < 15%

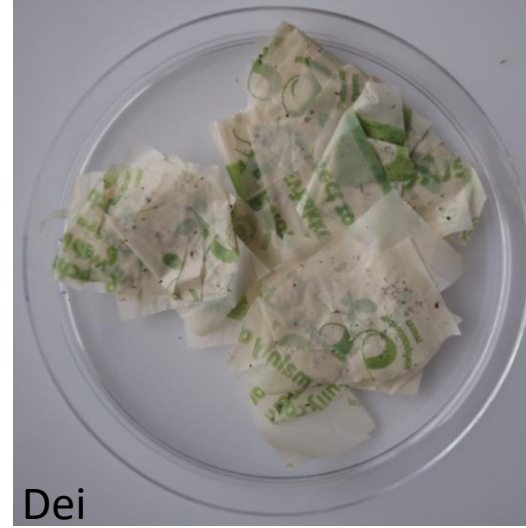
Etat des sacs après 64 jours de BMP à 38°C



Sum



Pel



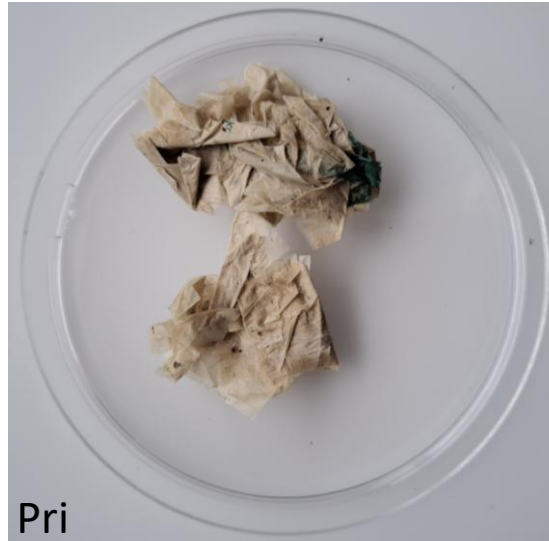
Dei

Boite de pétri 9 cm

Sacs plastiques peu dégradés



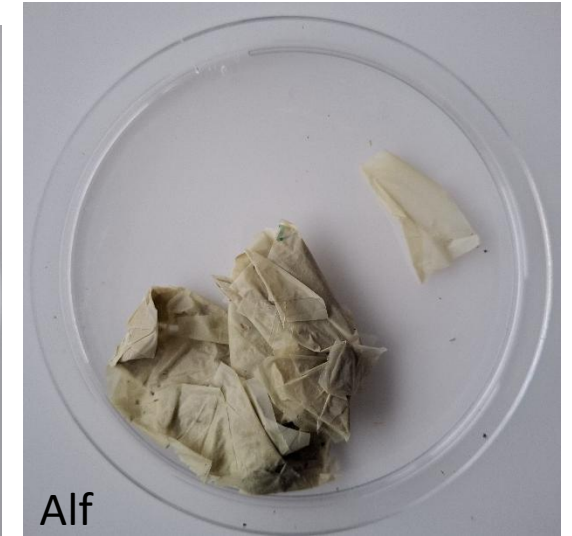
Bio



Pri

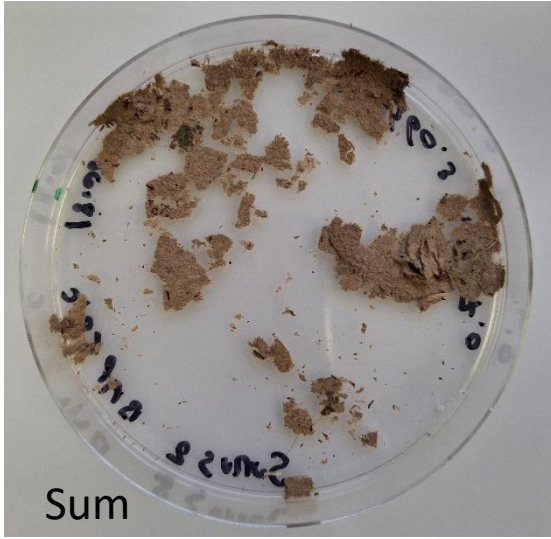


Mbi

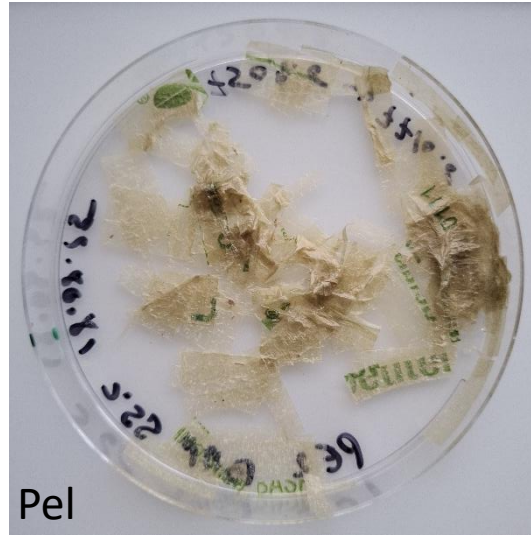


Alf

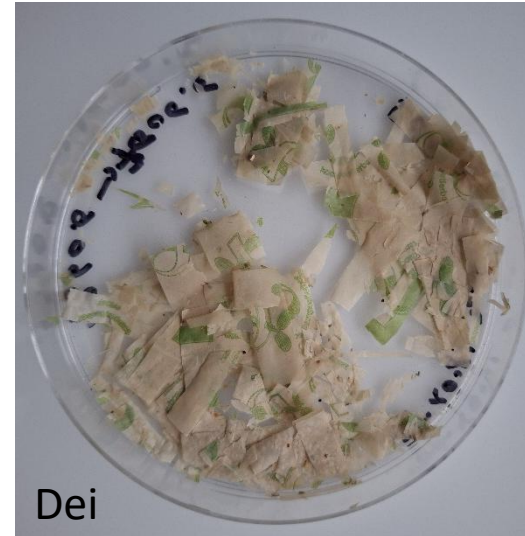
Etat des sacs après 91 jours de BMP à 55°C



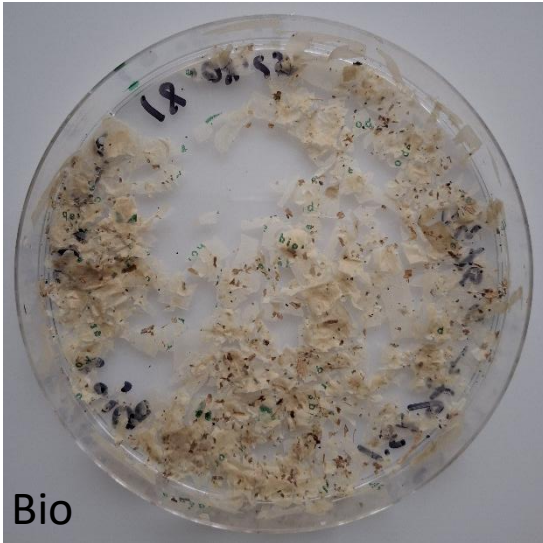
Sum



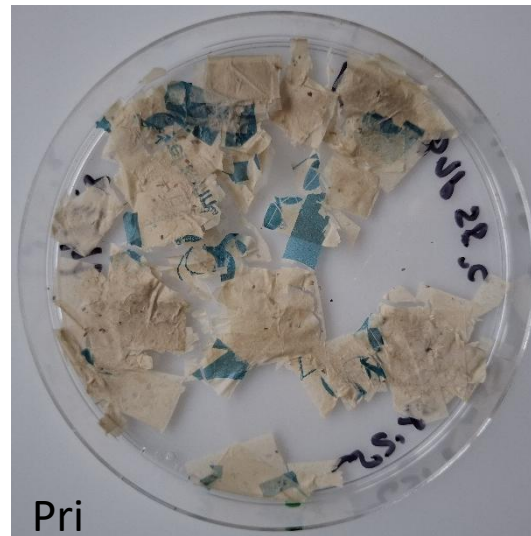
Pel



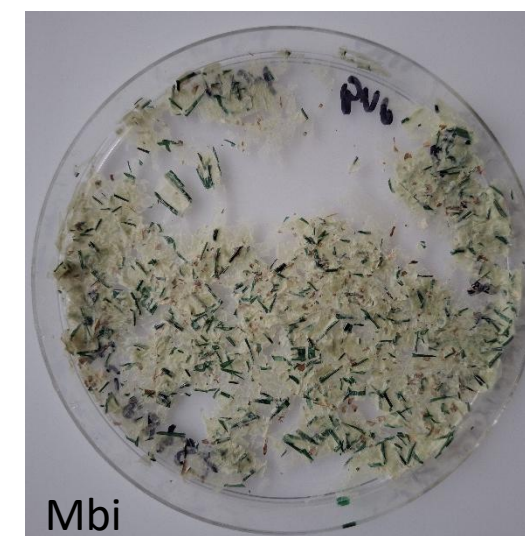
Dei



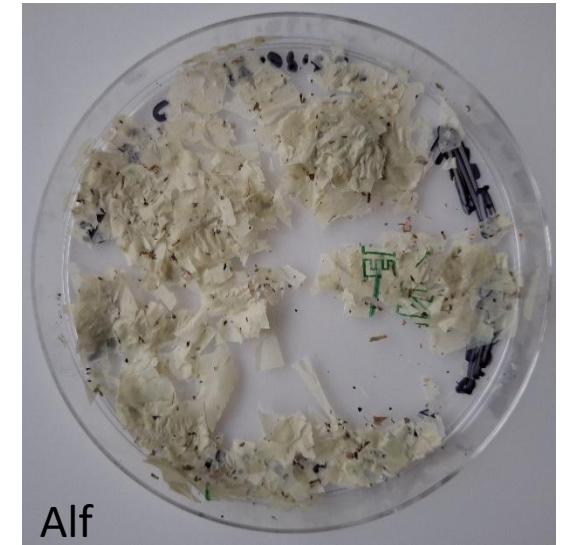
Bio



Pri



Mbi

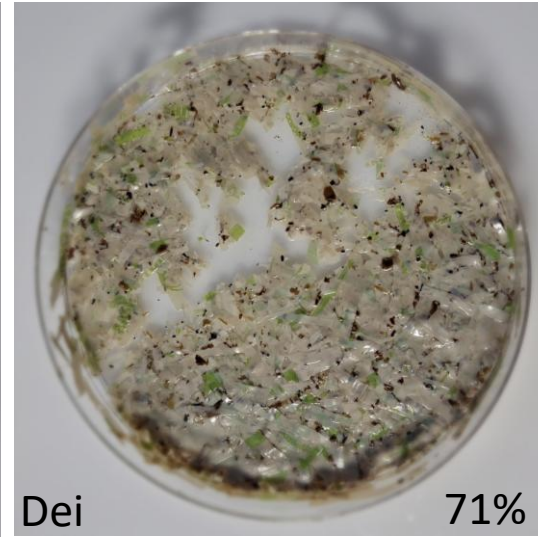
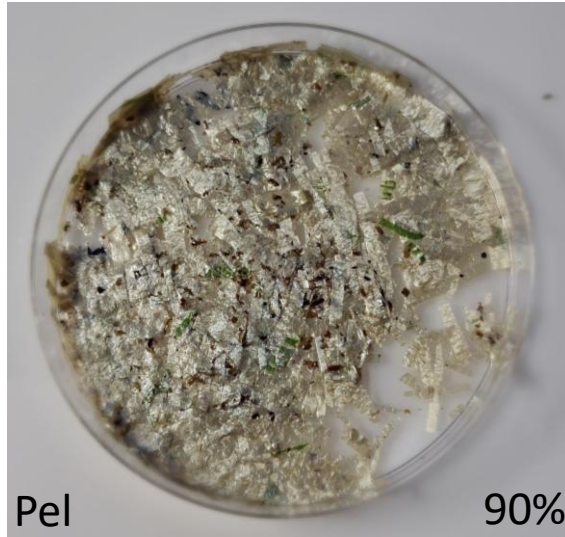
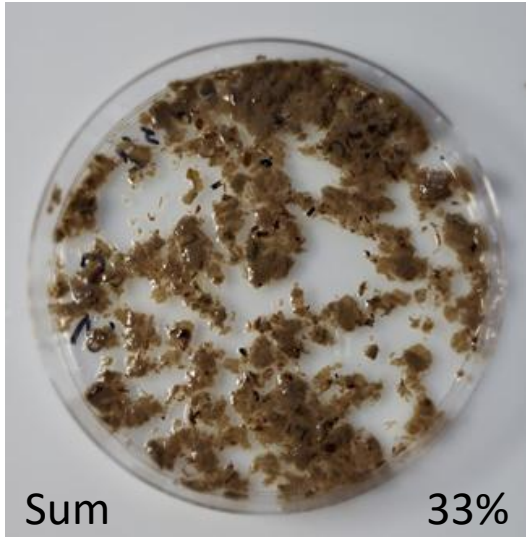


Alf

Boite de pétri 9 cm

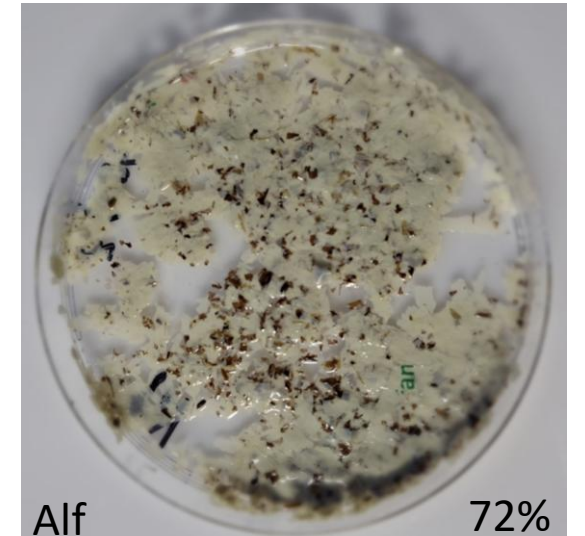
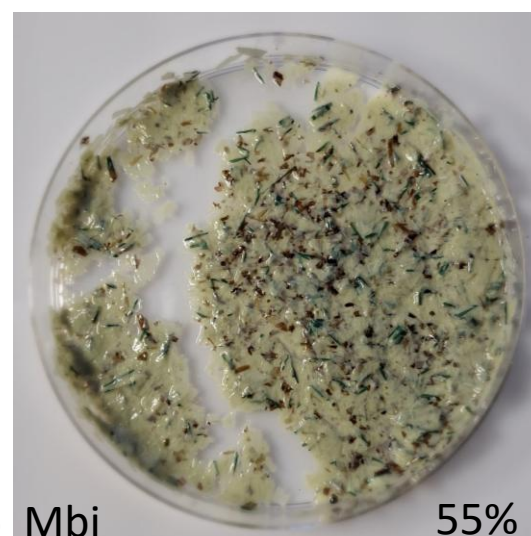
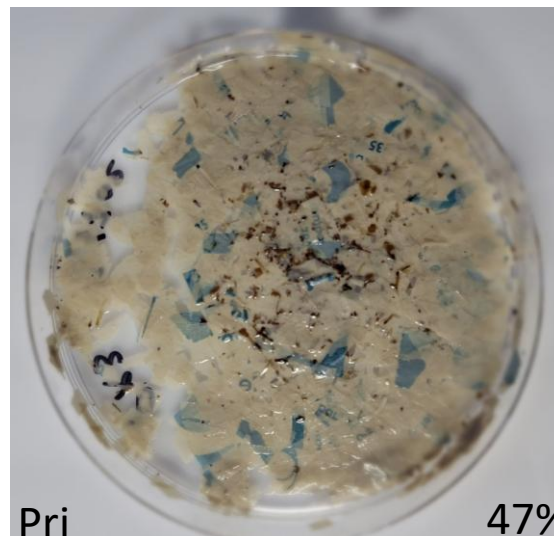
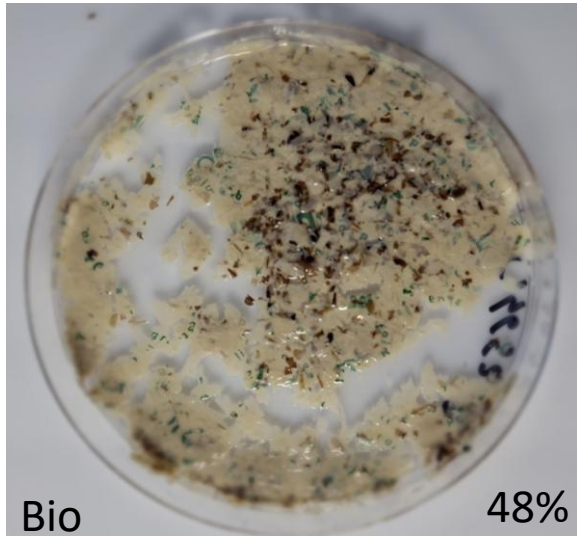
Sacs plastiques qui se fragmentent

Etat des sacs après 180 jours de BMP à 55°C



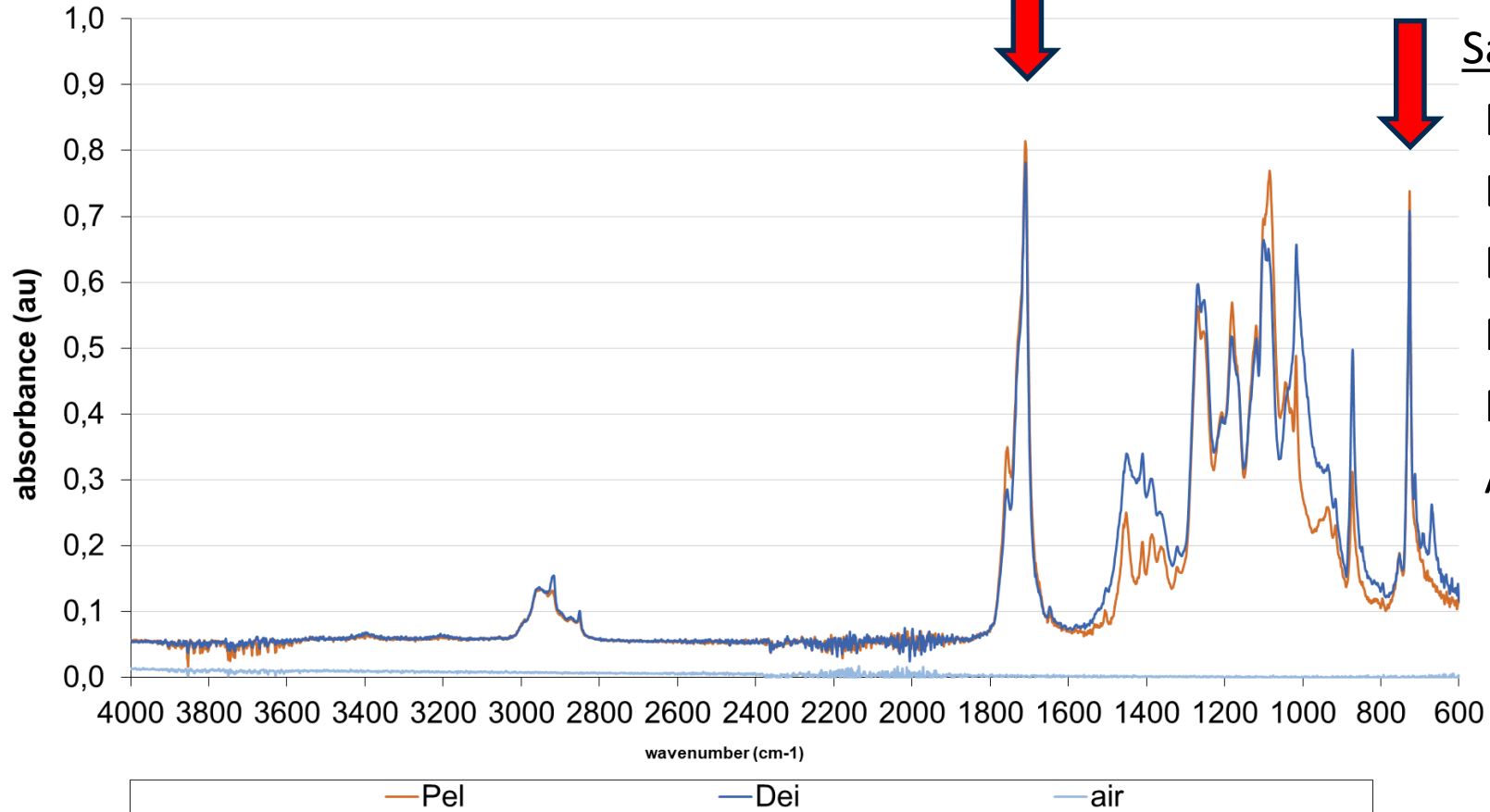
Boite de pétri 9 cm

Reste 47 à 90% de la
masse de plastique
Mais sous la forme de
+/- microplastiques



Pourquoi les sacs à base d'amidon ne se dégradent pas ?

ATR - FTIR



Sacs plastiques

Pel = PLA - **PBAT**

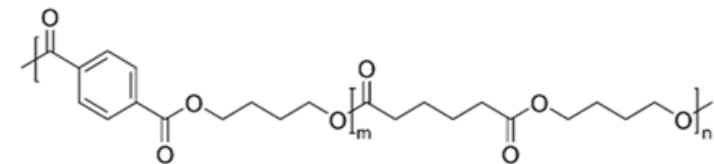
Dei = PLA - **PBAT**

Bio = Amidon

Pri = Amidon

Mbi = Amidon

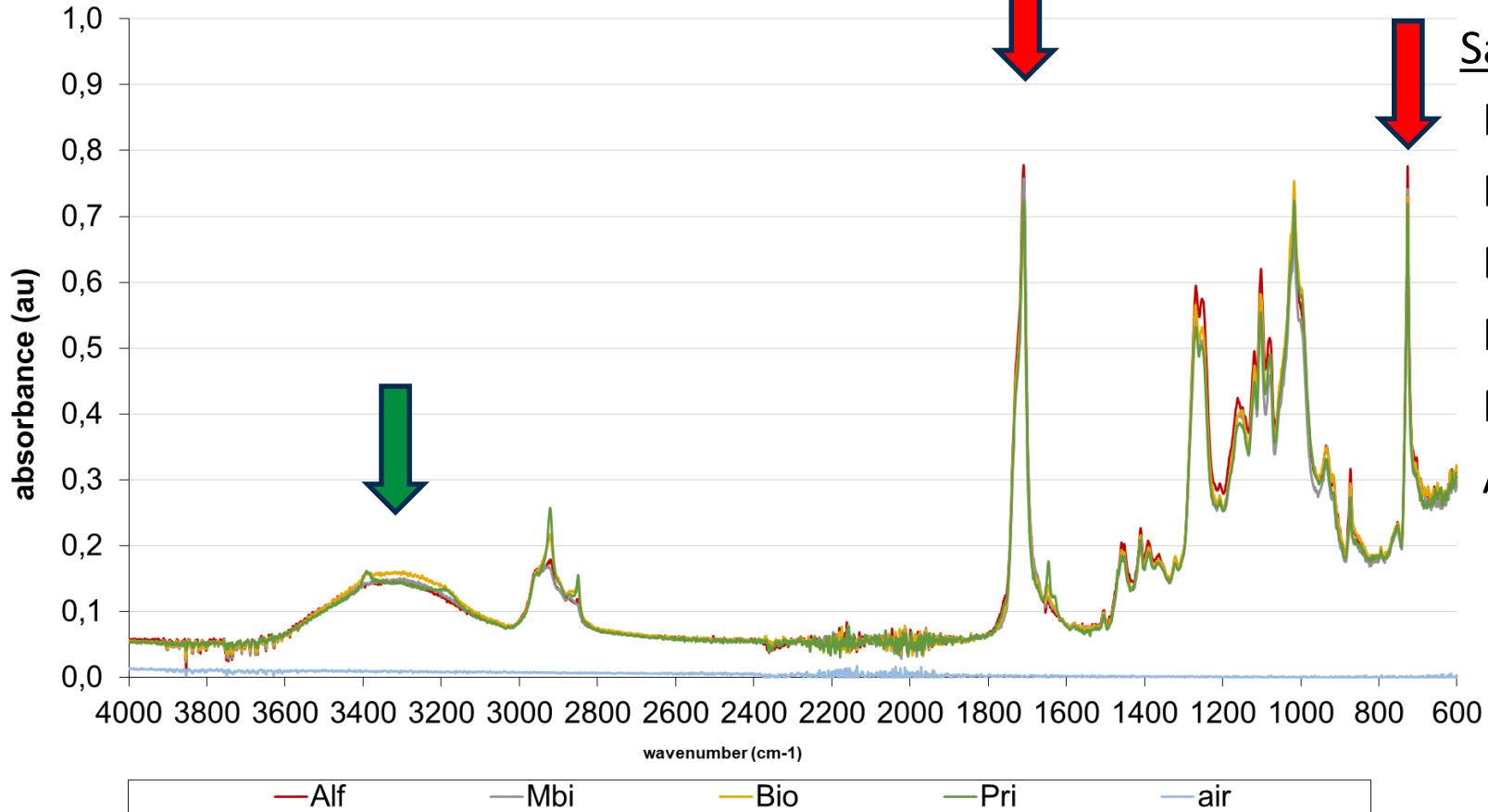
Alf = fécula de pommes de terre



Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)

Pourquoi les sacs à base d'amidon ne se dégradent pas ?

ATR - FTIR



Sacs plastiques

Pel = PLA - **PBAT**

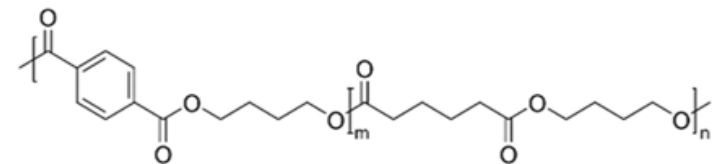
Dei = PLA - **PBAT**

Bio = Amidon - **PBAT**

Pri = Amidon - **PBAT**

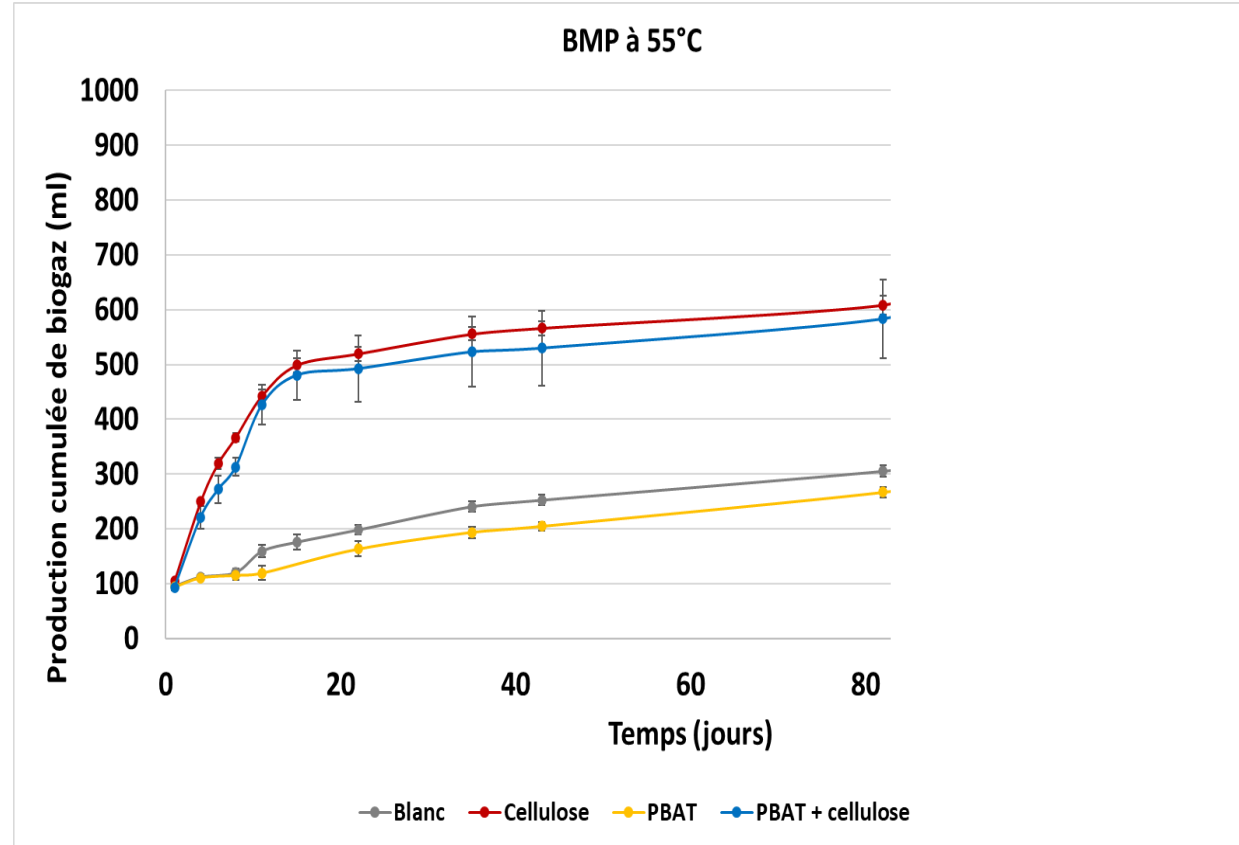
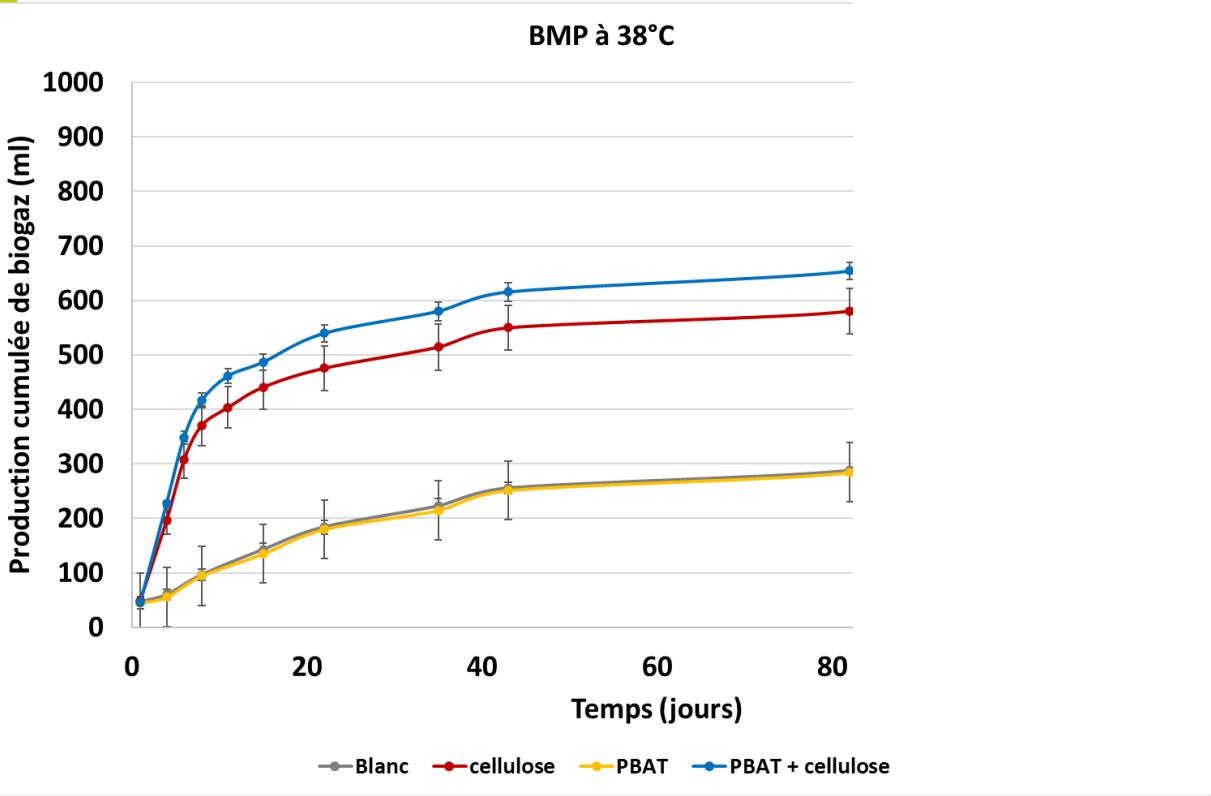
Mbi = Amidon - **PBAT**

Alf = féculle de pommes de terre



Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)

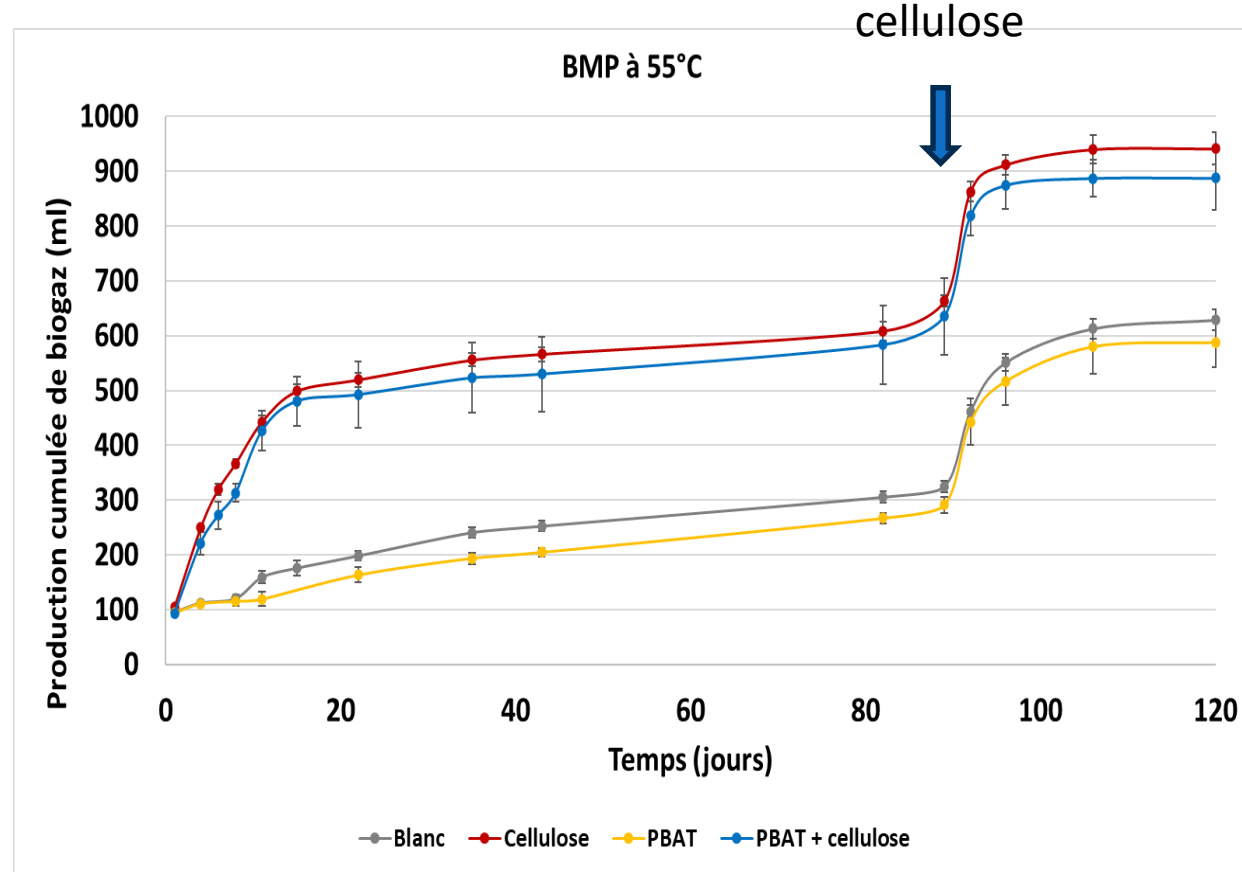
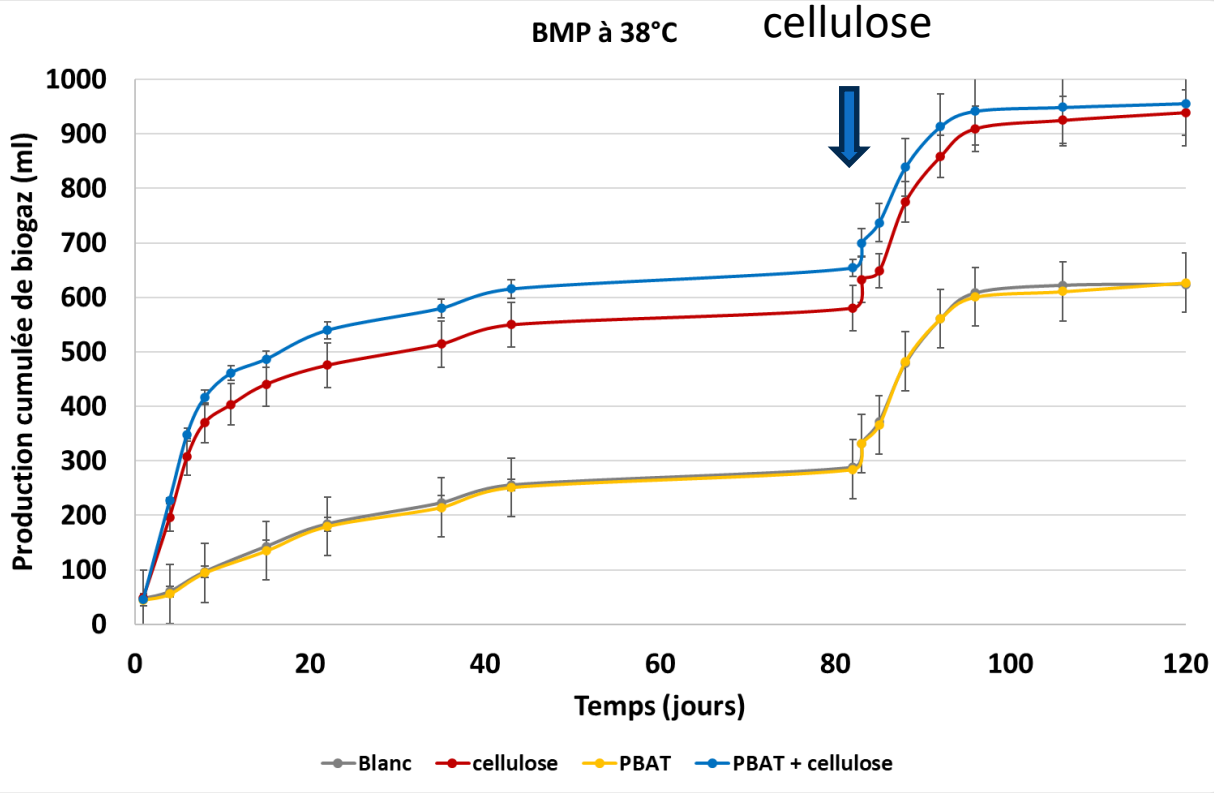
Le PBAT ne se dégrade pas en anaérobie



- Mais il ne semble pas inhibiteur

JRI - Journées Recherche Le Plasticien - Dijon - Matériaux 17 au 19 mars 2026

Le PBAT ne se dégrade pas en anaérobie



- Mais il ne semble pas inhibiteur

JRI - Journées Recherche Matériaux 17 au 19 mars 2026

Dégradation en pilote de micro-méthanisation



Agitateur à hélice

Réacteur/stockage lixiviat 250 L

Sortie biogaz

Réacteur piston 100 L

Recirculation du lixiviat
Pompe péristaltique

Conception et design : A, Degueurce, L, Blondel and A, Trémier (2020)

Chargement du pilote de micro-méthanisation

Les biodéchets sont mis dans des cassettes

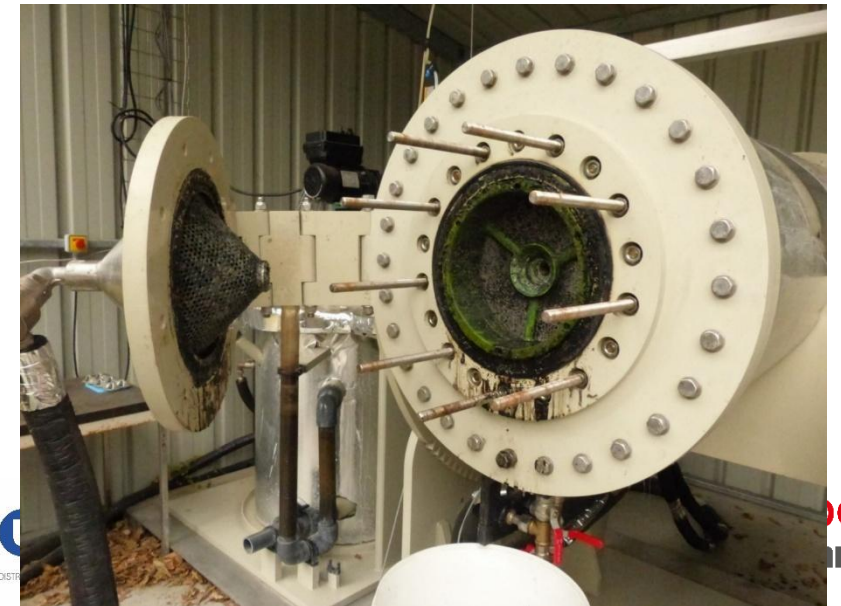


2



3

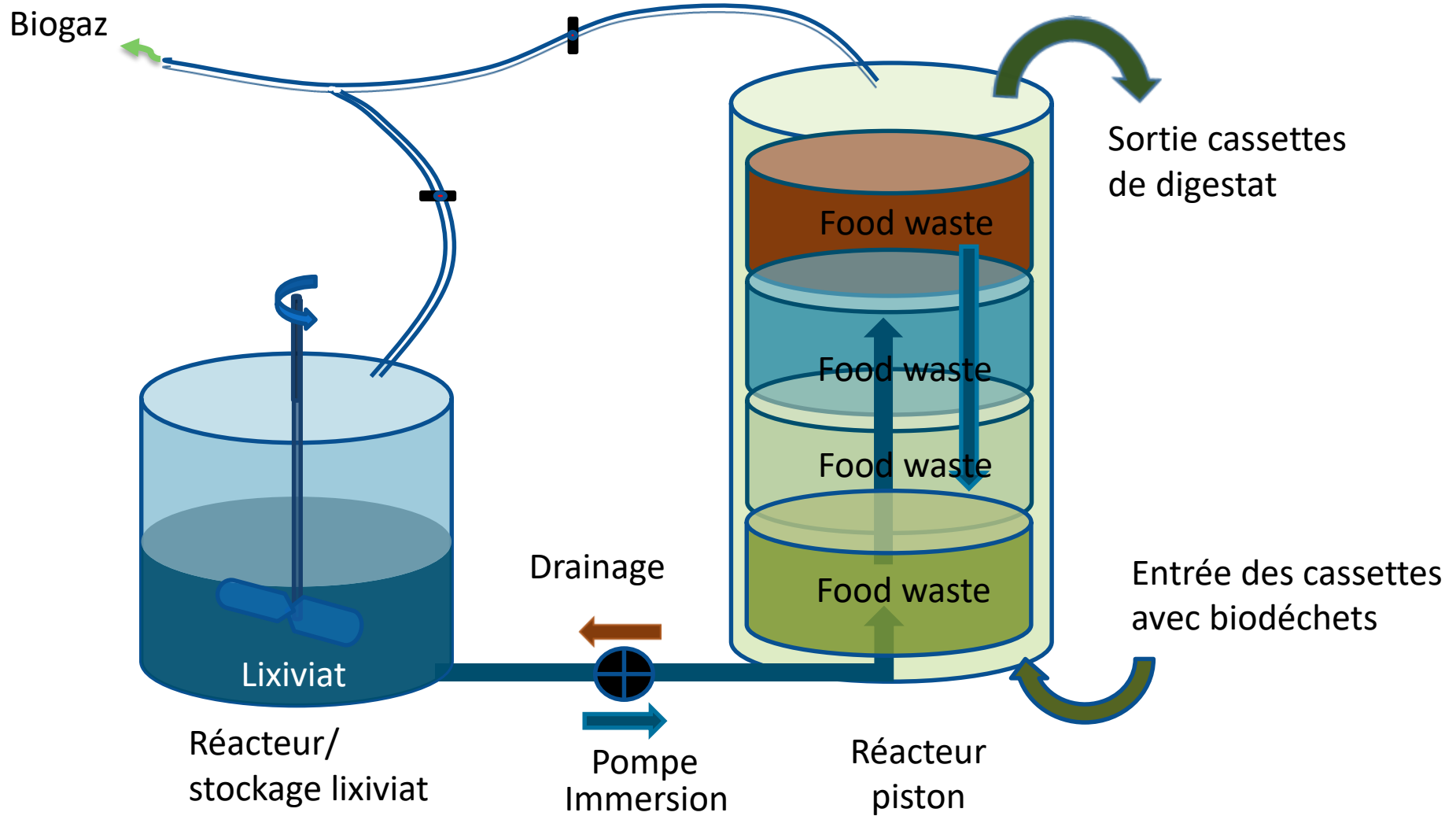
Les cassettes sont introduites dans le réacteur piston



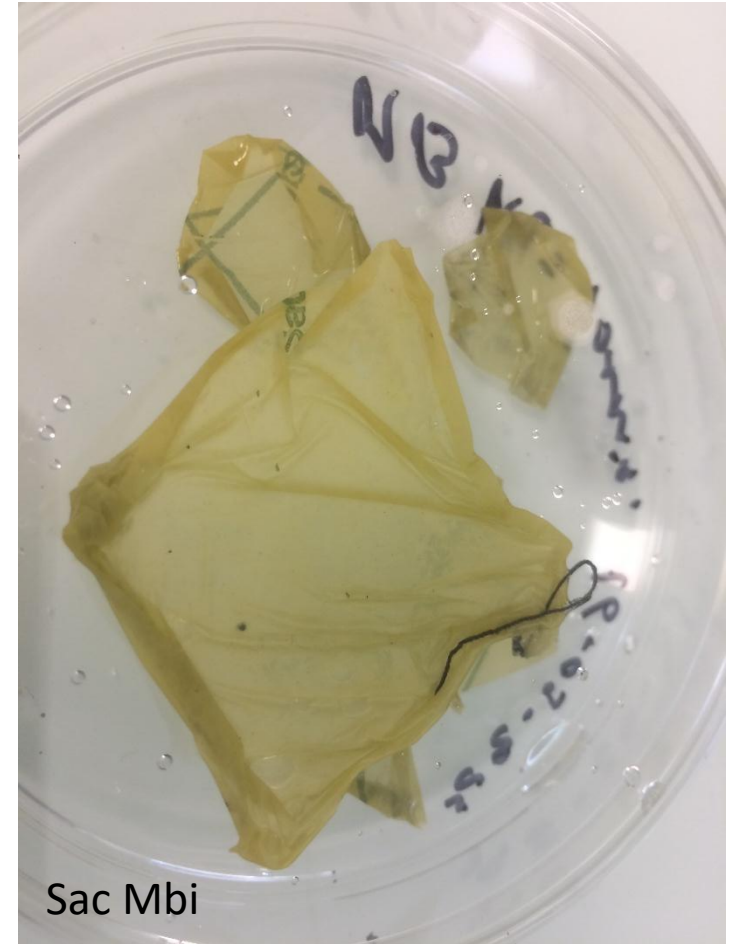
1 Le réacteur piston se bascule à l'horizontal



Fonctionnement du pilote de micro-méthanisation



Pas de dégradation en méthanisation sèche à 40°C et 8 semaines



Sac Mbi

Conclusions

- Les polymères « biodégradables » commerciaux actuels n'ont pas les propriétés requises pour faire des films plastiques
- Ils sont mélangés avec du PBAT, ou avec du PE, parfois jusqu'à 70% de la masse
- Ce PBAT n'est pas biodégradable en conditions de méthanisation
- Le PBAT est le composant majoritaire des sacs de supermarchés, des sacs de collecte de biodéchets, des films alimentaires, des films de paillage, et des liners de barquettes en cellulose compostables.
- Il est primordial de faire évoluer la réglementation sur :
 - La composition des matériaux
 - La définition d'une norme de spécification de la biodégradabilité anaérobie des plastiques

BioCyPlastclosecycle

1 **Romain Gloaguen**, Unilassale

Evaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture en méthanisation

2 **Nicolas Dagorn**, Arvalis

Evaluation de l'impact du changement climatique sur le potentiel de biomasse des cultures intermédiaires à vocation énergétique

3 **Sylvain Marsac**, Arvalis

Cultures intermédiaires à Vocation Énergétique : des ressources potentielles en biomasse à la hauteur des objectifs ?

4 **Florent Levavasseur**, INRAE, AgroParisTech, ECOSYS

Performances agro-environnementales de la méthanisation de CIVE sans élevage : modélisation basée sur des cas réels selon divers scénarios climatiques



Evaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture en méthanisation

Z. DEBBICHI¹, H.W ZUB-PREUDHOMME¹, R. GLOAGUEN^{2,*},

1 AgroTransfert Ressources et Territoires, 2 Chaussée Brunehaut, 80200 Estrées-Mons, France.

2 InTerACT UP 2018.C102, Institut Polytechnique UniLaSalle, 19 rue Pierre Waguet, 60000 Beauvais, France.

*Correspondance : romain.gloaguen@unilasalle.fr, +33 (0)3 44 06 38 75

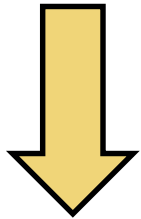


Le Projet METHABIOM

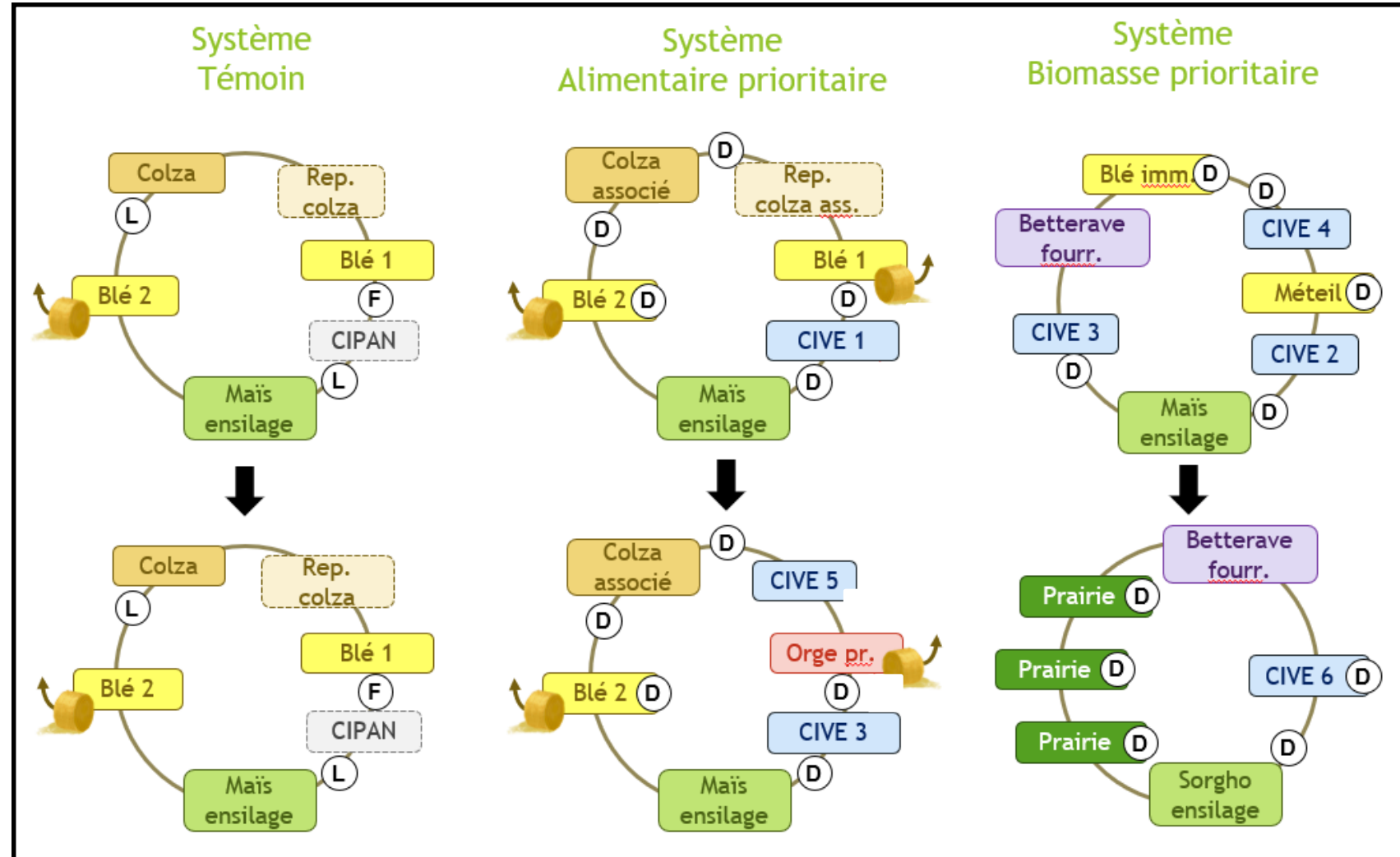
- ✿ ADEME GRAINE 2021 – fin en 11/2026
- ✿ Evaluation de la Durabilité des Systèmes d'Exploitation Mixtes Intégrant la Méthanisation pour une Amélioration de la Chaîne de Valeur de la Bioénergie
- ✿ Porté par UniLaSalle, en collaboration avec AgroTransfert-Ressources & Territoires, l'Université de Technologie de Compiègne, les Chambres d'Agriculture Régionales HdF
- ✿ Sur la base de travaux menés dans AD METHA (PEI 2020-2023) et Réseaux de Sites Démonstrateurs (2015-2020)

Les systèmes de culture étudiés






















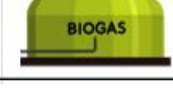
Réseau de Sites
2016-2020





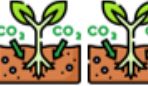


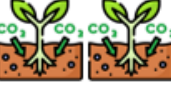






















AD METHA
2020-2023



Evaluation des performances des systèmes de culture

Campagnes		2017-2022	2017-2022	2017-2020	2021-2022	Principaux facteurs (avec leur contribution positive ou négative)
Système de cultures						
	No-till	Témoignage	Alimentaire	Biomasse	Biomasse	
Biomasse aérienne	-					
Biomasse exportée	-					
Biomasse grain	-			na	na	
Biomasse hors grain	-					
Rendement méthanogène	-					Biomasse hors grain exportée +++

Campagnes		2017-2022	2017-2022	2017-2020	2021-2022	Principaux facteurs (avec leur contribution positive ou négative)
Système de cultures						
	No-till	Témoignage	Alimentaire	Biomasse	Biomasse	
Carbone sol et Restitution de C	+ -					PRO +++ Colza ++
Emissions de gaz à effet de serre	-					PRO ++ Engrais ++
Stress hydrique	≈					Semis entre mai et début août +++
Lixiviation des nitrates						cultures d'hiver ++ Sur-fertilisation ++
IFT	+					
Salissement par adventices	+					

Evaluation de la performance énergétique

🎯 Questions évaluatives :

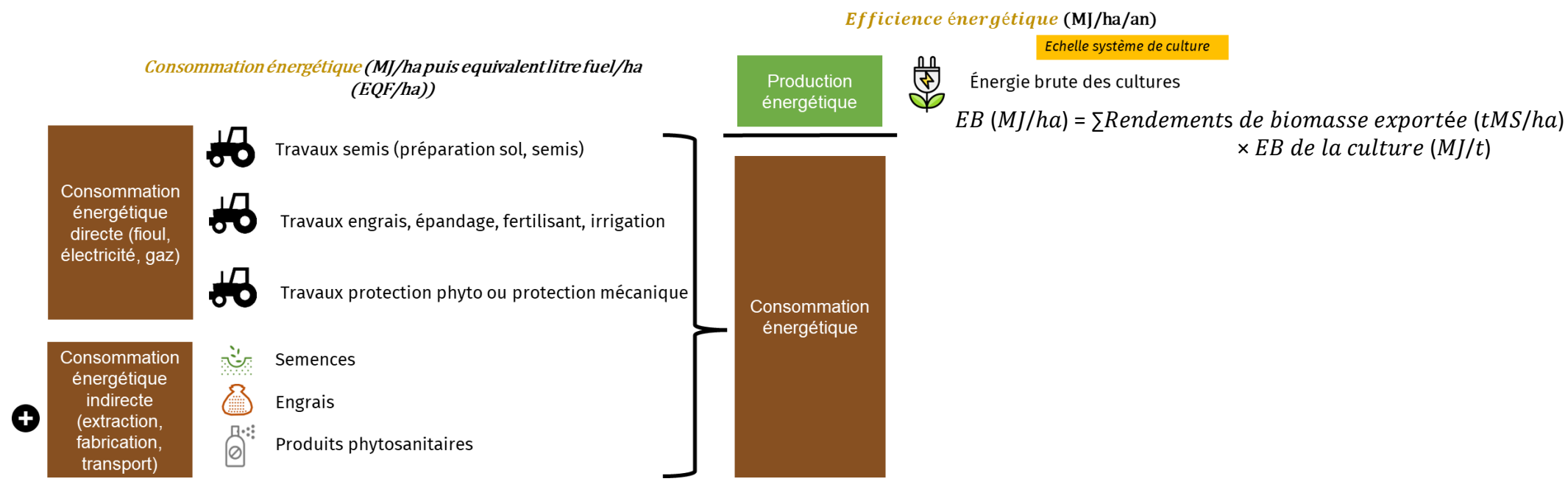
L'intensification de la production de biomasse entraîne-elle

- une plus grande consommation énergétique des systèmes ?
- une amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes ?

🔍 Indicateurs

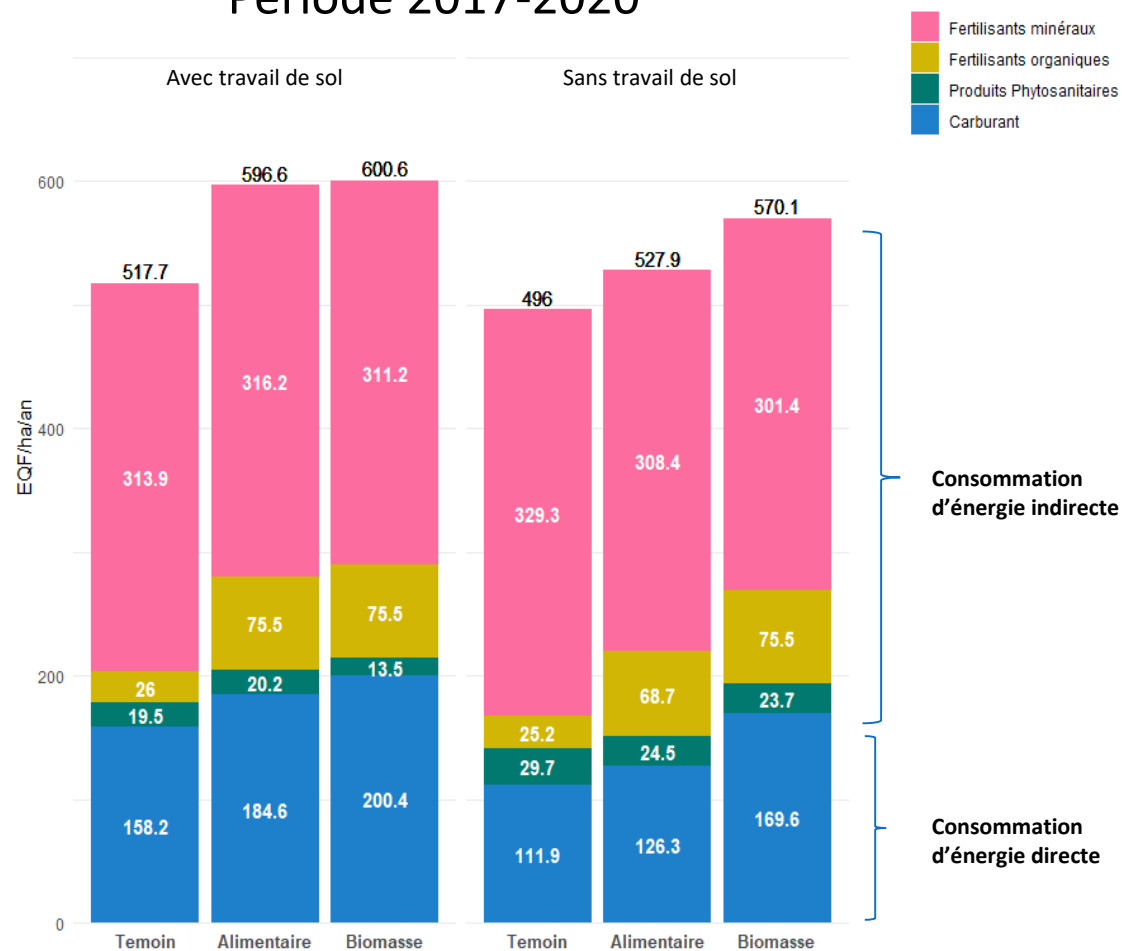
Consommation énergétique (MJ/ha/an) = Consommation directe et indirecte en énergie fossile

Efficacité énergétique = Production énergétique / consommation énergétique



Consommation énergétique

Période 2017-2020



Période 2020-2023

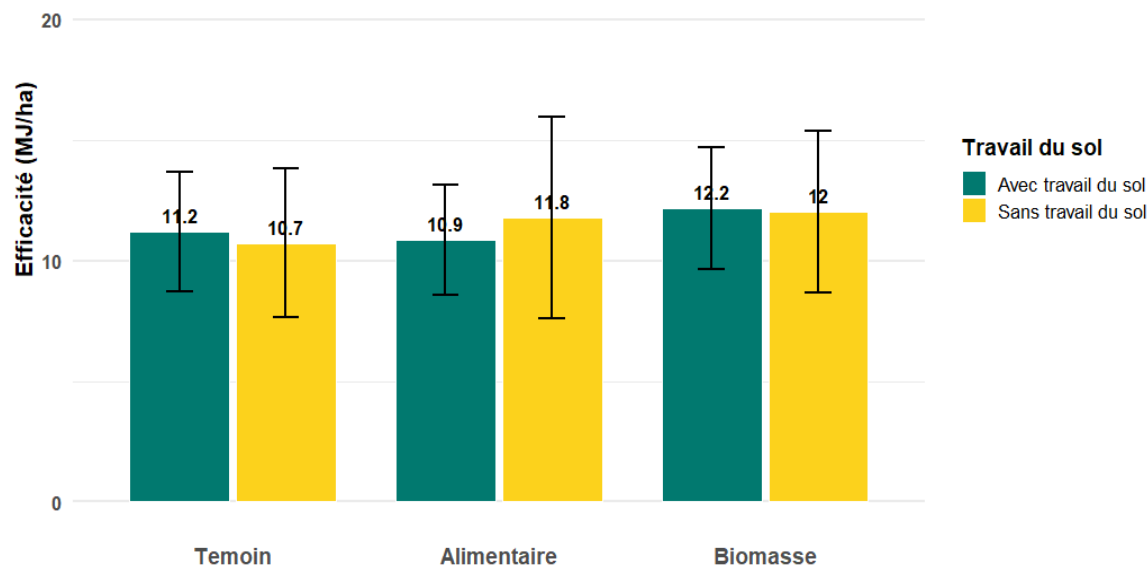


🔍 Quelque soit la modalité de travail de sol, l'augmentation de la production de biomasse d'un SdC induit une augmentation de la consommation d'énergie directe et indirecte.

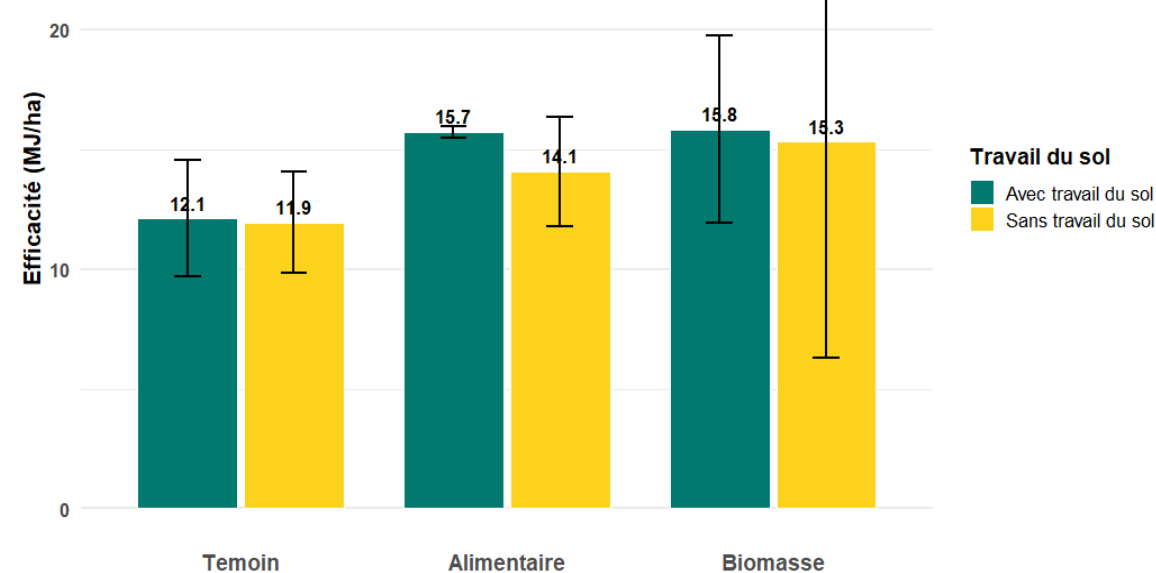
🔍 L'ajout de la prairie dans le système biomasse fait baisser la consommation énergétique globale de ce système.

Effizienz énergétique

Période 2017-2020



Période 2020-2023



Les efficacités énergétiques sont globalement similaires entre les modalités avec et sans travail du sol pour les systèmes Témoin et BP.

Des tendances similaires à celles de la première période sont retrouvées pour les systèmes Témoin et BP, avec des efficacités énergétiques globalement stables entre les modalités avec et sans travail du sol. En revanche, une dégradation de l'efficacité est observée pour le système AP en absence de travail du sol, en lien avec une baisse des rendements et une hausse de la consommation d'énergie.

Effizienz énergétique

Impact du choix de valorisation entre alimentation et méthanisation

Le blé immature a un fort potentiel méthanogène. En même temps, il représente un complément intéressant pour l'herbe en lieu et place du maïs ensilage.

Le méteil constitue un fourrage riche en protéine. Un méteil riche en seigle et triticale peut être intéressant pour le méthaniseur.



Le maïs est intéressant pour l'élevage et la méthanisation.

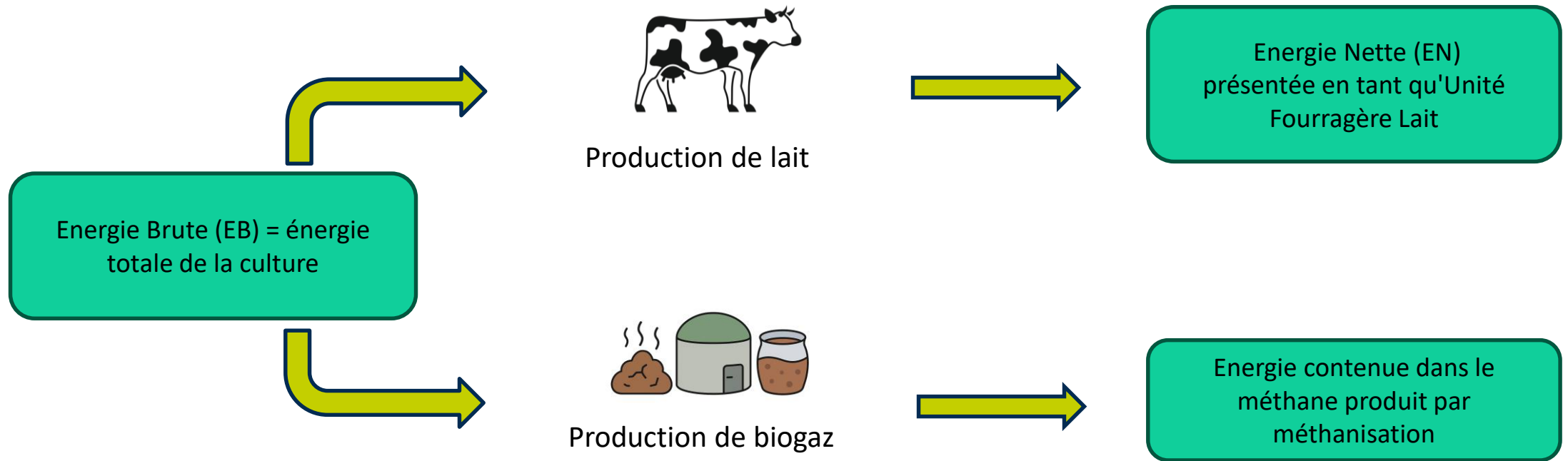
Comment l'agriculteur fait le choix d'orienter ses cultures vers la méthanisation ou vers l'alimentation animale ? Quels gains /pertes pour l'agriculteur ?



Construire des scénarii de répartition des cultures entre débouché alimentation animale et méthanisation

Effizienz énergétique

Hypothèse : choix de 2 voies de valorisation de l'énergie produite par les systèmes de culture



Méthode de calcul :

✦ $EB (MJ/ha) = \sum \text{Rendement de biomasse exportée (tMS/ha)} \times EB \text{ de la culture (MJ/t)}$

✦ $EN (UFL \text{ puis } MJ/ha) = \sum \text{Rendement de biomasse exportée (tMS/ha)} \times UFL \text{ de la culture (MJ/t)}$

✦ $\text{Mètre cube de gaz (m}^3\text{CH}_4 \text{ puis MJ/ha)} = \sum \text{Rendement de biomasse exportée (tMS/ha)} \times \text{Potentiel méthanogène de la culture (Nm}^3\text{CH}_4\text{/t)}$

1 UFL = 7,11 MJ

1 m³CH₄ = 37 MJ

Effizienz énergétique

Construction de scénarii de répartition de la biomasse produite entre alimentation animale ou méthanisation

Scénario 1 : Métha++



- **Scénario extrême** qui maximise la biomasse exportée pour la méthanisation sans aucune valorisation de cultures en élevage.

Scénario 2 : Métha+



- **scénario intermédiaire** qui privilégie la méthanisation avec une diminution du volume de maïs et des cultures intermédiaires valorisés en alimentation animale.

Scénario 3 : Elevage+



- **scénario intermédiaire** qui privilégie l'alimentation animale en valorisant la moitié du volume de maïs en élevage en plus des cultures intermédiaires.

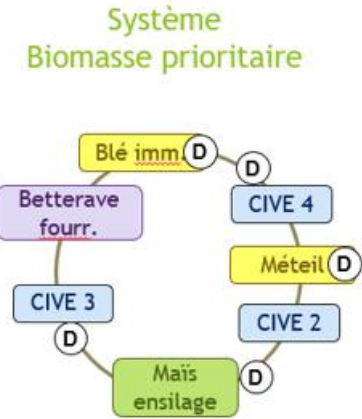
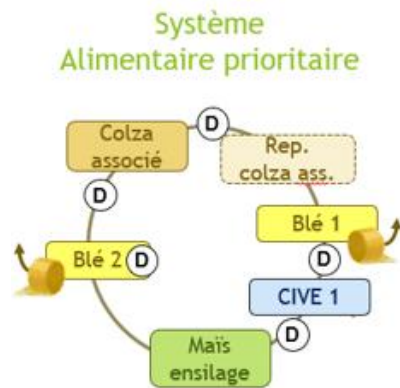
Scénario 4 : Elevage++



- **scénario extrême** qui maximise la biomasse exportée pour l'alimentation animale avec un faible volume de cultures valoriser en méthanisation.

Effizienz énergétique

Construction de scénarii de répartition de la biomasse produite entre alimentation animale ou méthanisation



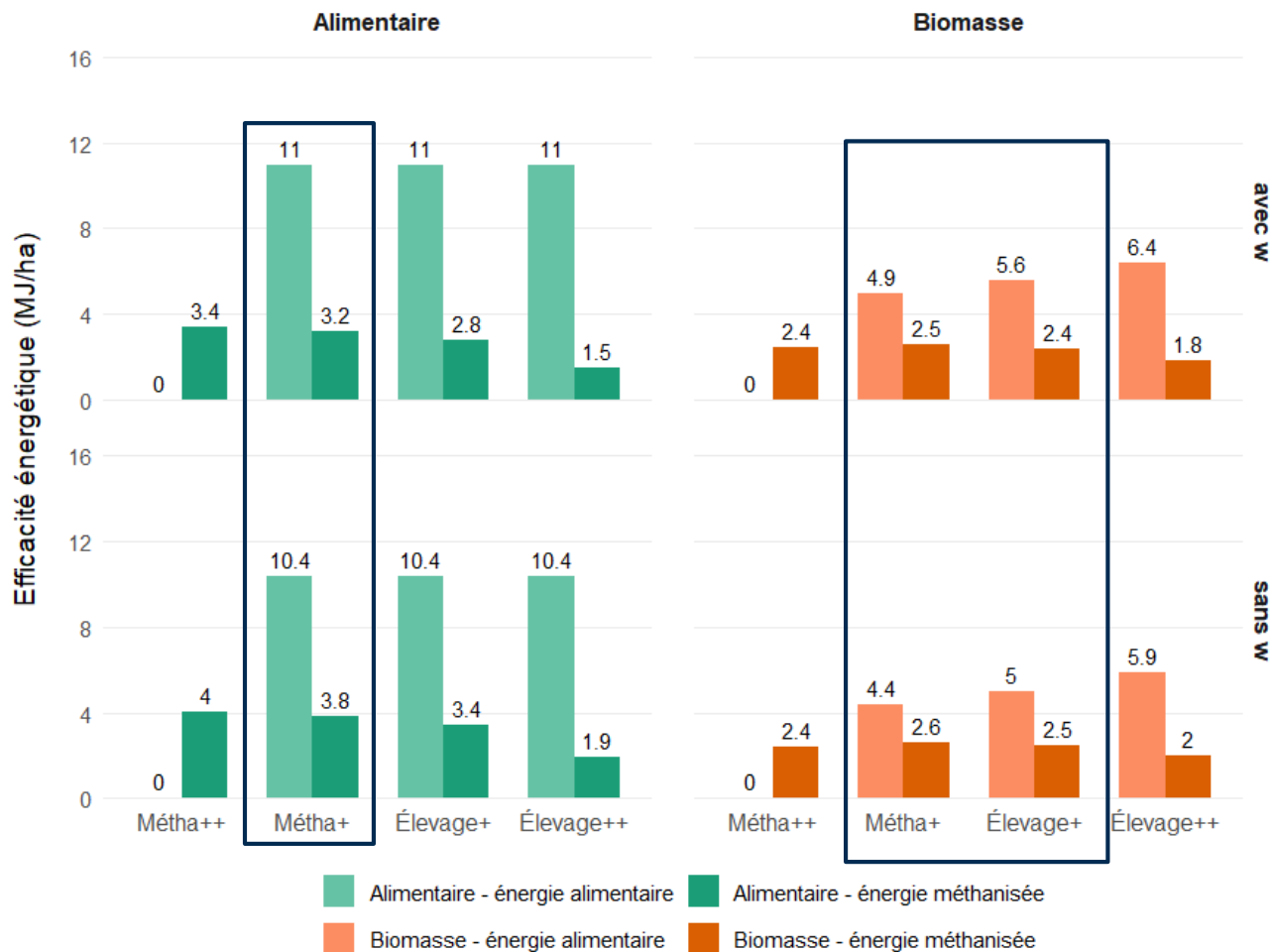
	CIVE	Maïs ensilage	Blé immature	CIVE	Méteil	Maïs ensilage
Métha++	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Métha+	100%	80%	100%	100%	50%	80%
Elevage+	100%	50%	100%	100%	50%	50%
Elevage++	100%	0%	100%	100%	0%	0%

Part de la biomasse qui part en méthanisation

Efficience énergétique

Résultats

	Maïs ensilage	Méteil	Maïs ensilage
Métha++	100%	100%	100%
Métha+	80%	50%	80%
Elevage+	50%	50%	50%
Elevage++	0%	0%	0%



✿ En Alimentaire, le **scénario intermédiaire Métha+** — apparaît comme le plus pertinent. Il permet de maximiser simultanément la production de méthane et d'énergie fourragère.

✿ Pour le système Biomasse, les **scénarii intermédiaires Métha+ et Elevage+** — présentent une meilleure efficacité énergétique pour la méthanisation tout en maintenant une efficacité fourragère raisonnable. Ces scénarios apparaissent ainsi comme les meilleurs compromis entre production de méthane et maintien de la fonction alimentaire.



Et la suite ?

- ✎ Publication de fiches techniques à destination des agriculteurs et conseillers sur les choix techniques liés à la production de biomasse et leurs impacts sur la durabilité des systèmes de culture
- ✎ Travail de thèse de Salma AMSAGUINE : typologie des méthaniseurs Hauts-de-France + bilan des flux d'azote sur chaque type => allez voir ses deux posters !
- ✎ Analyses de cycle de vie sur les 5 types de méthaniseurs identifiés en Hauts-de-France (webinaire CTMB/ATEE Club Biogaz le 15/06/2026 14-15h)
- ✎ Approche filière avec stagiaire M2 – démarrage 01/04/2026

romain.gloaguen@unilasalle.fr, +33 (0)3 44 06 38 75





Impact du changement climatique sur le potentiel de biomasse des CIVE

N. Dagorn¹, O. Deudon¹, C. Richard², S. Tesseron², A. Michel², S. Marsac¹.

¹ARVALIS – Institut du végétal, Station Inter-instituts, 6 chemin de la côte vieille, 31450 Baziège (n.dagorn@arvalis.fr),

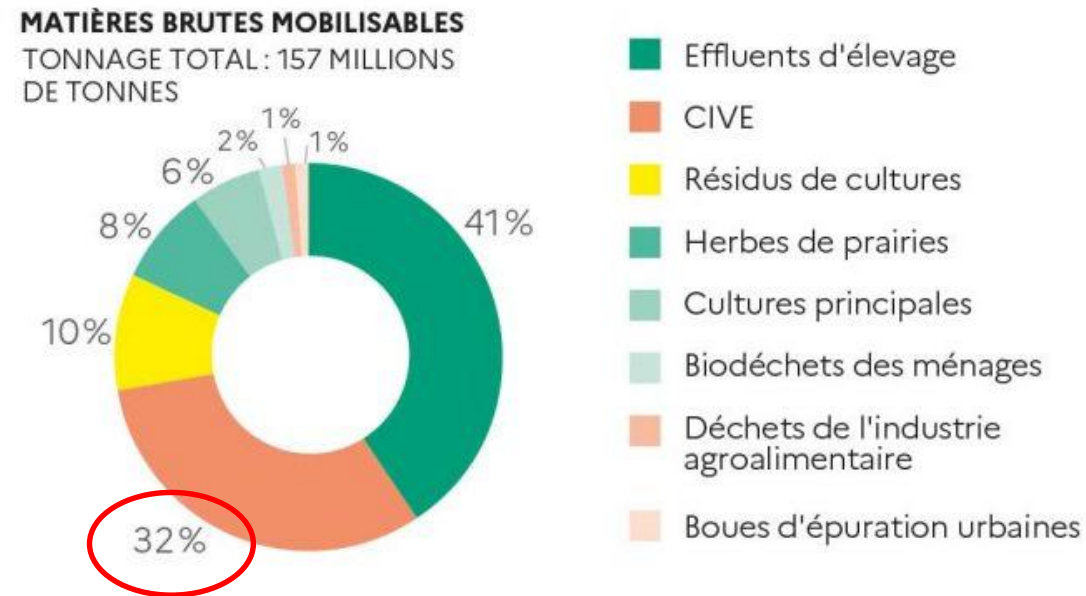
²ENGIE Lab Crigen, 4, rue Joséphine Baker, 93240 Stains.



Contexte

- Les CIVE pourraient fournir jusqu'à 20 Mt MS en 2050 pour contribuer à la neutralité carbone via la méthanisation (ADEME, 2021 ; Solagro, 2024 ; Launay et al., 2023)
- Ces études prospectives reposent sur des hypothèses de rendement issues de programmes de recherche récents (RECITAL, REFLEX'CIVE, PAMPA...)

A l'horizon 2050 :
D'après le scénario tendanciel de la prospective de l'ADEME



Le changement climatique peut-il impacter le potentiel des CIVE et donc la réalisation des objectifs de développement de la méthanisation en 2050 ?

Rappel de la définition d'une CIVE

CIVE = Culture Intermédiaire à Vocation Energétique



Conduite des CIVE d'hiver

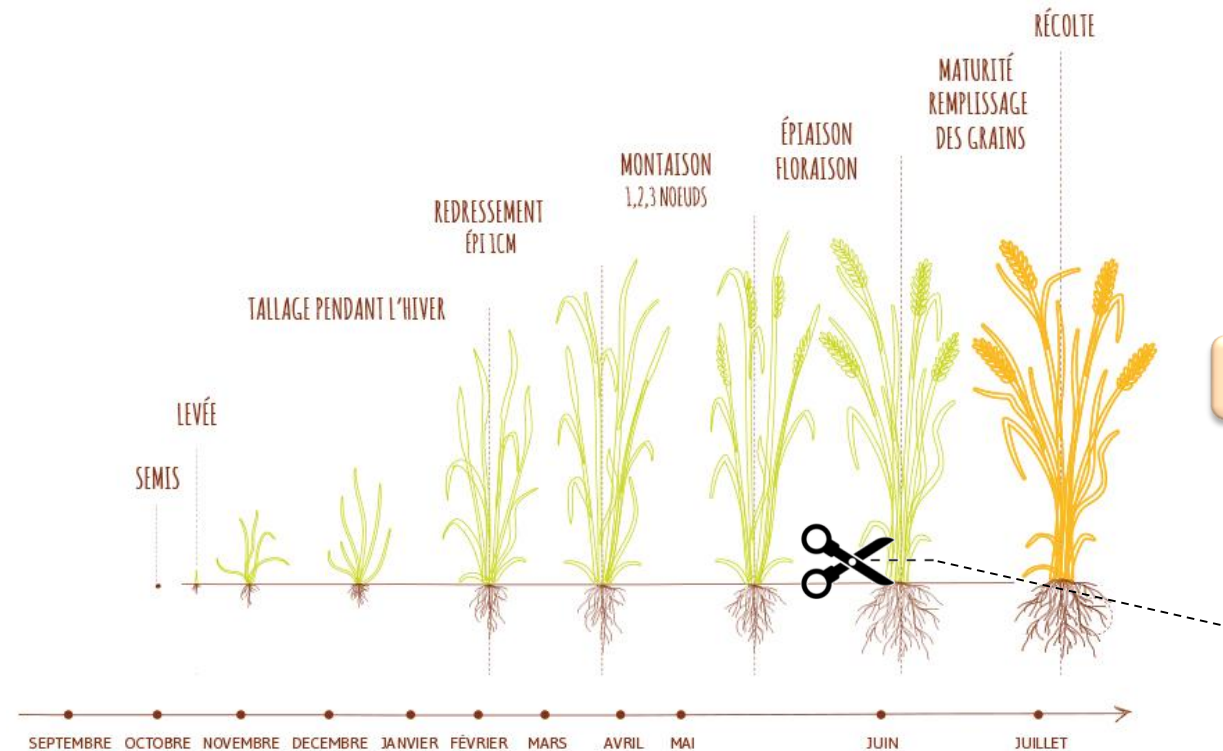
céréale, colza,
maïs ensilage

CIVE hiver

maïs, sorghos,
soja

Semis
15/09 – 15/10

Récolte
20/04 – 15/05



Un compromis entre la CIVE d'hiver et la culture principale suivante.

Stade épiaison / floraison

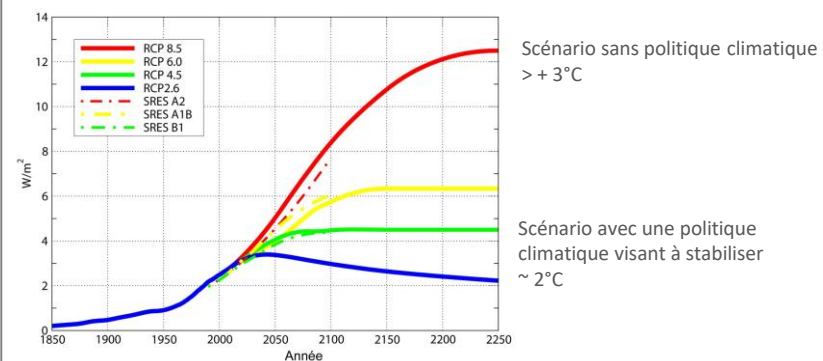


Etat de l'art

- Une bibliographie conséquente de l'impact du changement climatique sur le blé tendre d'hiver, mais qui s'intéresse à l'impact sur la production de grains. (*Aubry M. et al., 2026 ; Le Roux et al., 2024 ; Beauvais et al., 2022 ; Durand A., 2021 ; Brisson N. et Levrault F., 2012 (CLIMATOR) ; Trnka et al., 2015.*)
- Des études qui **ne permettent pas de prédire les rendements** futurs, mais fournissent des trajectoires évolutives des risques climatiques.

Matériel et Méthode

RCP Representative Concentration Pathway :
scénarios d'évolution du forçage radiatif.



Source : *drias-climat.fr*

Données
DRIAS 2020

2 scénarios :
RCP 4.5 et RCP 8.5

3 modèles climatiques :
CNRMCM5 Aladin 63 / CNRMCM5
RINCO 22E / ECEarth RAMCO 22E

4 périodes de 30 ans
Période de référence 1990 /
2030 / 2050 / 2100

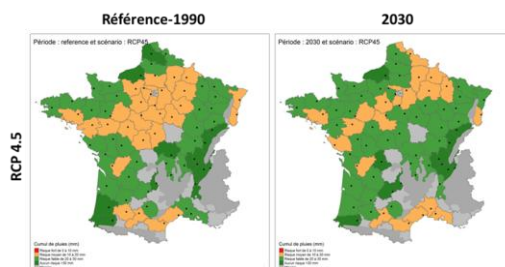
Paramètres agroclimatiques : Somme
de température, Somme de pluies,
température minimale, somme P-ETP

Modélisation CHN :
Stade et biomasse

Bilan hydrique Irrelis :
Niveau remplissage RU

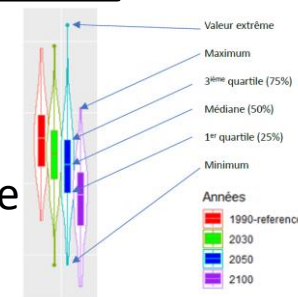
Cartographie :

73 Départements
variabilité spatiale



représentation

Boîte à moustache :
7 sites
variabilité interannuelle



Paramètres agro-climatiques calculés sur les CIVE d'hiver

Raccourcissement des cycles :

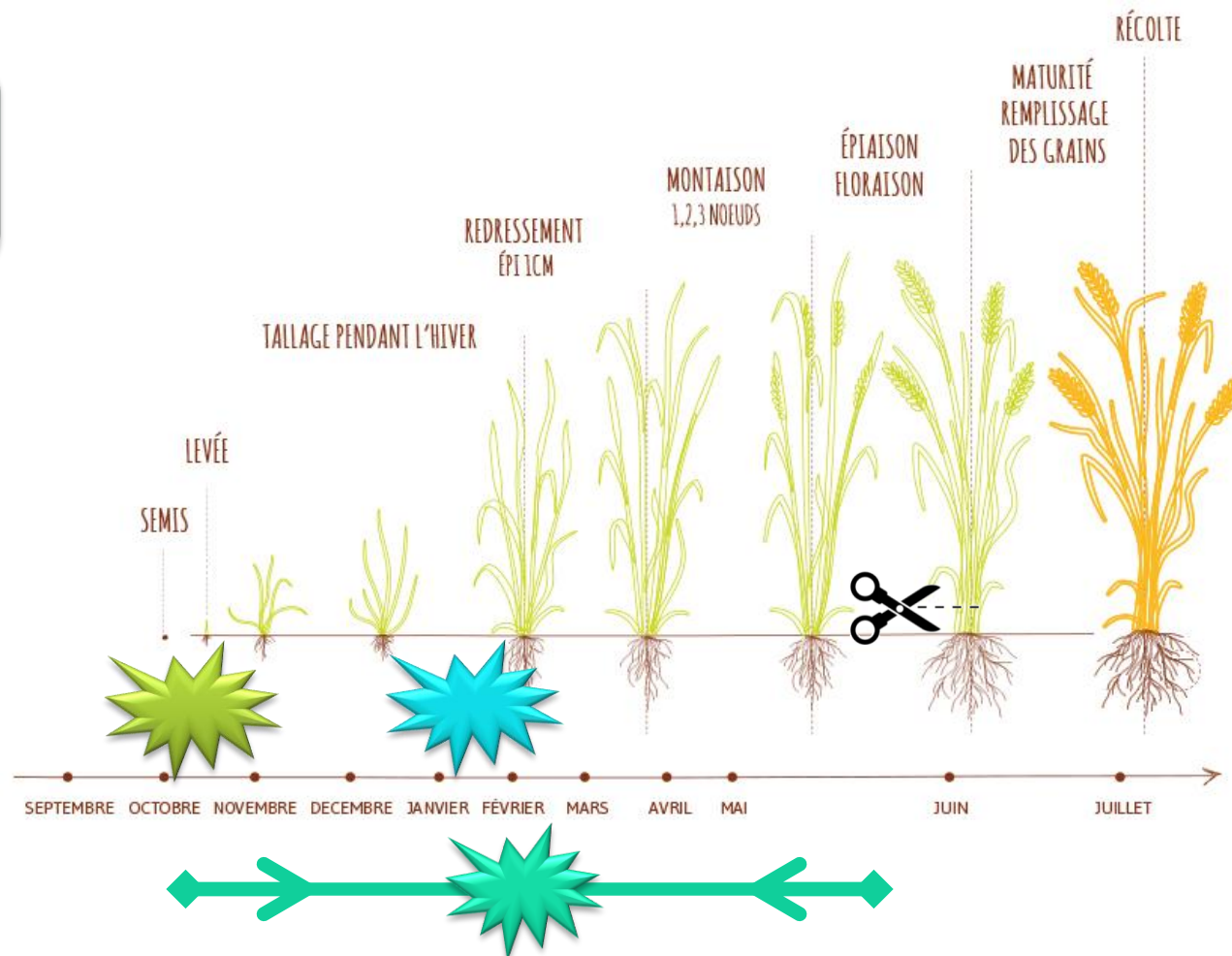
Somme de température semis-récolte (base 0°C-30°C) et modélisation des stades (CHN)

Risque de gel :

Température minimale extrême (01/02 - 31/03)

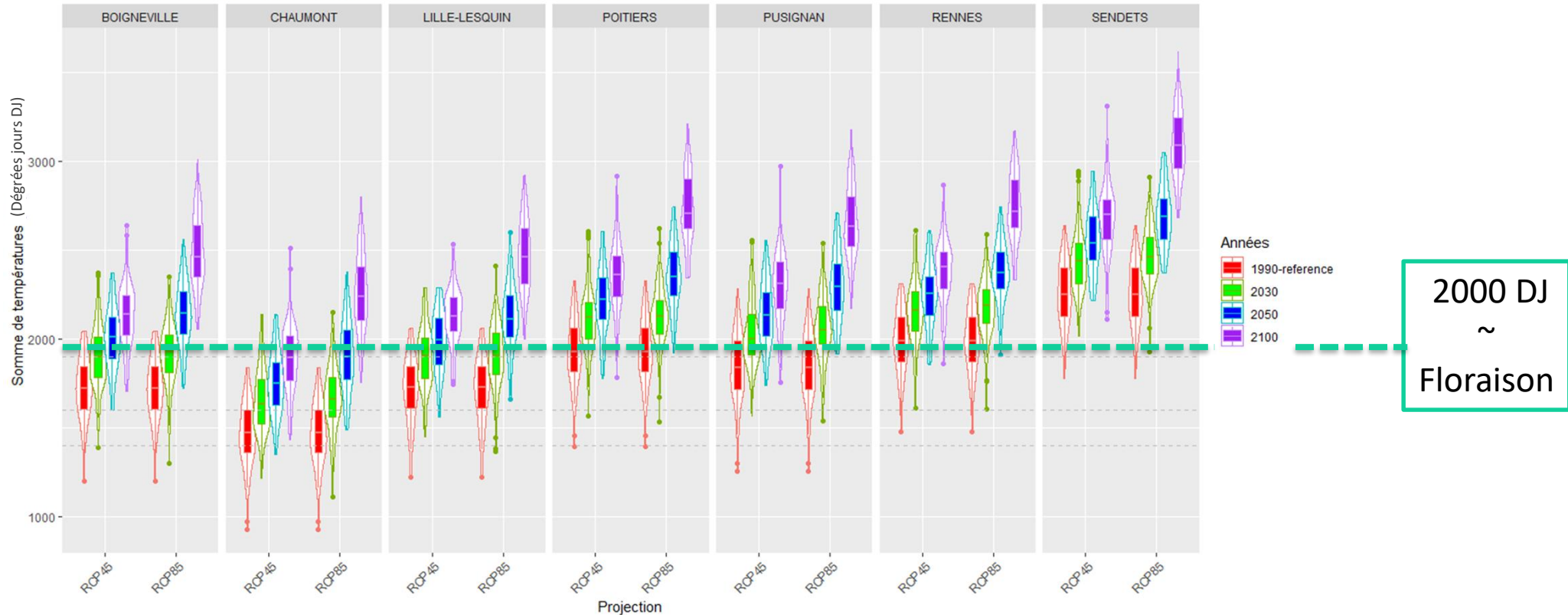
Risque hydrique au semis :

Somme des pluies (14/09-05/10)



Une augmentation des sommes de températures

Somme de température entre le semis 20/09 et la récolte 10/05 (base 0°C) selon les scénarios climatiques RCP45 et RCP85 et 3 modèles climatiques, sur une période de 30 ans autour de 2030, 2050 et 2085, comparé aux scénarios de référence (1976-2005)



- Corrélation somme de température semis-récolte et rendement (Recital ; ACSE, 2023 ; Filabiom)
- En 2050, des gains de 350 à 500 DJ = un potentiel de biomasse plus élevé notamment pour le Nord-Est

Une floraison plus précoce de 7 à 16 jours en 2050

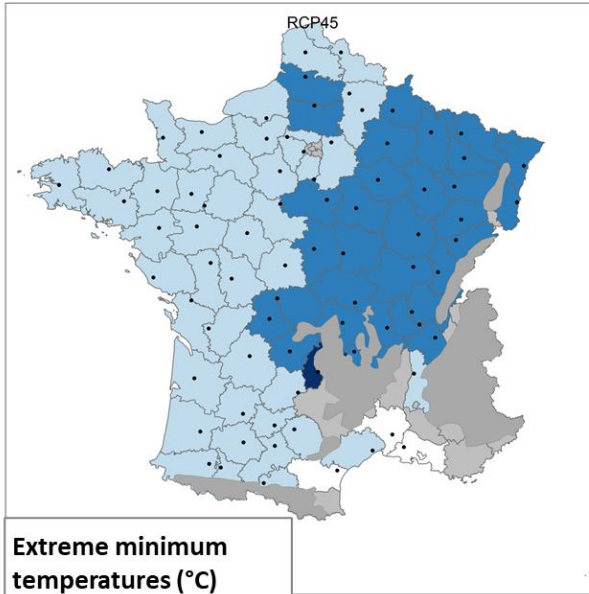
Scénarios RCP	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100
BOIGNEVILLE	-6	-8	-12	-7	-12	-21
CHAUMONT	-5	-7	-13	-7	-13	-21
LILLE-LESQUIN	-8	-11	-14	-9	-16	-25
POITIERS	-7	-9	-16	-7	-13	-24
PUSIGNAN	-6	-11	-15	-7	-16	-25
RENNES	-5	-9	-11	-6	-13	-20
SENDETS	-6	-9	-13	-6	-12	-20



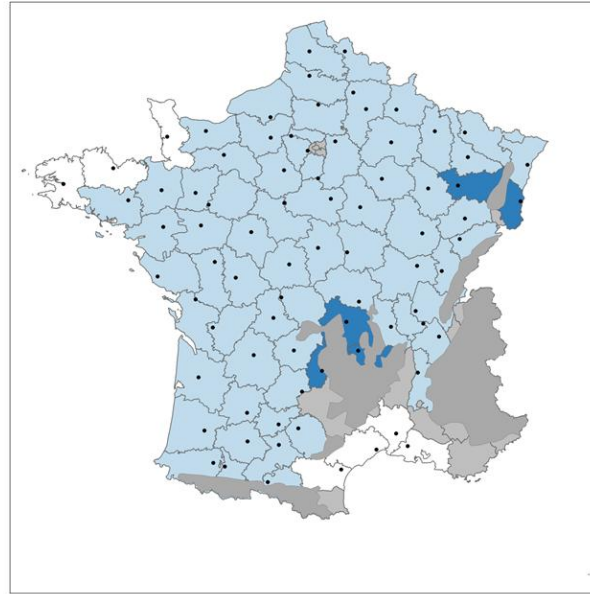
- A date de récolte équivalente, le potentiel de biomasse pourrait être plus élevé grâce à l'avancé des stades...
...mais à stade équivalent, le raccourcissement des cycles pourrait réduire la période d'accumulation de biomasse.
- Une récolte plus précoce, permet de semer plutôt la culture suivante.

Le risque de gel décroît

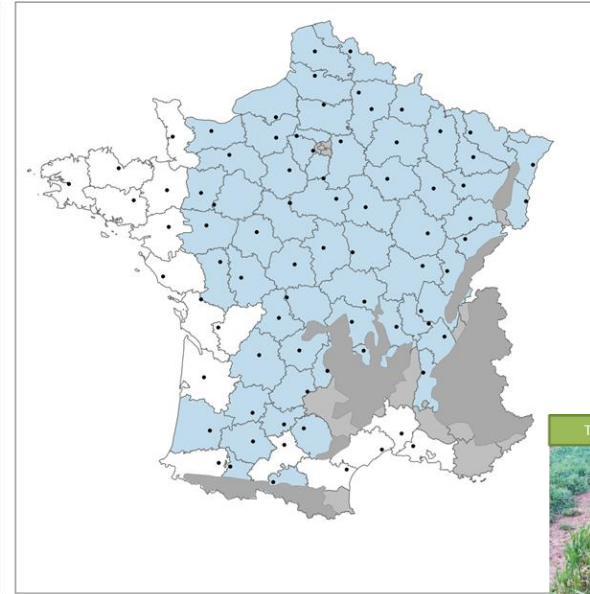
RCP 4.5 - Reference periode



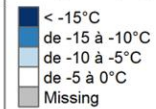
RCP 4.5 - 2050



RCP 4.5 - 2100



Extreme minimum
températures ($^{\circ}\text{C}$)



- Le risque de gel sévère ($< -10^{\circ}\text{C}$) réduit significativement, moins de 2 années sur 10 sur le site le plus froid (Chaumont).
- Mais ne disparaît pas...
...l'avancement des stades pourrait augmenter < la sensibilité.

Incertitude autour des précipitations

- Pas de tendance claire à 2050 sur les périodes étudiées.
- Précipitations au semis : souvent suffisantes > 20 mm, plus 8 ans sur 10
- Quid du risque d'hydromorphie avec l'augmentation des pluies hivernales ?

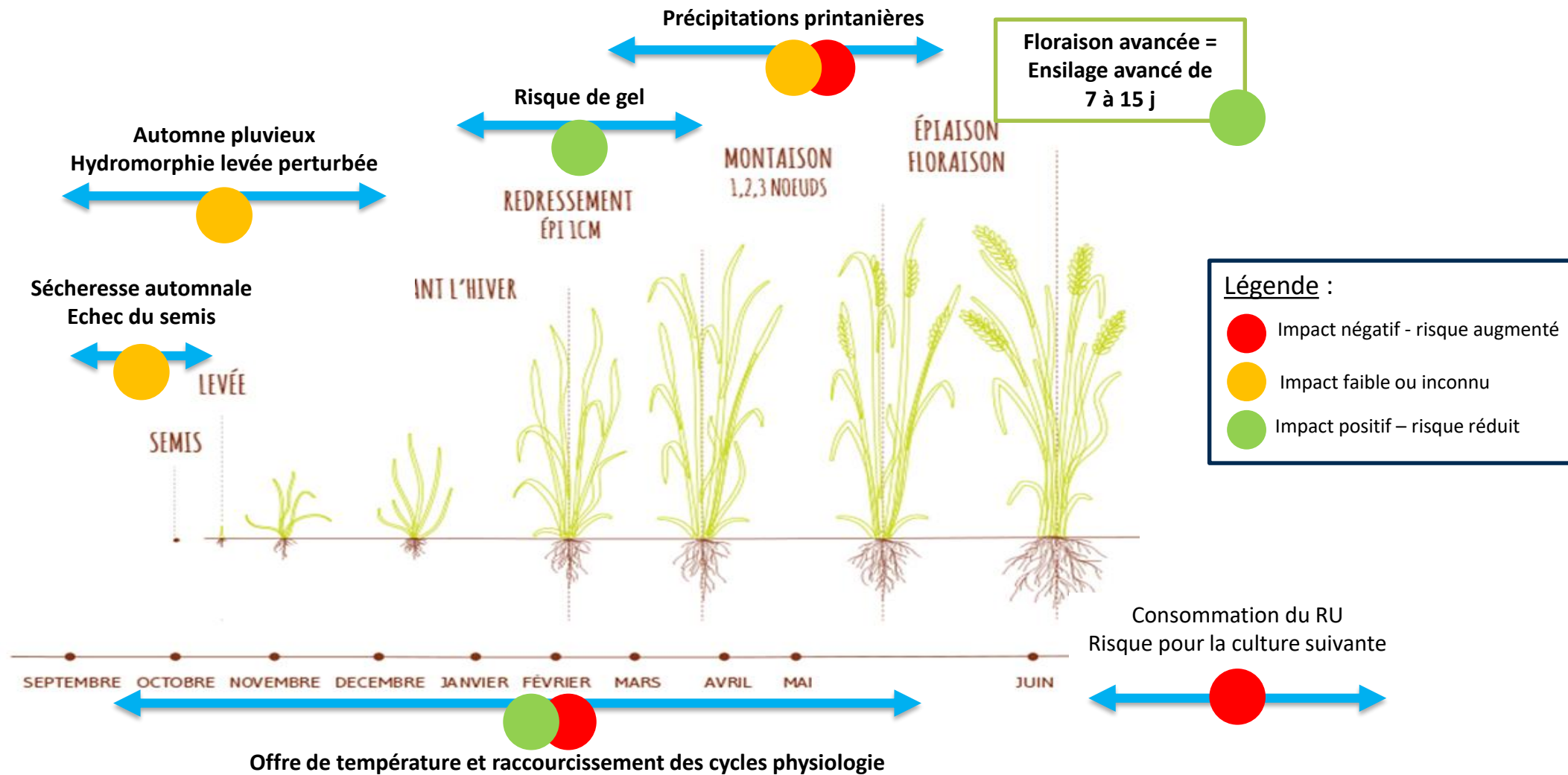


*Seigle, Montardon (64)
25/03/2024*



*Essai CIVE Ploërmel (56)
Janvier 2023*

Synthèse des risques agro-climatiques



Conclusion

Impact modéré



CIVE d'hiver en 2050, un impact modéré
... du changement climatique sur la biomasse,
mais un inconnu : la répartition des pluies.

Effet positif

Des opportunités s'ouvrent avec l'augmentation
des températures et la diminution du risque de
gel...



... notamment dans le Nord-Est ?

Risque élevé



CIVE d'été toujours plus d'incertitudes...
...déjà soumises à un risque d'échec élevé, le
potentiel des CIVE d'été sera encore plus
incertain.

Des interrogations



Culture principale suivant la CIVE d'hiver,
soumise à plus d'aléas ?

... le **compromis** entre rendement de la CIVE
d'hiver et impact sur la culture suivante sera
d'autant plus important demain.

Cultures intermédiaires à Vocation Energétique : des ressources potentielles en biomasse à la hauteur des objectifs ?

- Sylvain Marsac, Nicolas Dagron, Laurene Casal, Muriel Dallagnese – ARVALIS
- Charlotte Richard, Solenne Tesseron – ENGIE Lab – Crigen
- Melanie Salomez, Cecilia Sambusiti – TotalEnergies OneTech R&D

Plan

- CIVE : définition, besoins ...
- Comment évaluer le potentiel : méthode
- Potentiel théorique biomasse de CIVE
 - Potentiel moyen
 - Comment augmenter ce potentiel ?
- Perspectives



Besoins, Offre en CIVE ?

- Des études récentes sur le potentiel
 - Launay, 2023
 - Porhel, 2024
- Des différences méthodologiques et limites
 - Totalité de la SAU non prise en compte
 - Des critères d'insertion des CIVE différentes (hiver – été, cultures précédentes, suivantes...)
 - Des potentiels de rendement différents : modélisés, expertise ...
 - Une profondeur d'étude différente : ancienne 2007-2012 ou courte 2020-2021
- Des besoins de plus de 37 TWh selon les scénarios...
- Les éléments intégrés dans notre étude
 - 100% SAU
 - Profondeur historique récente (2015-2021)
 - Prise en compte des cultures dérobées fourragères

Comment évaluer les ressources en CIVE - Méthodologie

Surface

X

Rendement

Pas de déclaration, pas de base de données
Registre Parcellaire Graphique Land –
 déclarations PAC

-Outil **RPG explorer** (Girault et Martin 2024)

Connaissance annuelle de la plus petite
 parcelle

Quels critères d'insertion de CIVE ?

Pas de statistique publique ou
 enquête représentative
 Modèles avec limites
 Programmes R&D récents

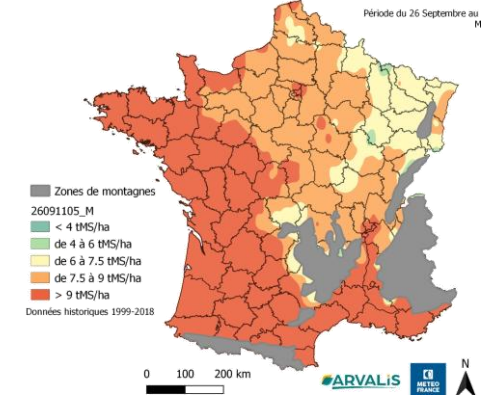
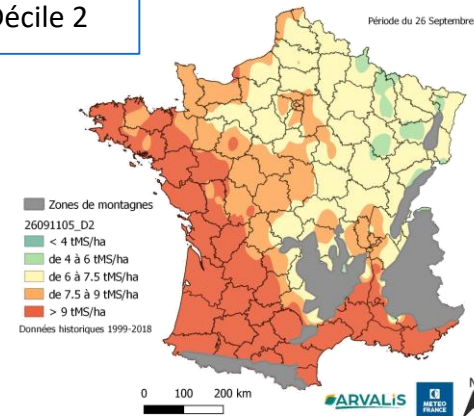


Years of production	Acreage (ha)	Previous primary crop code	Following primary crop code	Field identification	NUTS 3 name	ep_no_Nuts 3 code
2017-2018	0.19	FET	FET	1	ain	1
2020-2021	0.52	VRC	VRN	4	ain	1
2019-2020	0.99	PRL	SGH	1	ain	1
2020-2021	0.35	BOR	CZH	3	ain	1
2019-2020	0.77	TTH	CMB	2	ain	1
2016-2017	0.36	J6S	ML7	2	ain	1
2016-2017	0.08	PPH	BTP	1	ain	1

Rendement moyen récoltable
 pour un semis au 26/09 récolte au 11/05

Décile 2

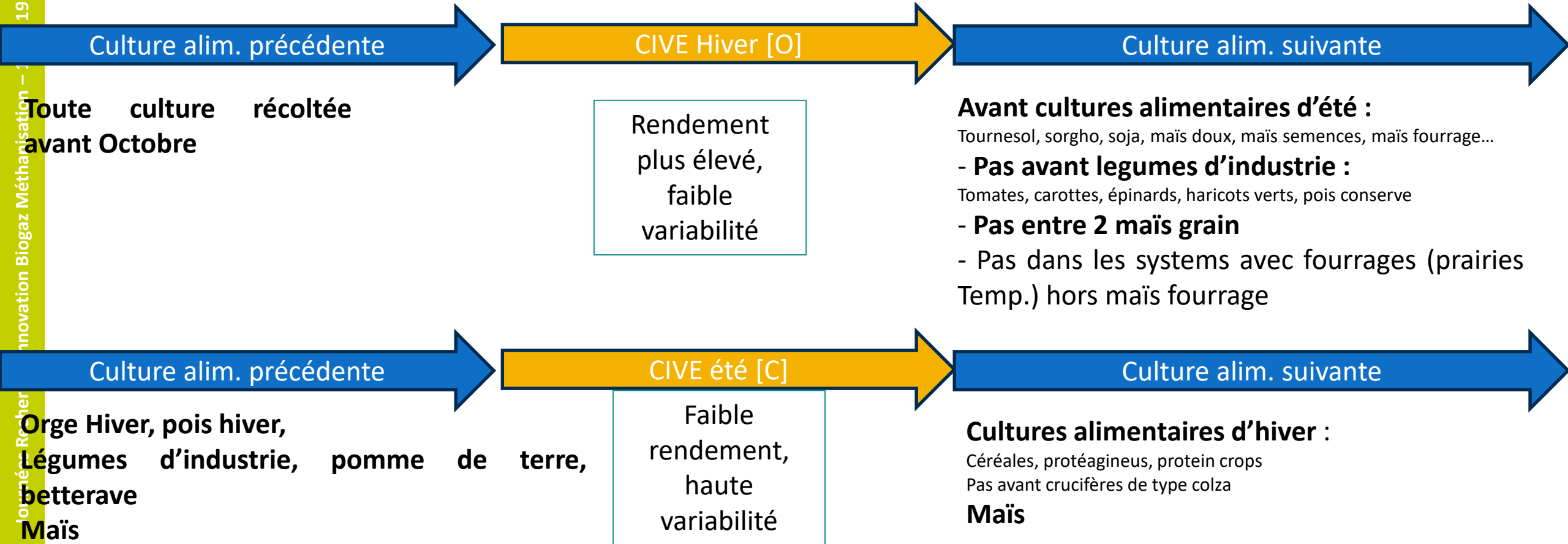
Médiane



Comment évaluer les ressources en CIVE ? Méthodologie

Scénario de référence

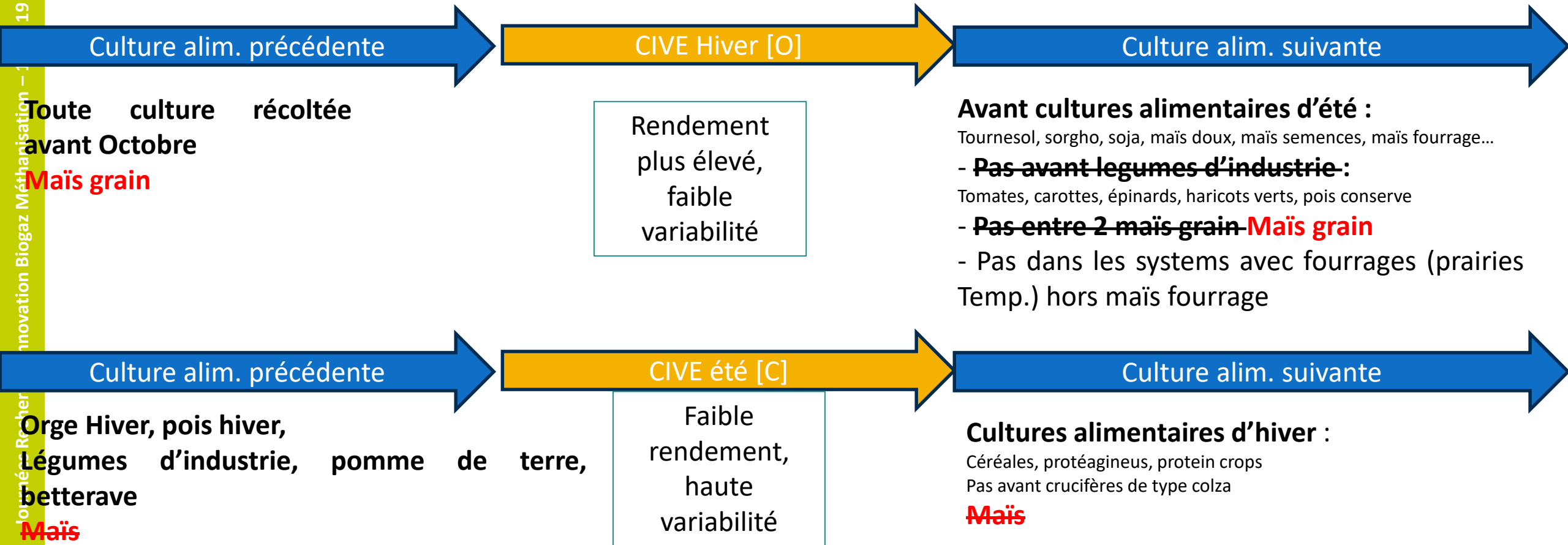
19 mars 2026
Innovation Biogaz Méthanisation – JRI Journées Recherches



Comment évaluer les ressources en CIVE ? Méthodologie

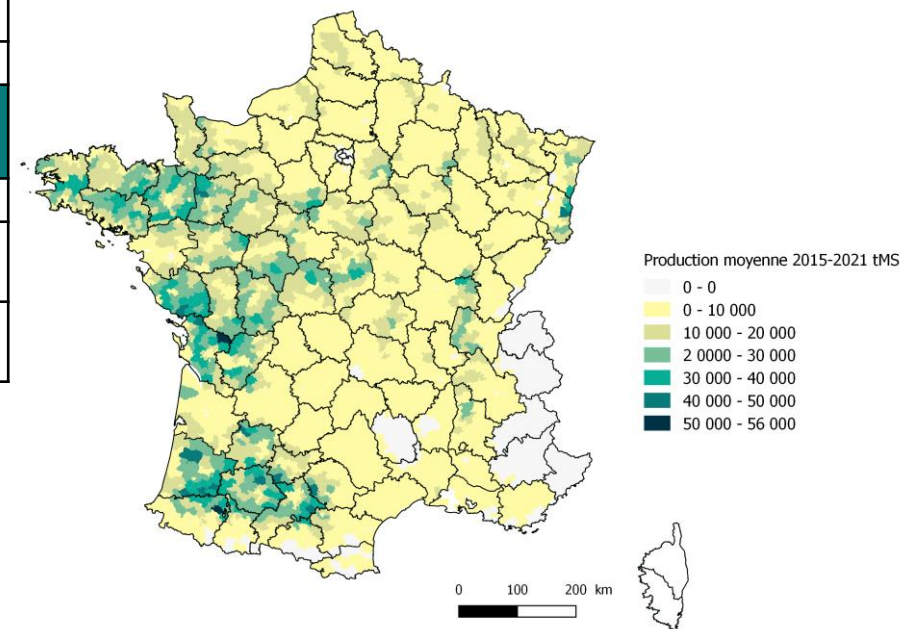
Scénarios alternatifs

19 mars 2026
Innovation Biogaz Méthanisation - JRI Journées Recher



Résultats – Potentiel moyen de CIVE – Scénario de Base

Surface (ha)	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2021	Moyenne
CIVE Eté - C	1 231 386	1 268 248	1 141 800	1 166 538	1 254 522	1 235 967	1 216 410
CIVE Hiver - O	2 438 442	2 582 275	2 561 387	2 707 694	3 062 362	2 631 885	2 664 007
Total	3 669 828	3 850 524	3 703 187	3 874 232	4 316 883	3 867 852	3 880 418
Production (t DM)	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2021	Average
CIVE Eté - C	5 327 961	5 441 927	4 910 515	5 001 481	5 399 099	5 304 724	5 230 951
CIVE Hiver - O	17 081 878	18 050 875	17 921 107	18 894 650	21 399 162	18 281 445	18 604 853
Total	22 409 838	23 492 802	22 831 622	23 896 131	26 798 261	23 586 168	23 835 804



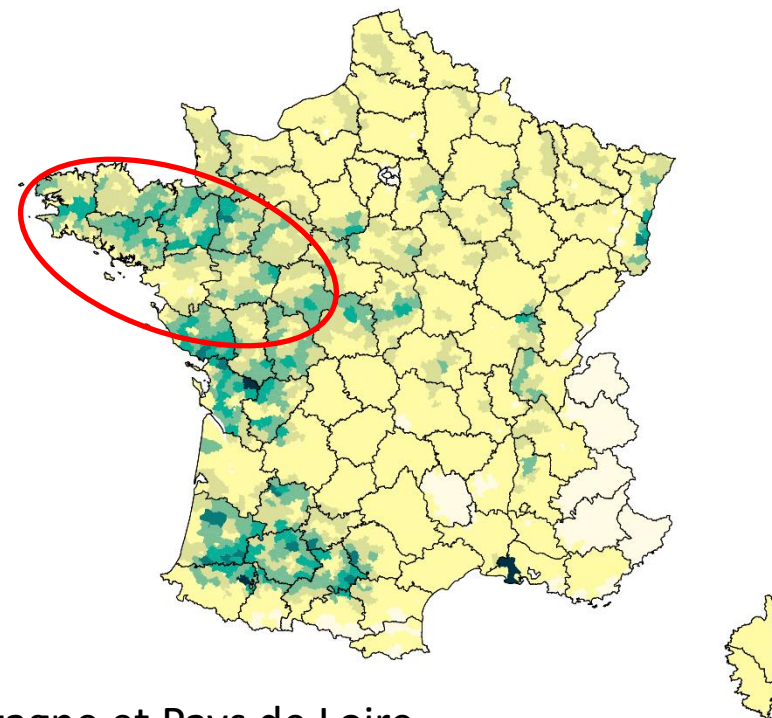
23.8 Mt MS de potentiel pour 3.88 Mha
Faible variation interannuelle
Plus forte disponibilité en CIVE Hiver
La surface, les critères d'insertion sont le principal facteur de disponibilité

Prise en compte des dérobées pourragères ?

Ouest = zone d'élevage avec production de double culture fourragère (rays-grass maïs) → Pas d'enregistrement de ces surfaces

→ Identification de plusieurs enquêtes régionales (Agreste...) + expertise locale
Agreste 2017, 2019, Agrinova 2020

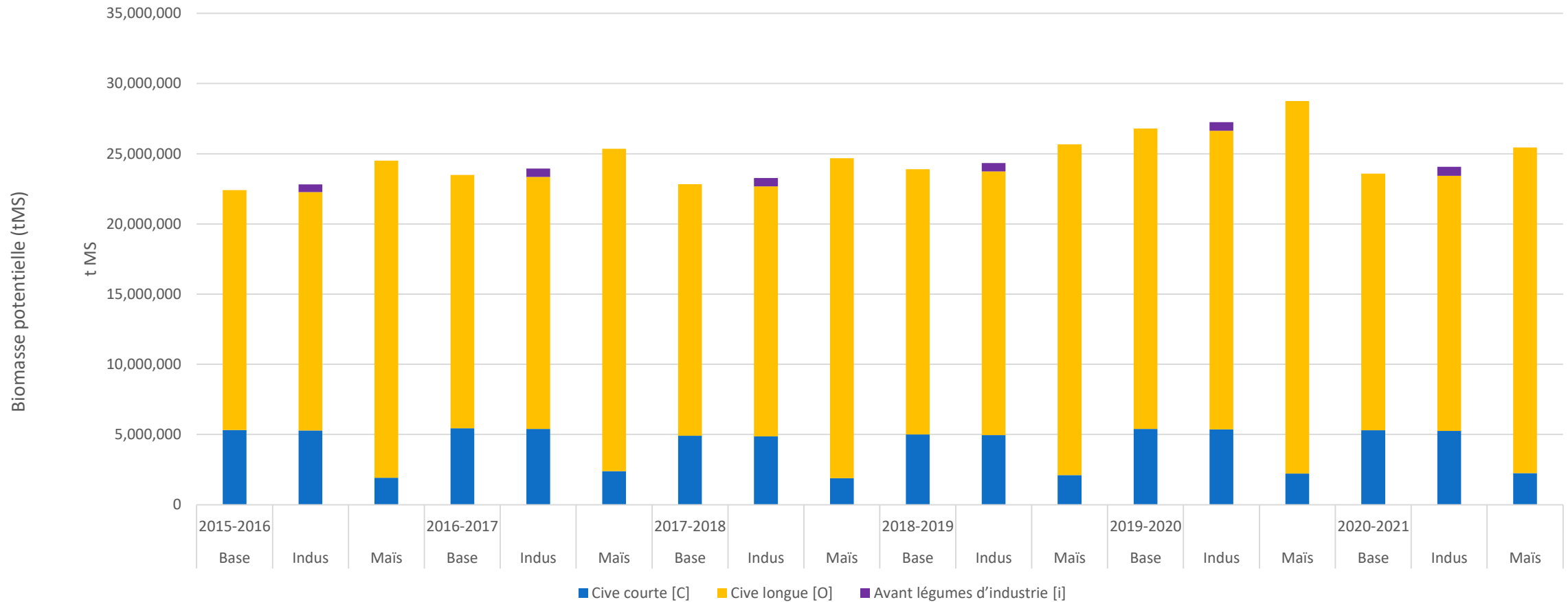
Département	Parts(%) de maïs fourrage dans des sequences de double culture avec une interculture d'hiver
22	0,40
29	0,40
35	0,60
44	0,40
49	0,06
53	0,29
56	0,40
72	0,27
85	0,26



-1.074 Mt MS En Bretagne et Pays de Loire
3.597 Mt MS CIVE disponible Vs 4.671 Mt MS en scénario de référence

Impact des critères d'insertion de CIVE

Biomasse potentielle de CIVE selon différents scénarios d'insertion



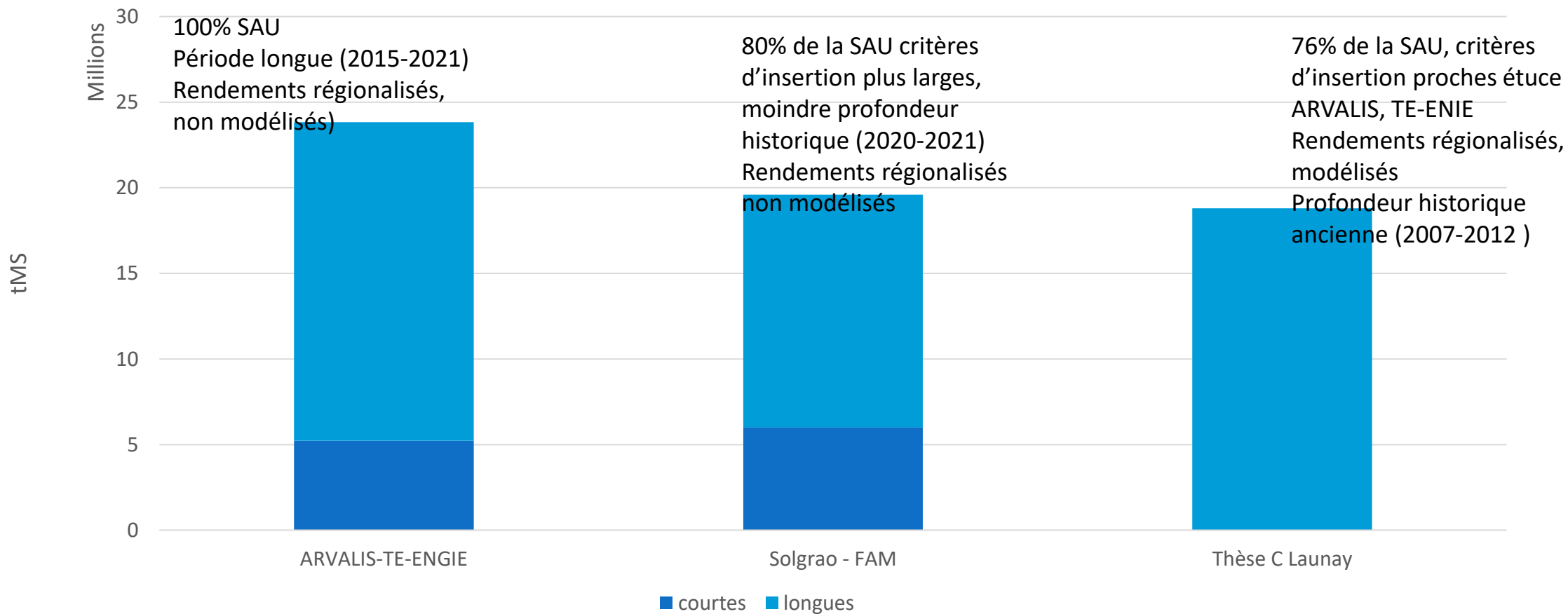
Faisabilité de produire une CIVE d'hiver entre 2 maïs grain = une voie d'augmenter la disponibilité théorique

Essais ont démontré cette faisabilité qui doit être étudiée sur l'ensemble du territoire

Faible impact des systèmes avec légumes d'industrie sur cette disponibilité

Analyse comparative des études de potentiel CIVE

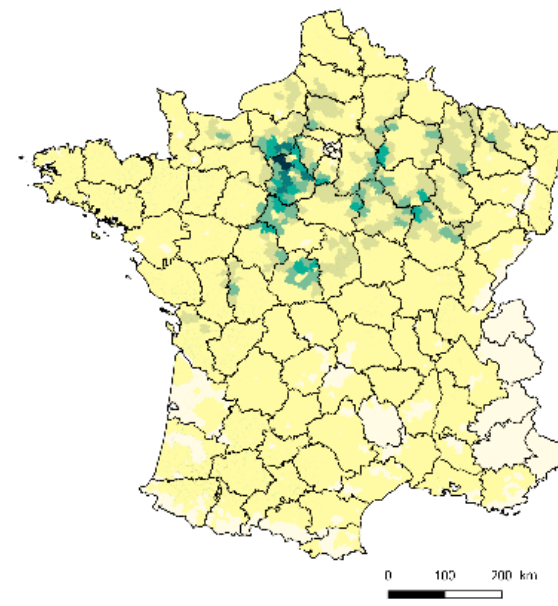
Potentiel théorique en CIVE de quelques scénarios d'études de ressources en CIVE



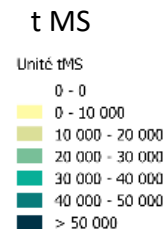
Comment augmenter ce potentiel : opportunité de changement d'assolement?

- Identification via le RPG des parcelles avec séquences à dominante cultures d'hiver sur 5 years (2017-2021)
- Substitution d'une à 2 cultures par des cultures alimentaires d'été → critère d'introduction
 - 5 cultures d'hiver ou de printemps : 1 or 2 substitutions
 - 4 cultures d'hiver ou de printemps : 1 or 2 substitutions
 - Pas de substitution si la séquence ne permet pas d'accueillir de CIVE

	Production (t MS)	%
Moyenne scénario référence 2017-2021	24 120 977	-
1 substitution	+ 4 517 741	+ 19
2 substitutions	+ 9 004 722	+ 37



Additional ECC biomass potential for 2 crops substitutions in winter crop rotations (2017-2021) compared to the reference scenario



Discussion, conclusion

Discussion

- Besoin d'améliorer les connaissances sur les rendements et la modélisation des CIVE
- Besoin d'une meilleure connaissance des doubles cultures déjà mobilisées (élevage, méthanisation...)
- Quelle connaissance de la propension à produire des doubles cultures ?

Conclusion

- 23 Mt DMS potentiellement disponible
 - Un potentiel théorique maximal
 - Potentiel certainement contraint en raison des contraintes hydriques dans certains bassins
- Pour des besoins de 20 MtMS d'après les scénarios!
- Offre potentielle = demande potentielle : enjeu fort de l'accompagnement des agriculteurs
 - Offre variétale
 - Formations
 - Recommandations locales...

Performances agro-environnementales de la méthanisation sans élevage à base de CIVE : modélisation basée sur des cas réels selon divers scénarios climatiques

Léa Boros^{1,2}, Marco Carozzi², Philippe Martin², **Florent Levavasseur¹**

1 - Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 91120 Palaiseau, France

2 - Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SADAPT, 91120 Palaiseau, France

Contexte et objectif

- > **Développement rapide de la méthanisation à base de cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) en France** ces dernières années
 - Cultivées entre **deux cultures principales**
 - Supposées avoir un impact limité sur la **production alimentaire**
 - Promues car elles peuvent permettre : ↘ **lixiviation azotée, stockage carbone dans les sols** et ↘ **émissions GES** (substitution fertilisant de synthèse par digestat)



> **Toutefois, les CIVE peuvent être associées à :**

Des pratiques intensives (produits phytosanitaires, fertilisation minérale, irrigation) permettant d'atteindre des **rendements en biomasse élevés** (moy : 10tMS/ha sur CIVE hiver)
(Boros et al. 2025a)

Des pertes de rendements sur la culture suivant CIVE d'hiver (Boros et al., 2025a)

Des changements d'assolement
(Boros et al. 2025b)

Contexte et objectif

> Quels apports des évaluations environnementales de la méthanisation à base de CIVE ?

(Bounhoure et al., 2023 ; Esnouf et al., 2021 ; Nilsson et al., 2024 ; Rydgård et al., 2025 ; Valli et al., 2017 ; Vargas-Gonzalez et al., 2015)

- ➔ **Réduction des émissions GES** dans toutes les études existantes
- ➔ Résultats hétérogènes pour les autres indicateurs environnementaux (stockage C, lixiviation, etc...)

Limites des méthodes de ces études (ACV ou bilan GES seul)

Détermination des systèmes à partir de données théoriques, avec des pratiques sur CIVE peu intensives

Pas de prise en compte des usages évités des intrants agro-industriels méthanisés

Pas de prise en compte des changements d'assolement liés aux CIVE

Pas de prise en compte des pertes de rendement post-CIVE

Pas de prise en compte des effets potentiels du changement climatique

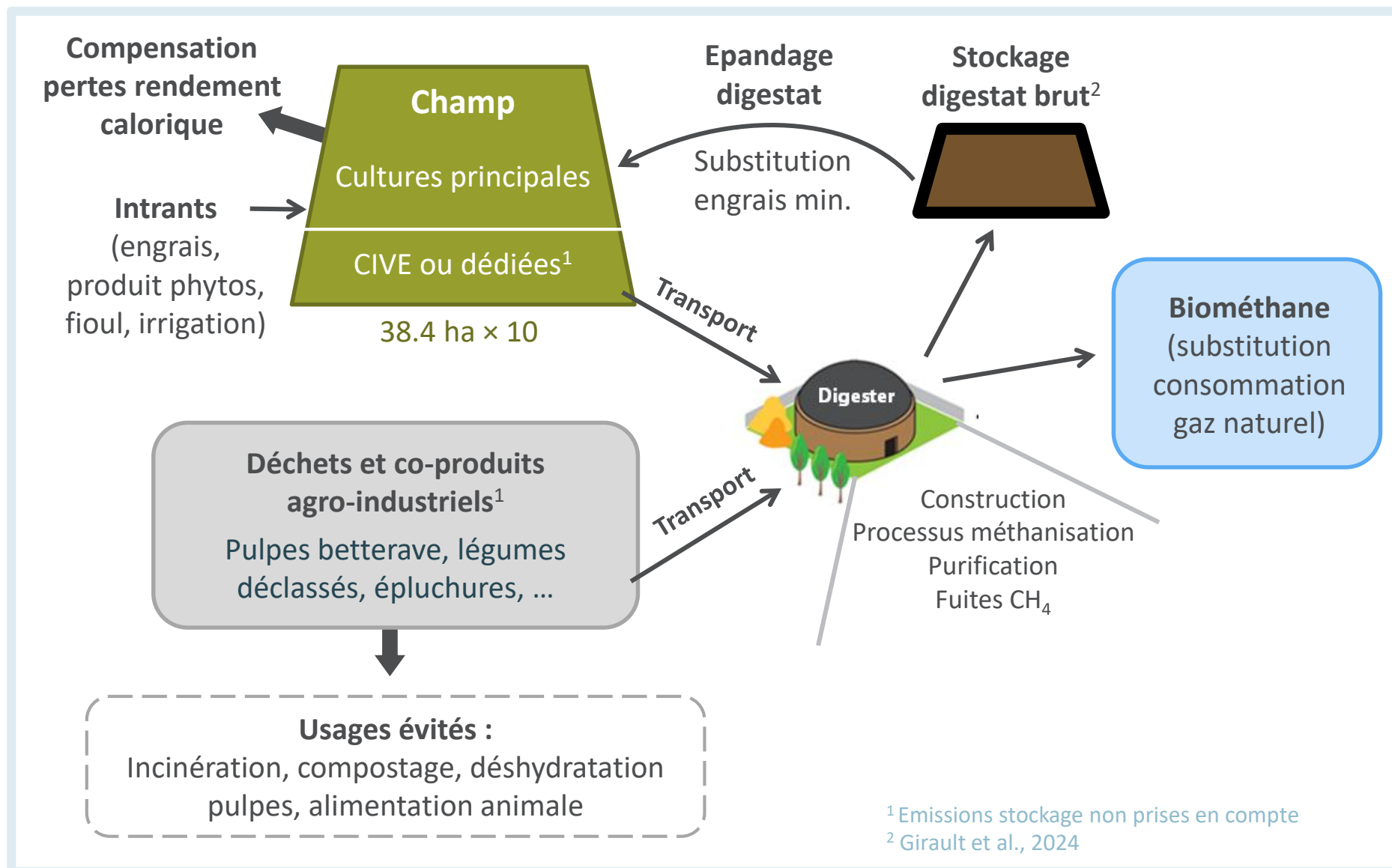


Nécessité de réévaluer la méthanisation à base de CIVE en conditions réelles de déploiement sous divers scénarios climatiques

Méthodes

> Système simulé

- Caractéristiques du système issues de données d'enquêtes en zones grandes cultures en France + analyses de bases de données (Boros et al., 2025a, 2025b)
- 3 fermes identiques de 384 ha fournissent le méthaniseur

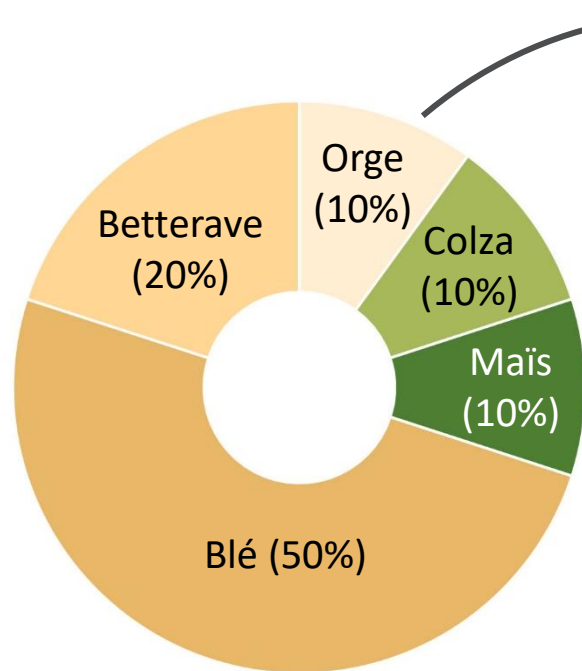


¹ Emissions stockage non prises en compte

² Girault et al., 2024

Méthodes

> 5 scénarios avec méthanisation, représentatifs de ceux observés en enquêtes (Boros et al. 2025a), ont été comparés à un scénario sans méthanisation



Assolement scénario sans méthanisation

Scénario avec méthanisation

→ CIVE sur 30% de la SAU :

- 20% CIVE hiver
- 10% CIVE été

→ - colza et + maïs grain

→ 52% des apports au méthaniseur sous forme de CIVE

Gestion des CIVE :

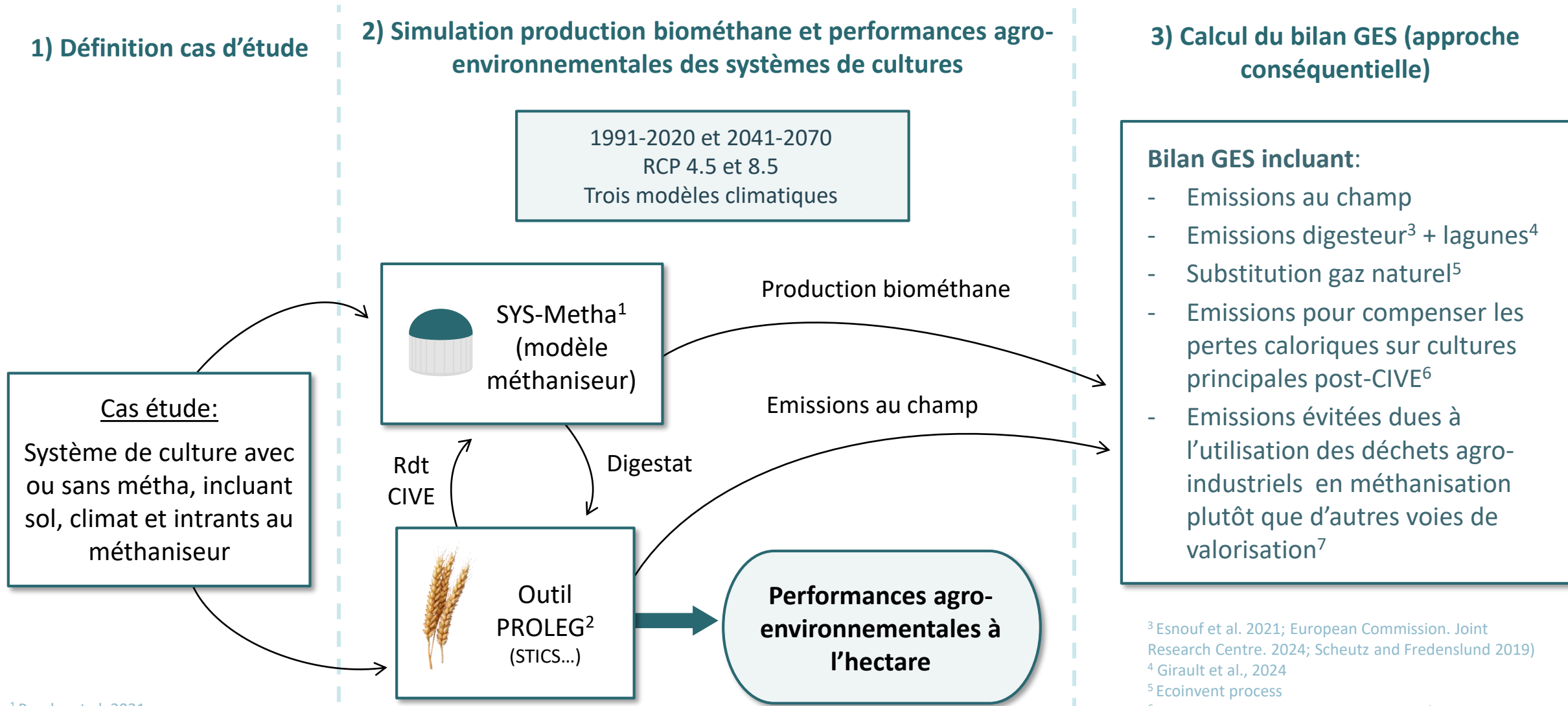
- Produits phytosanitaires
- Fertilisation synthèse + digestat
- Objectifs de rendement :
9.5 tMS ha⁻¹ CIVE d'hiver
6 tMS ha⁻¹ CIVE d'été

4 autres scénarios avec métha :

- 30% CIVE, hiver seulement
- 40% CIVE, été seulement, irriguées
- 10% CIVE, hiver seulement et plus de déchets agro-industriels
- 30% CIVE (20% hiver et 10% été) + 10% cultures dédiées

Méthodes

> Vue d'ensemble des étapes de simulation des systèmes de culture



¹ Bareha et al. 2021

² Levasseur et al. 2023

³ Esnouf et al. 2021; European Commission. Joint Research Centre. 2024; Scheutz and Fredenslund 2019)

⁴ Girault et al., 2024

⁵ Ecoinvent process

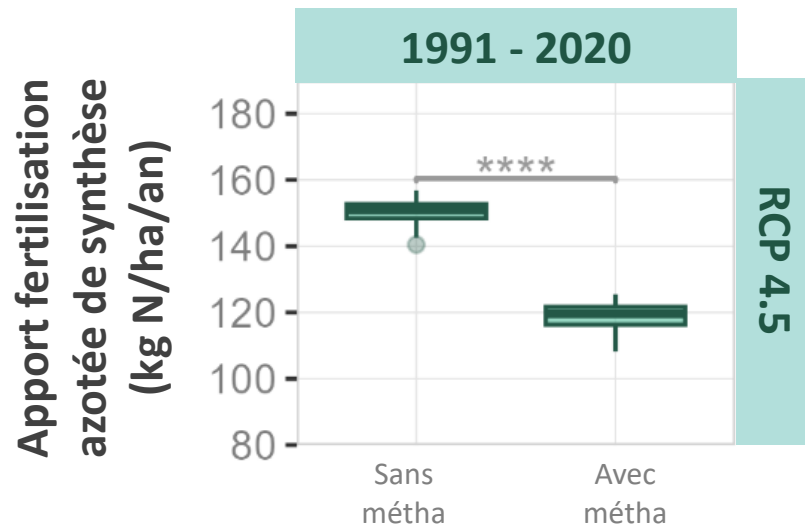
⁶ INRAE-CIRAD-AFZ, 2024 ; Javourez et al. 2022

⁷ Ecoinvent or Agribalyse process

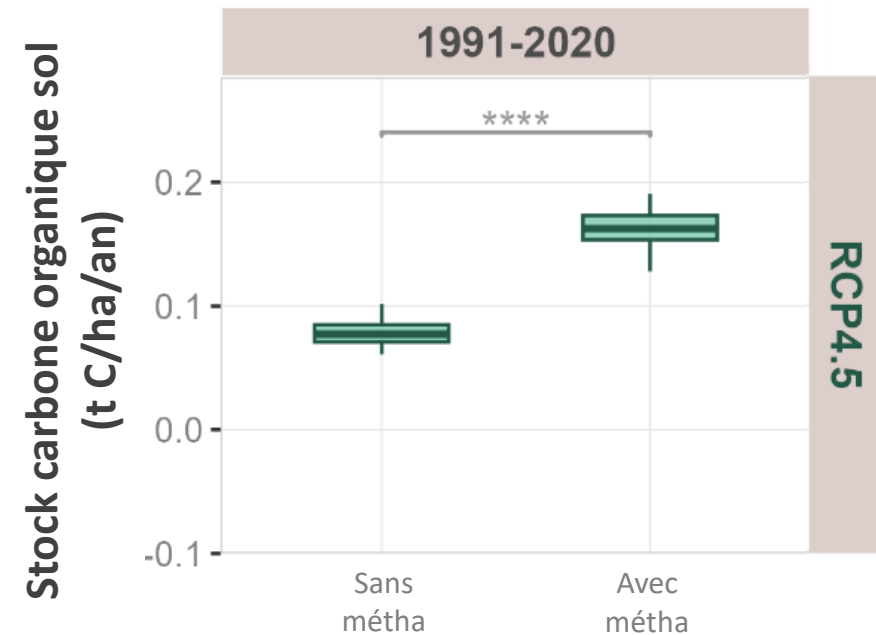
Résultats

> Intégrer des CIVE dans les rotations a mis en évidence divers bénéfices :

- ➔ Légère diminution de l'IFT* (5.75 vs. 5.39 pour le scenario "Avec métha moyen" et jusqu'à 4.75 pour "CIVE hiver")
- ➔ Réduction utilisation de fertilisation azotée de synthèse



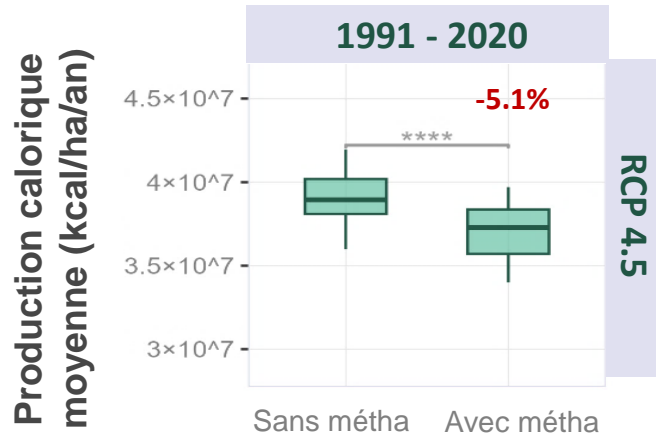
➔ Augmentation stock de carbone organique des sols



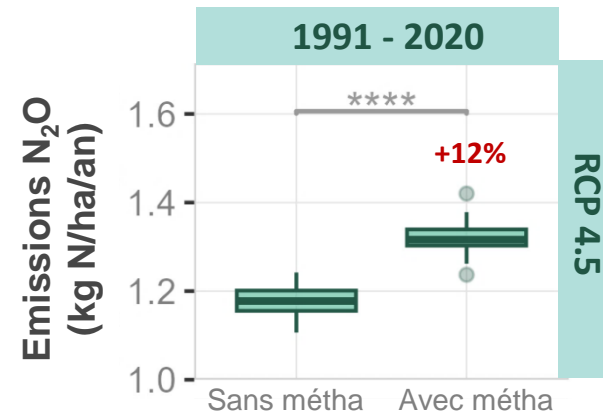
Résultats

> Mais également des impacts agronomiques et environnementaux négatifs au champ

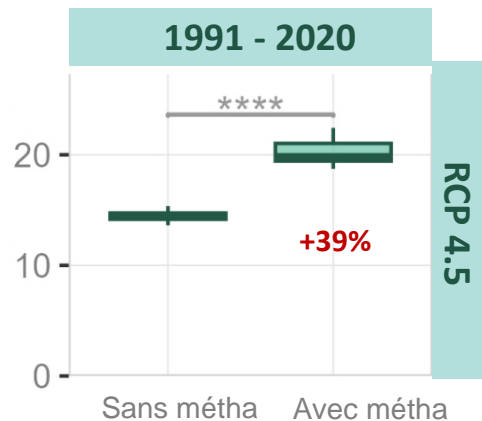
➔ Réduction de la production calorifique



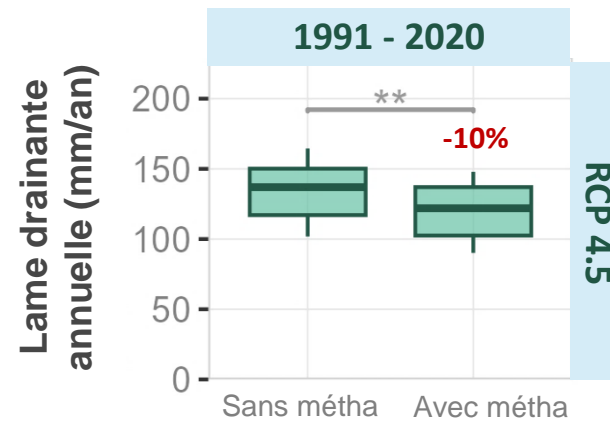
➔ Augmentation des émissions de N₂O au champ



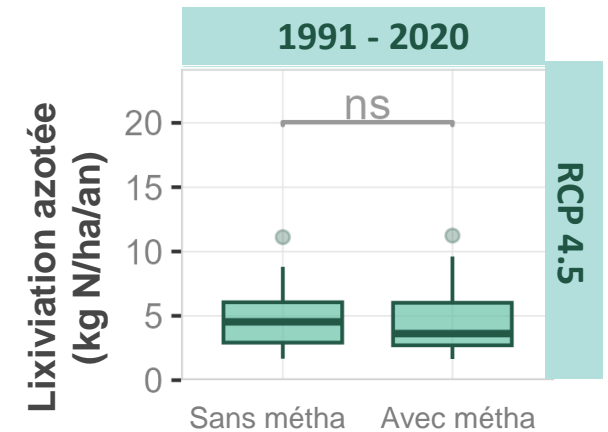
➔ Augmentation de la volatilisation ammoniacale au champ



➔ Réduction de la lame drainante

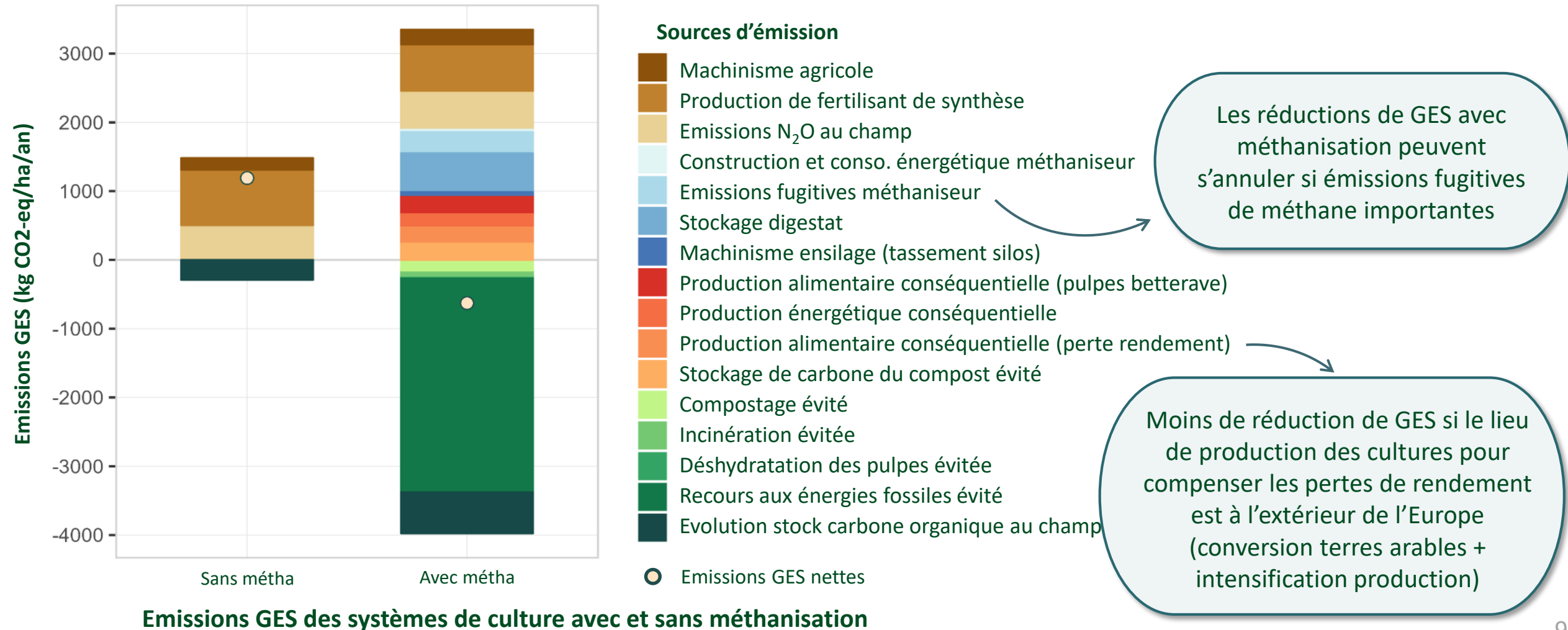


➔ Lixiviation azotée stable



Résultats

> Emissions GES plus faibles avec méthanisation grâce à la substitution du gaz naturel et aux émissions au champ réduites, et ce malgré les émissions du méthaniseur et celles des usages évités



Résultats

> Comment est-ce que les performances agro-environnementales avec méthanisation évoluent en climat futur ?

Période 2041-2070 pour les RCP 4.5 et 8.5

- Réduction des émissions GES moins importante car :
 - Moins de stockage de carbone avec changement climatique
 - Emissions N₂O plus importantes
- Productions calorique et protéique diminuées
- Augmentation de la lixiviation azotée
- Emissions NH₃ restent stables
- Augmentation de la production de CIVE
- Augmentation de la lame drainante. Probablement due à des modèles climatiques trop humides

Nécessité de simulation avec des modèles climatiques plus secs afin de consolider les résultats

> Un bilan contrasté de la méthanisation sans élevage à base de CIVE

Impacts positifs

Systèmes intensifs



Rendement CIVE élevés



Forte production
biométhane



Diminution
émissions GES

**Participation à la transition
énergétique**

Impacts négatifs

- 1) Impacts environnementaux
(émissions azotées vers l'eau,
pression ressource en eau)
- 2) CIVE = changements
assolement + pertes rendement
cultures principales



Compétition possible avec
production alimentaire

**Pressions environnementales et légère
perte d'autonomie alimentaire**

→ **Aucun scénario avec
méthanisation optimal**

→ **Compromis à trouver entre
autonomie énergétique,
autonomie alimentaire,
réduction des émissions GES,
impacts sur l'environnement
et revenus des agriculteurs**

Bibliographie

- Bareha, Y., R. Affes, V. Moinard, J. Buffet, et R. Girault. 2021. « A Simple Mass Balance Tool to Predict Carbon and Nitrogen Fluxes in Anaerobic Digestion Systems ». *Waste Management* 135 (novembre): 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.020>.
- Boros, Léa, Marco Carozzi, Sophie Carton, Sabine Houot, Philippe Martin, et Florent Levavasseur. 2025a. « Changes in Cropping Systems Associated with Biogas Plants in French Cereal-Growing Areas ». *Agricultural Systems* 228 (août): 104387. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104387>.
- Boros, Léa, Lucie Martin, Marco Carozzi, Sabine Houot, Philippe Martin, et Florent Levavasseur. 2025b. « Land Cover Changes Following Biogas Development Across Different Farm Types: A Nationwide Study in France ». *GCB Bioenergy* 17 (10): e70073. <https://doi.org/10.1111/gcbb.70073>.
- Bounhoure, Léa, Maylis Chartier Kastler, Valentin Merai, et al. 2023. *Evaluation multi-indicateurs des impacts environnementaux de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel à travers une combustion en chaudière pour la production de chaleur*.
- Esnouf, Antoine, Doris Brockmann, et Romain Cresson. 2021. *Analyse du Cycle de Vie du biométhane issu de ressources agricoles - Rapport d'ACV*. INRAE Transfert.
- European Commission. Joint Research Centre. 2024. *Methane Emissions in the Biogas and Biomethane Supply Chains in the EU: An Analysis to Update the Greenhouse Gas Emissions Accounting Methodology of Renewable Energy Directive Annex VI*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/7927411>.
- Girault, R., N. Auvinet, F. Guizou, G. Nunes, M. Sarazin, et M. Viera Firmino Sylva. 2024. « Evaluation des émissions gazeuses au stockage des digestats issus d'unités de méthanisation agricoles sans effluents d'élevage ». JRI, Pau, mars. https://atee.fr/system/files/2024-04/9%20-JRI_girault%20MARS%202024_%20evaluation%20C3%A9missions_0.pdf.
- INRAE-CIRAD-AFZ. 2024. *Composition and nutritive values of feeds for cattle, sheep, goats, pigs, poultry, rabbits, horses and salmonids*. feedtables.com.
- Javourez, U., E. A. Rosero Delgado, et L. Hamelin. 2022. « Upgrading Agrifood Co-Products via Solid Fermentation Yields Environmental Benefits under Specific Conditions Only ». *Nature Food* 3 (11): 911-20. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00621-9>.
- Levavasseur, Florent, et Sabine Houot. 2023. « Predicting the Short- and Long-term Effects of Recycling Organic Wastes in Cropping Systems with the PROLEG Tool ». *Soil Use and Management* 39 (1): 535-56. <https://doi.org/10.1111/sum.12856>.
- Nilsson, Johan, Maria Ernfors, Thomas Prade, et Per-Anders Hansson. 2024. « Cover Crop Cultivation Strategies in a Scandinavian Context for Climate Change Mitigation and Biogas Production – Insights from a Life Cycle Perspective ». *Science of The Total Environment* 918 (mars): 170629. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170629>.
- Rydgård, Maja, Lars Stoumann Jensen, Magdalena Vinkler Schwartzkopff, Susanna Pinna, Peter Sørensen, et Sander Bruun. 2025. « A Life Cycle Assessment of Cover Crop Ensiling and Co-Digestion with Cattle Manure ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 130 (2): 213-32. <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10386-1>.
- Scheutz, Charlotte, et Anders M. Fredenslund. 2019. « Total Methane Emission Rates and Losses from 23 Biogas Plants ». *Waste Management* 97 (septembre): 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.029>.
- Valli, Laura, Lorella Rossi, Claudio Fabbri, et al. 2017. « Greenhouse Gas Emissions of Electricity and Biomethane Produced Using the Biogasdoneright™ System: Four Case Studies from Italy ». *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 11 (5): 847-60. <https://doi.org/10.1002/bbb.1789>.
- Vargas-Gonzalez, Marcial, Benoit Verzat, Eliéta Carlu, et Fabiola Graveaud. 2015. *Evaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans les réseaux de gaz naturel - Rapport Final*.

AGRONOMIE ET ENVIRONNEMENT

ÉVALUATION DES IMPACTS ET POTENTIEL AGRONOMIQUE

Animateur
Sylvain Marsac

1 Romain Girault, OPALE INRAE

Evaluation de l'impact des différentes stratégies de gestion des digestats sur les émissions d'ammoniac et de méthane au stockage et à l'épandage - cas particulier des unités de méthanisation sans effluents d'élevage

2 Nrina Ratsimba, AGR INRAE

*LEGUMETHA : quel potentiel de valorisation des légumineuses via la méthanisation ?
Evaluation multi-critères à l'aide de la plateforme MAELIA*

3 Dorian Issaly, Metys INRAE Transfert

Analyse environnementale relative à la valorisation du CO₂ issu d'installations de méthanisation

4 Sophie Carton, Agroparistech

Optimisation de systèmes de culture biomasse pour une méthanisation durable : premiers enseignements de la plateforme Trajectoire

Evaluation de l'impact des différentes stratégies de gestion des digestats sur les émissions d'ammoniac et de méthane au stockage et à l'épandage d'élevage.

Cas particulier des unités de méthanisation sans effluents d'élevage.

R. Girault₁, N. Auvinet₁, S.Génermont₂, F. Guiziou₁, A.S. Lissy₃, G. Nunes₁, AC. Santellani₁, T. Ramananjatovo₃, M. Sarrazin₁, A. Valle₁, M. Vieira Firmino Silva₁

₁ UR OPAALE – Inrae, Rennes.

₂ UMR ECOSYS – Inrae, Palaiseau.

₃ EnVisaGES – Methys Inrae Transfert Palaiseau.

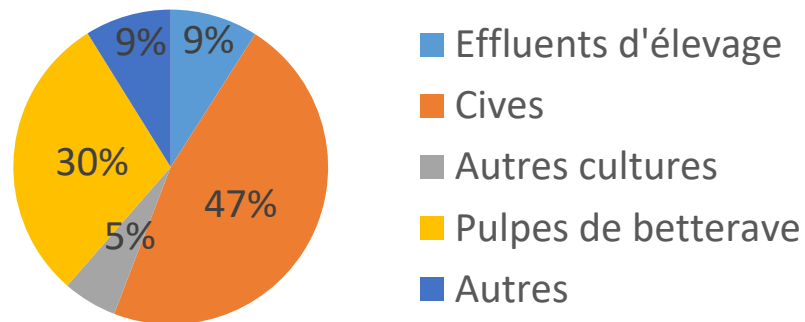
Financiers:



Contexte et enjeux

Spécificités des filières de méthanisation agricoles d'Île-de-France

Prédominance des substrats végétaux



Origine des substrats agricoles méthanisés en Île de France en 2021 (Source : AREC, 2022)



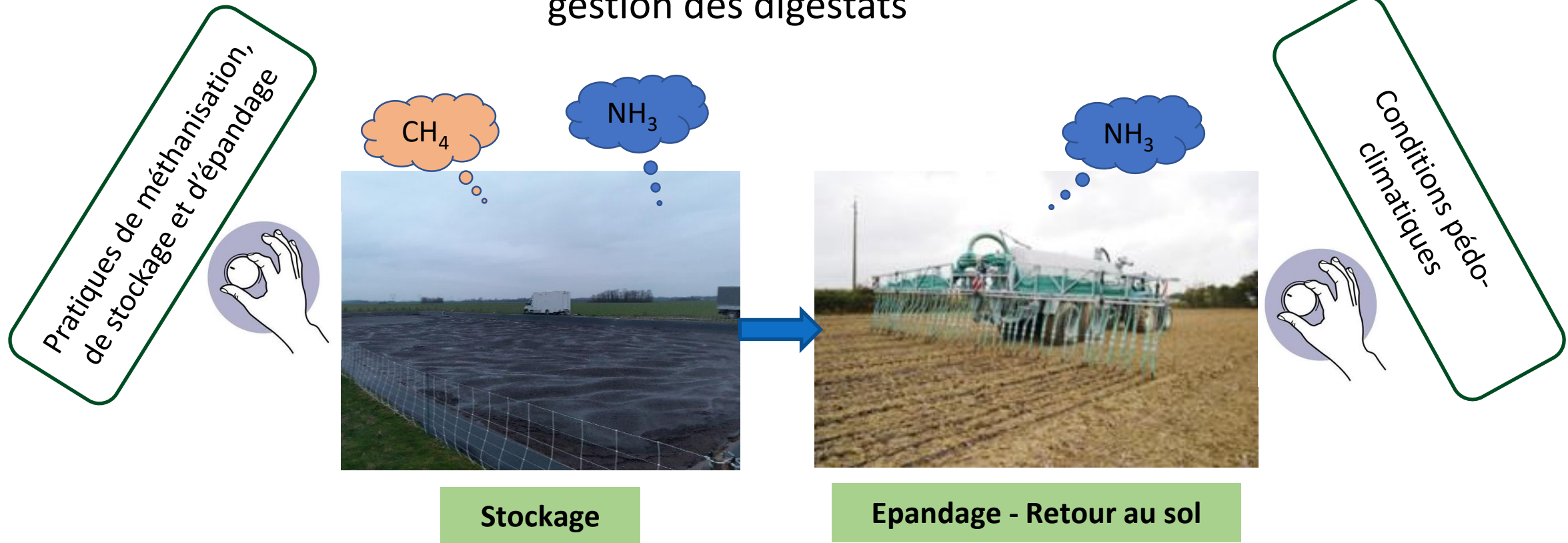
Filière de méthanisation connectée à des systèmes agricoles en grandes cultures



Une diversité d'infrastructures de stockage de digestats dont une forte proportion de lagunes

Enjeux et objectifs

Plusieurs sources d'émissions vers l'air potentielles sur la chaîne de gestion des digestats



Objectif : Evaluer l'effet de scénarios combinant pratiques de stockage et d'épandage sur les émissions gazeuses à l'échelle de la filière, dans le contexte de l'Île-de-France

Méthodologie

Prédiction des émissions d'ammoniac

Développement d'un modèle spécifique combiné à un modèle logistique

Stockage



Expérimentation de stockage sur pilotes

Développement d'un outil de prédiction basé sur l'intelligence artificielle (Apprentissage machine)



Validation sur des données issues d'un suivi in-situ

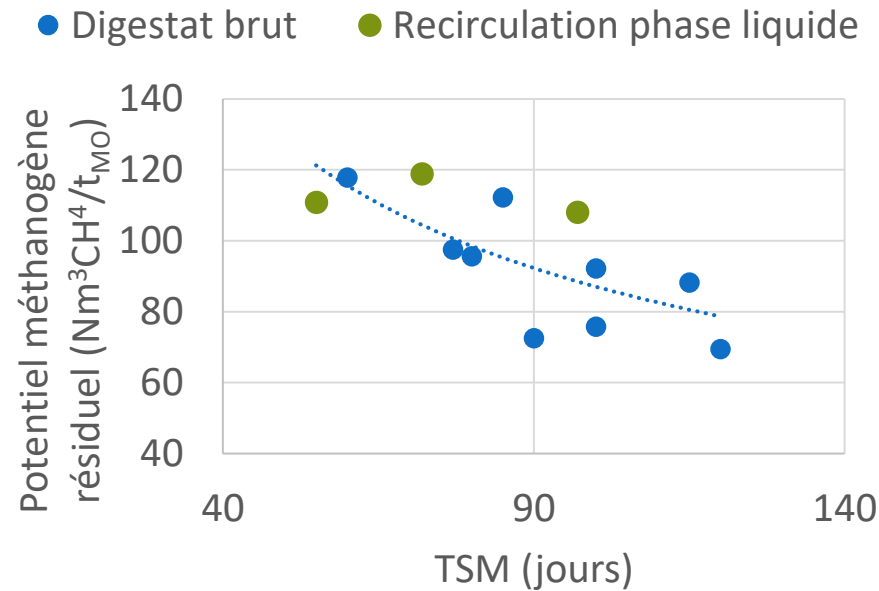
Epandage

Utilisation du modèle Volt'Air spécifiquement paramétré

Méthodologie

Estimation des émissions méthane au stockage

Evaluation de l'effet des paramètres étudiés sur le potentiel méthanogène résiduel du digestat



Prédiction de l'émission de méthane (% de la production)

Détermination d'une relation entre l'âge moyen du digestat stocké et l'émission volumique journalière (suivi in – situ)



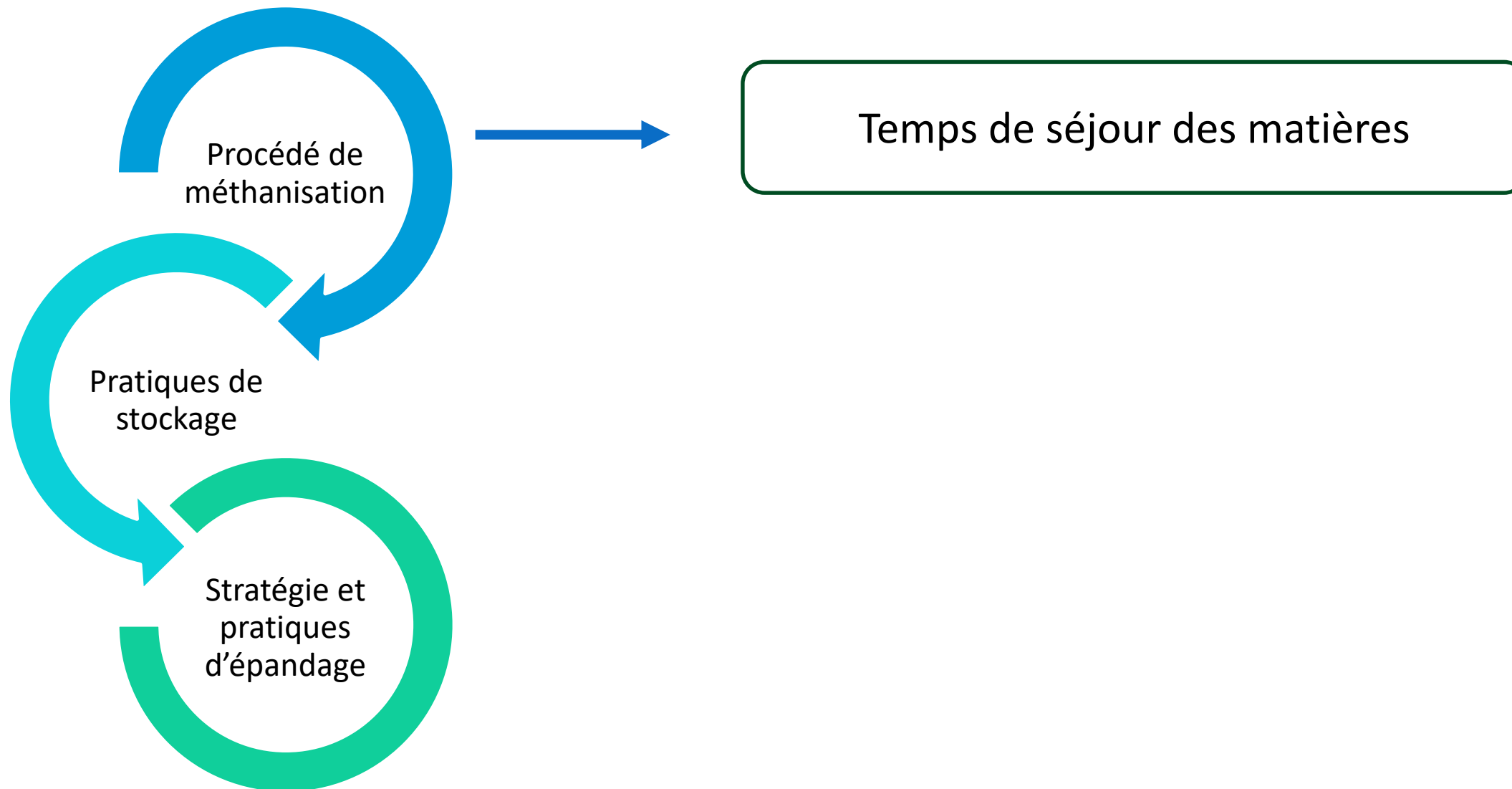
Modèle logistique



Taux d'expression journalier du potentiel méthanogène

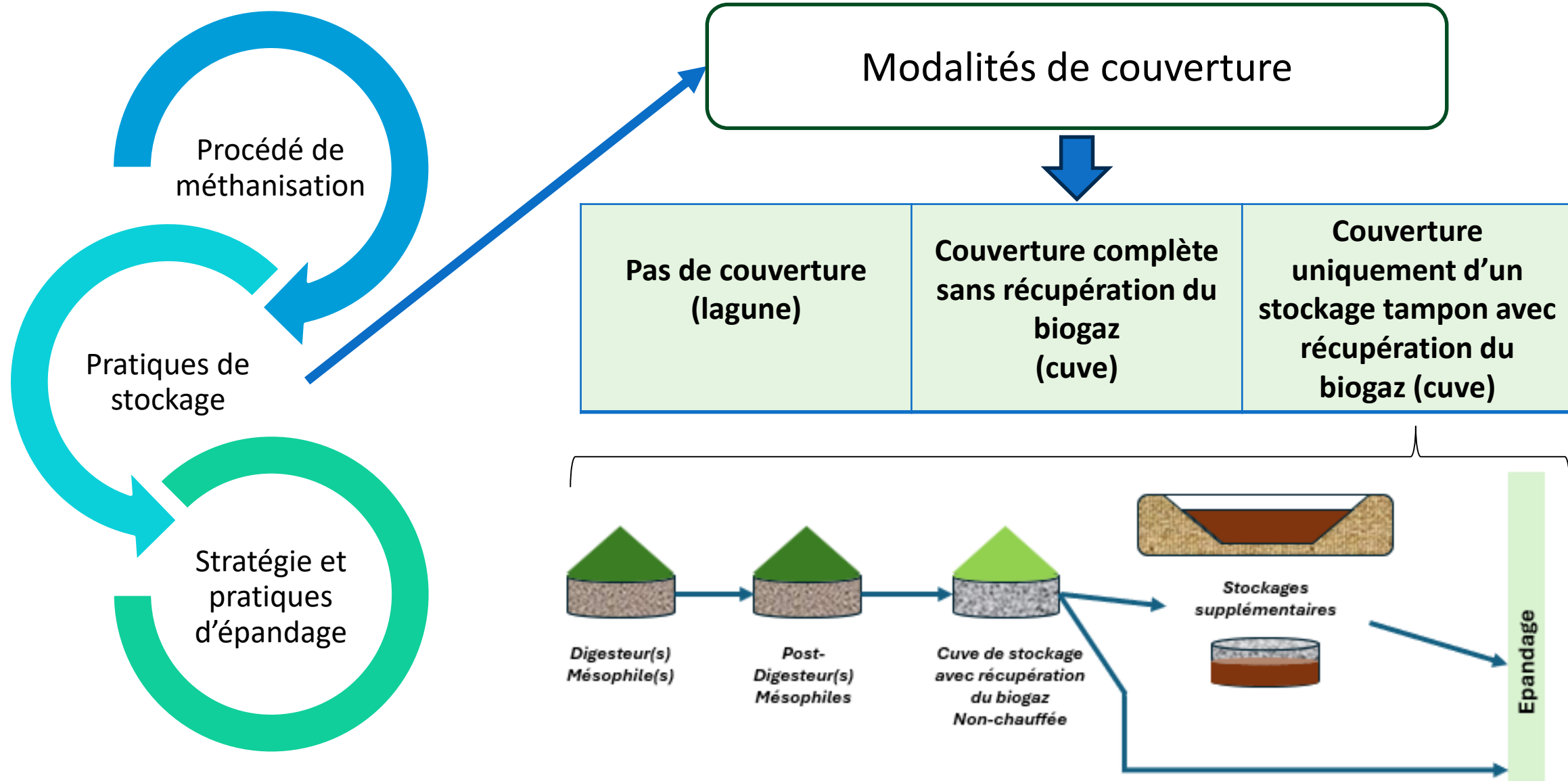
Méthodologie

Paramètres dont les effets ont été étudiés



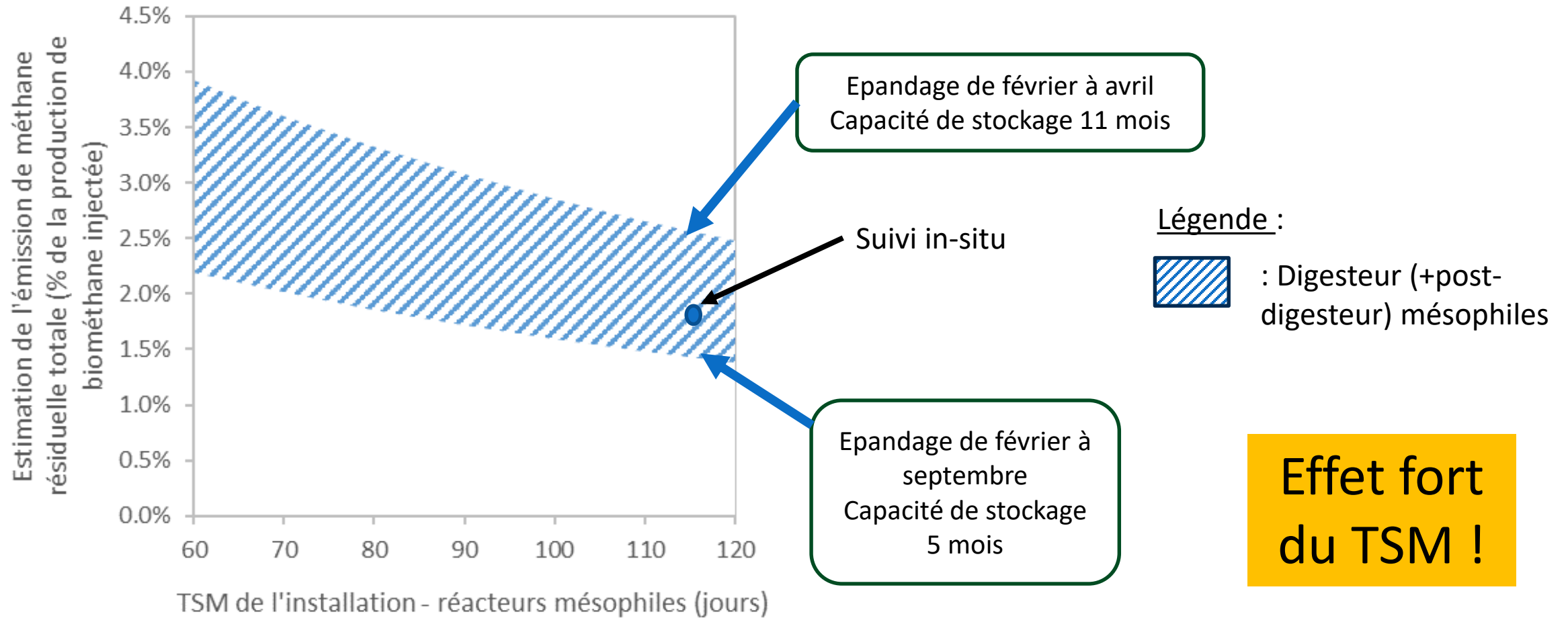
Méthodologie

Paramètres dont les effets ont été étudiés



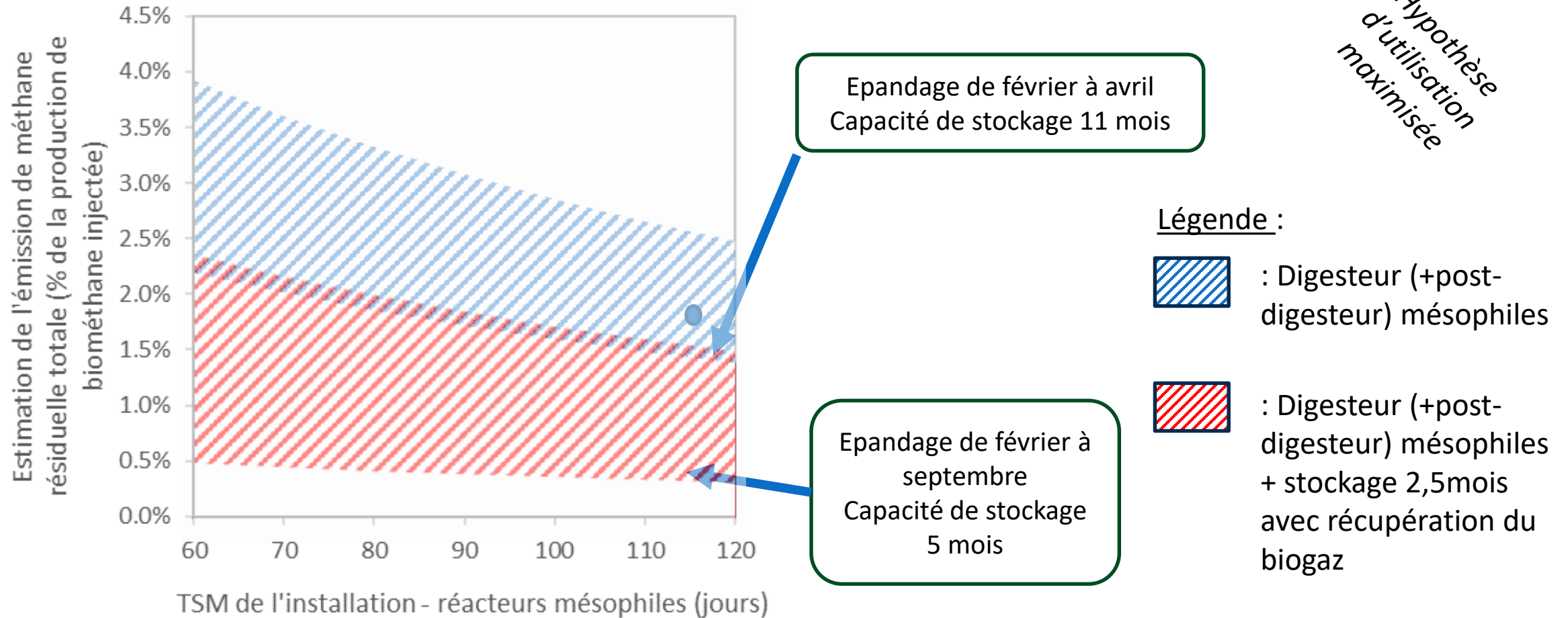
Résultats

Effet croisé des pratiques de méthanisation et de stockage sur les émissions de méthane résiduelles



Résultats

Effet croisé des pratiques de méthanisation et de stockage sur les émissions de méthane résiduelles



- Couverture avec récupération du biogaz de la capacité tampon = très fort potentiel de réduction
- Permet de réduire les émissions, même dans un contexte d'augmentation de capacité

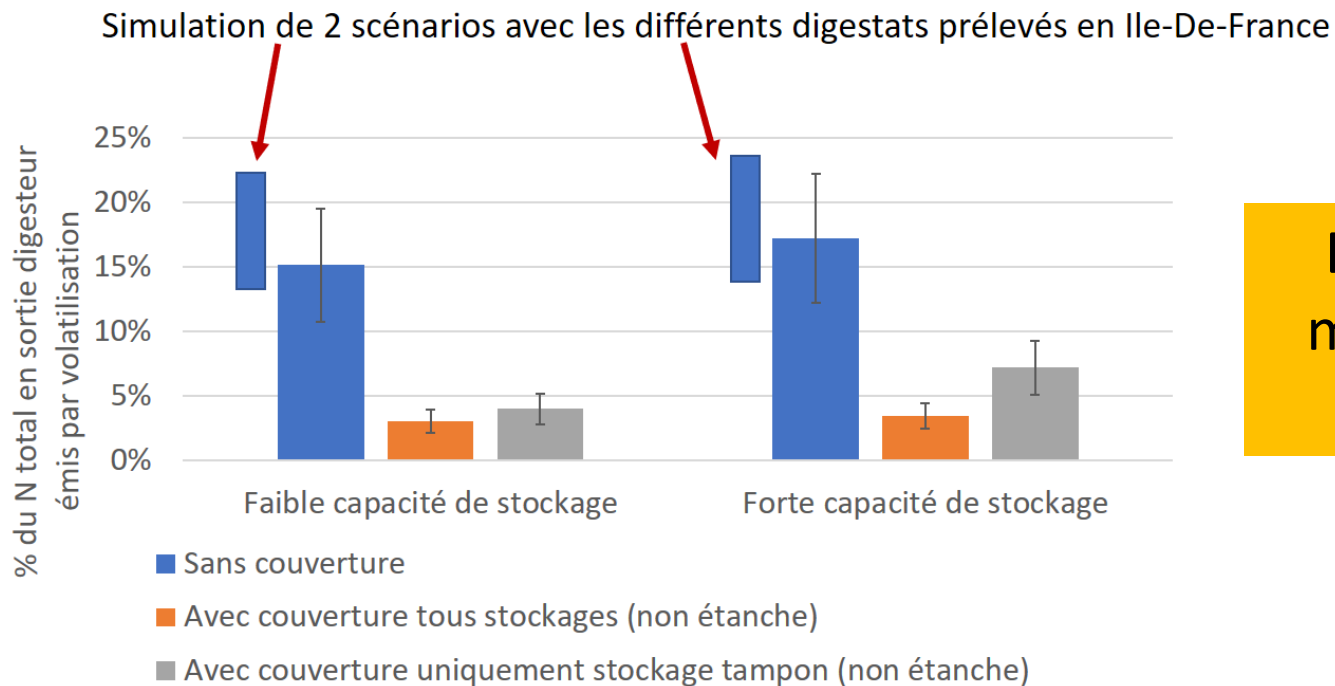
Résultats

Effet croisé des pratiques de stockage sur les émissions d'ammoniac

Suivi in-situ : 14 ± 6 % de l'azote total du digestat perdu (25% de l'azote ammoniacal)

Simulation de 2 scénarios de gestion franciliens «type » avec les différents digestat prélevés

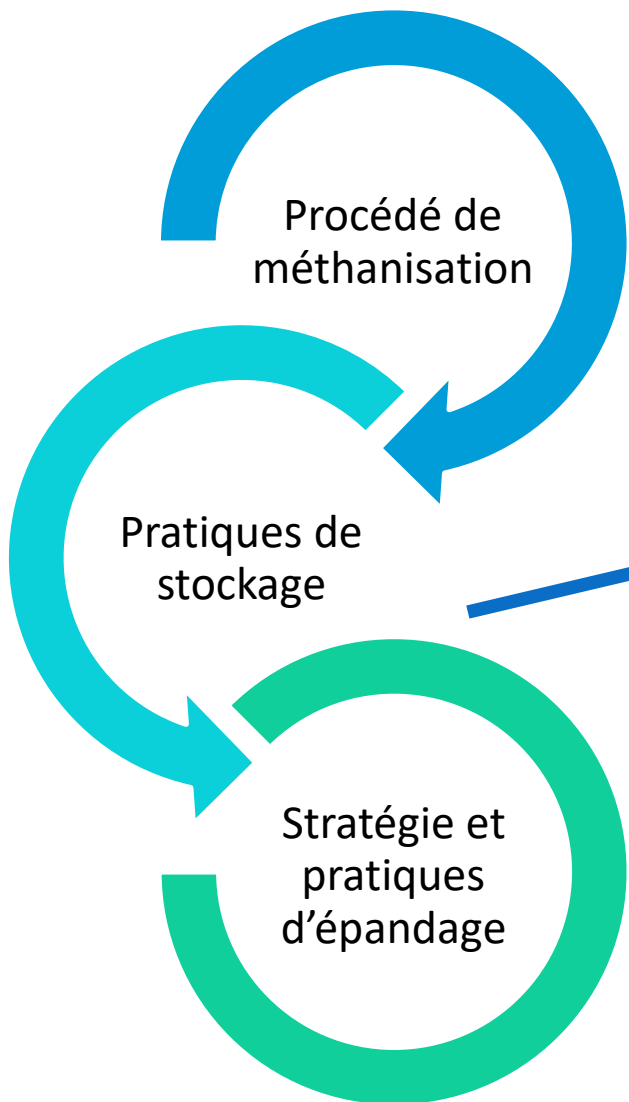
Hypothèse d'un
taux de réduction
des émissions de
80%



Effet positif de la couverture même si elle est limitée à une première étape de stockage

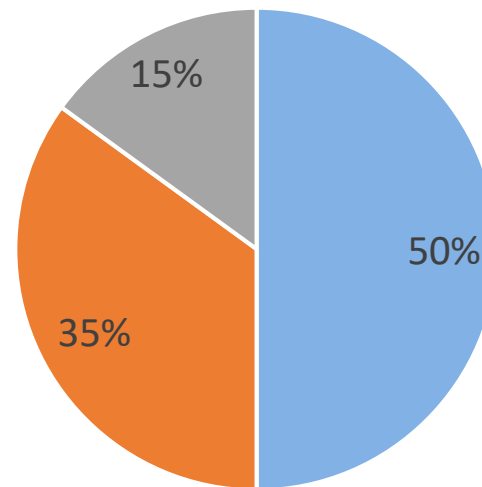
Méthodologie

Paramètres dont les effets ont été étudiés

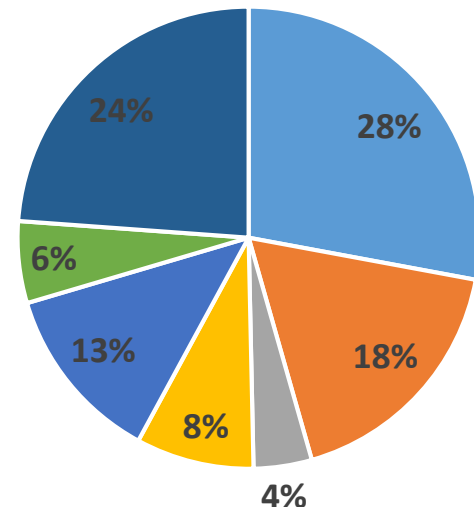


Epandage de février à avril
Capacité de stockage 11 mois

Epandage de février à septembre
Capacité de stockage 5,5 mois



Proportion de digestat épandu sur les différentes cultures



■ 1 : Février/Céréales

■ 2: Mars : Avant betteraves

■ 3 : Avril : Avant Maïs

■ 4 : Mai-Juin / Entre Cive et Maïs

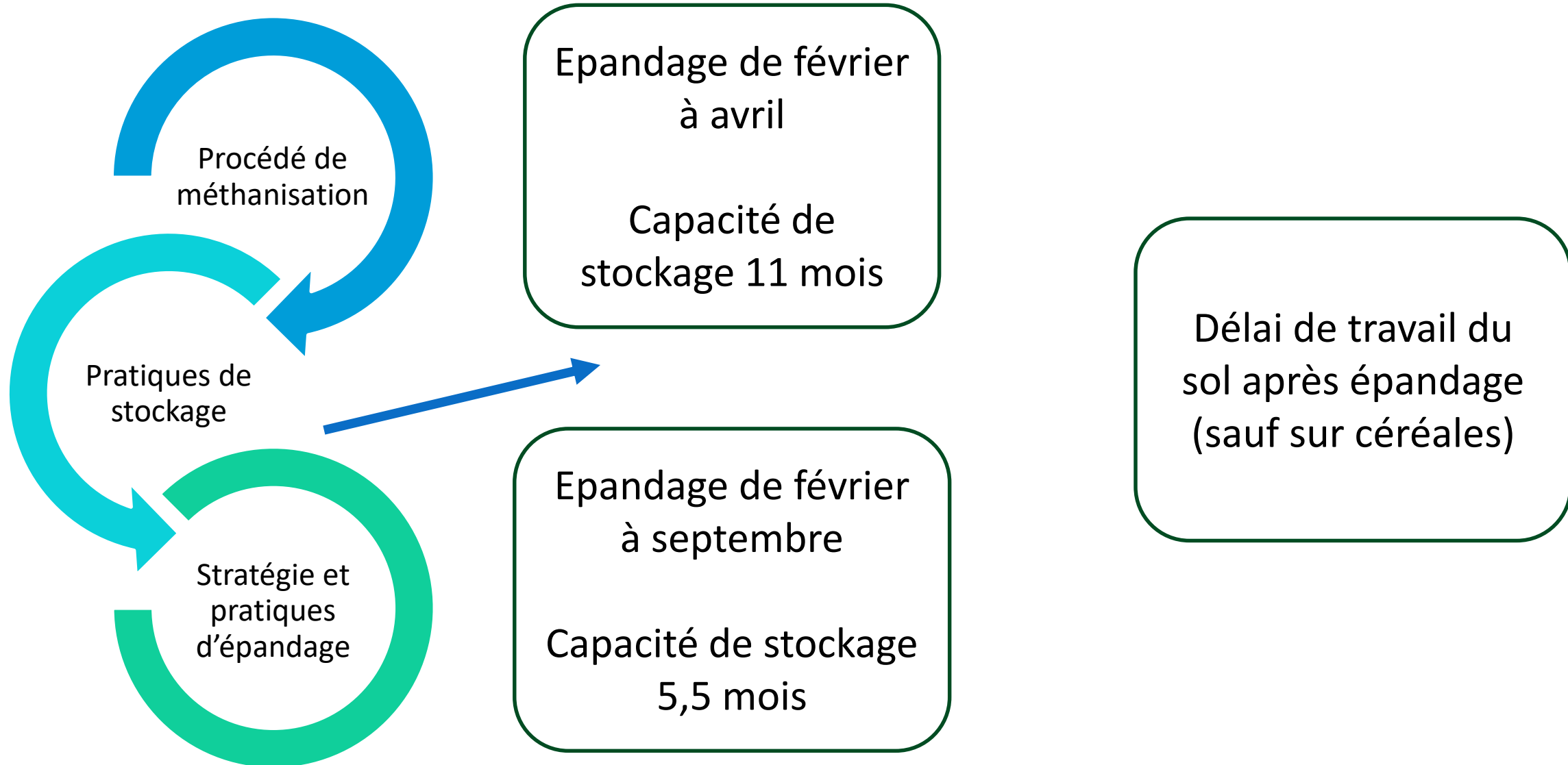
■ 5 : Juillet : Avant Cive d'été

■ 6 : Aout : Avant Colza/Cipan Moutarde

■ 7: Avant semis de céréales

Méthodologie

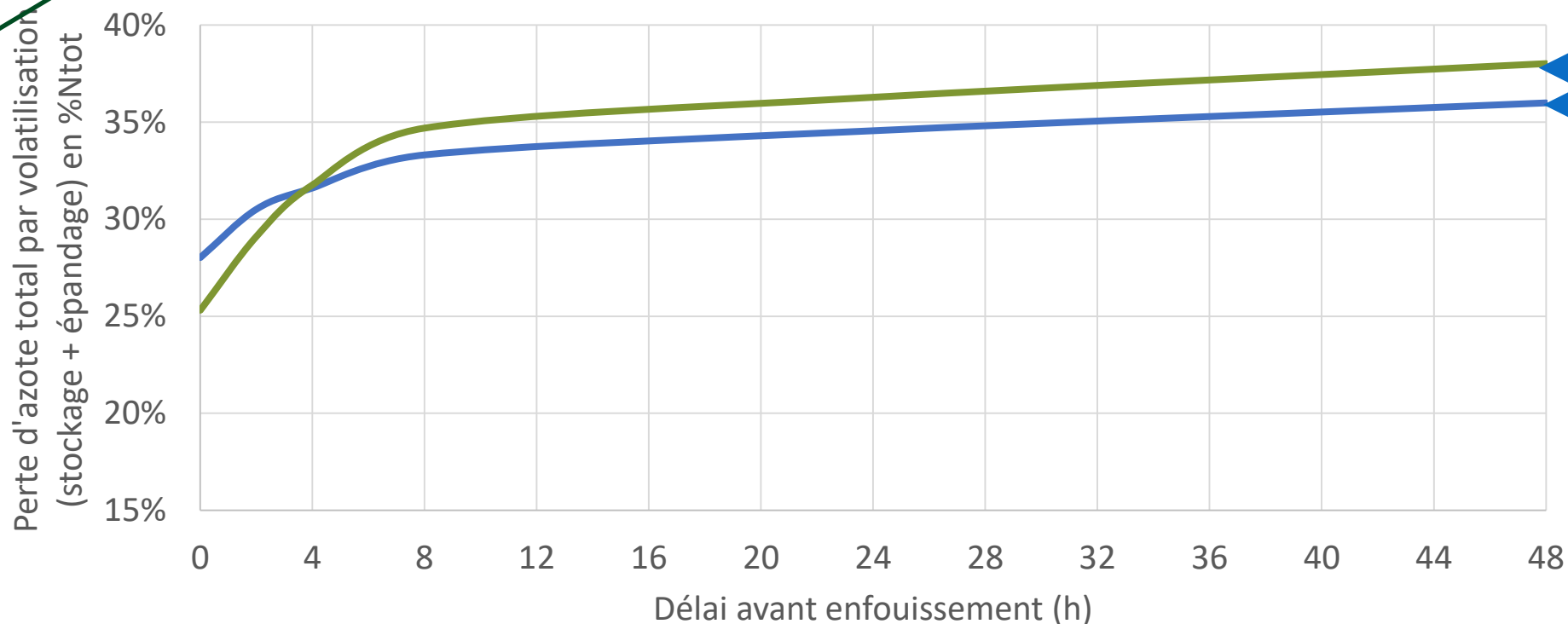
Paramètres dont les effets ont été étudiés



Résultats

Effet du délai de travail du sol sur les émissions d'ammoniac

- Scénario forte capacité de stockage - sans couverture
- Scénario faible capacité de stockage - sans couverture



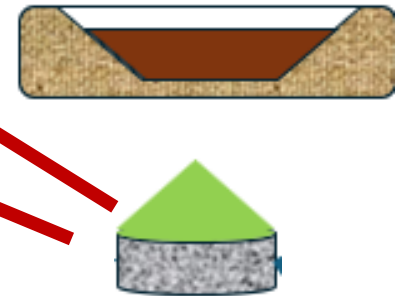
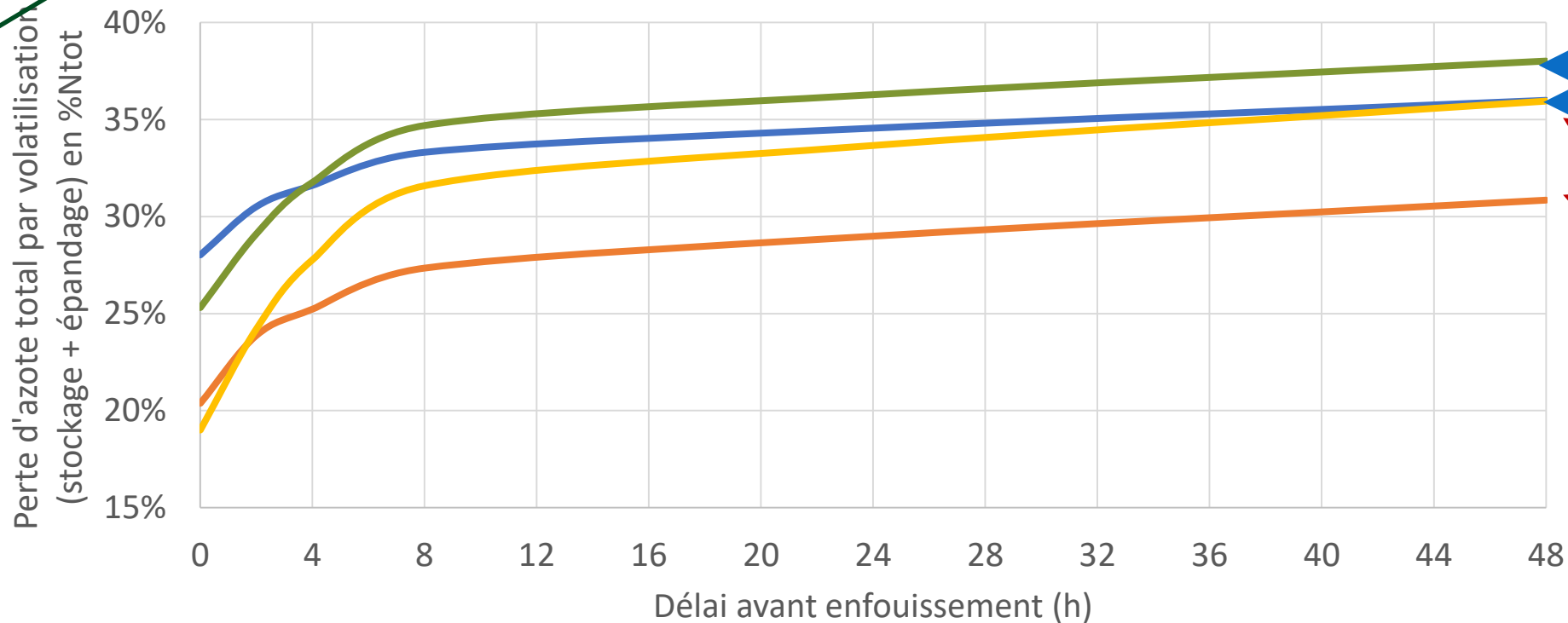
Estimations par modélisation des cumuls de pertes d'azote par volatilisation au stockage et à l'épandage (cas particulier d'un digestat) en fonction des délais d'enfouissement post-épandage considéré.

Exemple de résultats
sur un digestat et un
type de sol

Résultats

Effet du délai de travail du sol sur les émissions d'ammoniac

- Scénario forte capacité de stockage - sans couverture
- Scénario forte capacité de stockage - avec couverture
- Scénario faible capacité de stockage - sans couverture
- Scénario faible capacité de stockage - avec couverture

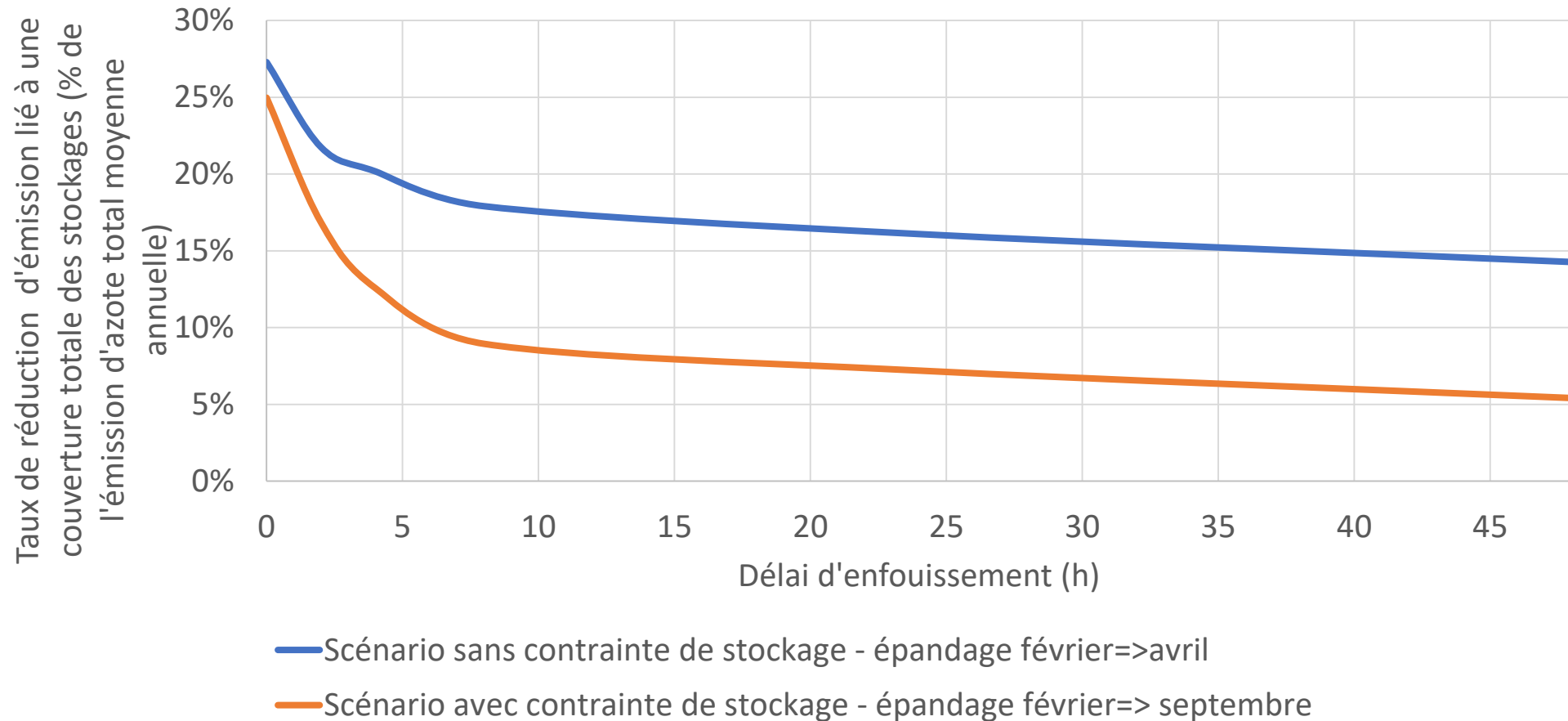


Estimations par modélisation des cumuls de pertes d'azote par volatilisation au stockage et à l'épandage (cas particulier d'un digestat) en fonction des délais d'enfouissement post-épandage considéré.

Exemple de résultats sur un digestat et un type de sol

Résultats

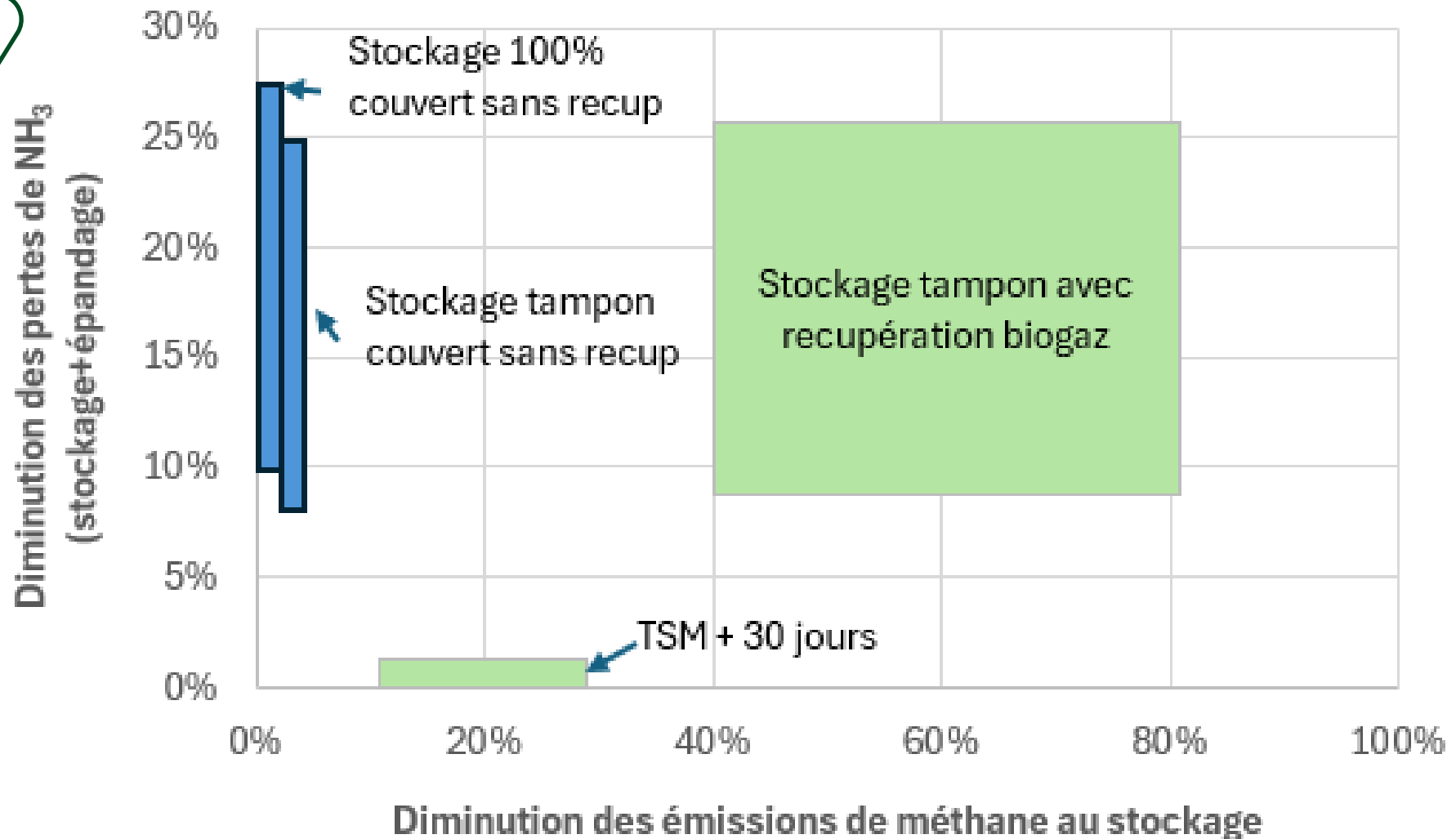
Effet du délai de travail du sol sur l'effet de la couverture



Estimation du taux de réduction des émissions (stockage + épandage des digestats) lié à une couverture des stockages en fonction du délai entre l'épandage et le travail du sol.

Synthèse – effet comparatif des mesures de réduction au stockage

Cas-type TSM =
80 jours, délai de
travail du sol = 6h



LEGUMETHA : quel potentiel de valorisation des légumineuses via la méthanisation ?

Evaluation multicritères à l'aide de la plateforme MAELIA

Nirina Ratsimba^{1*}, Manon Dardonville¹, Romain Girault², Florent Levavasseur³, Hugues Clivot⁴, Olivier Therond¹

¹ Université de Lorraine, INRAE, LAE, F-68000, Colmar, France

² INRAE, UR OPAALE, 17 Avenue de Cucillé, 35044 Rennes, France

³ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 91120 Palaiseau, France

⁴ Université de Reims Champagne-Ardenne, INRAE, FARE, UMR A 614, Reims, France

Financement du projet : GRDF

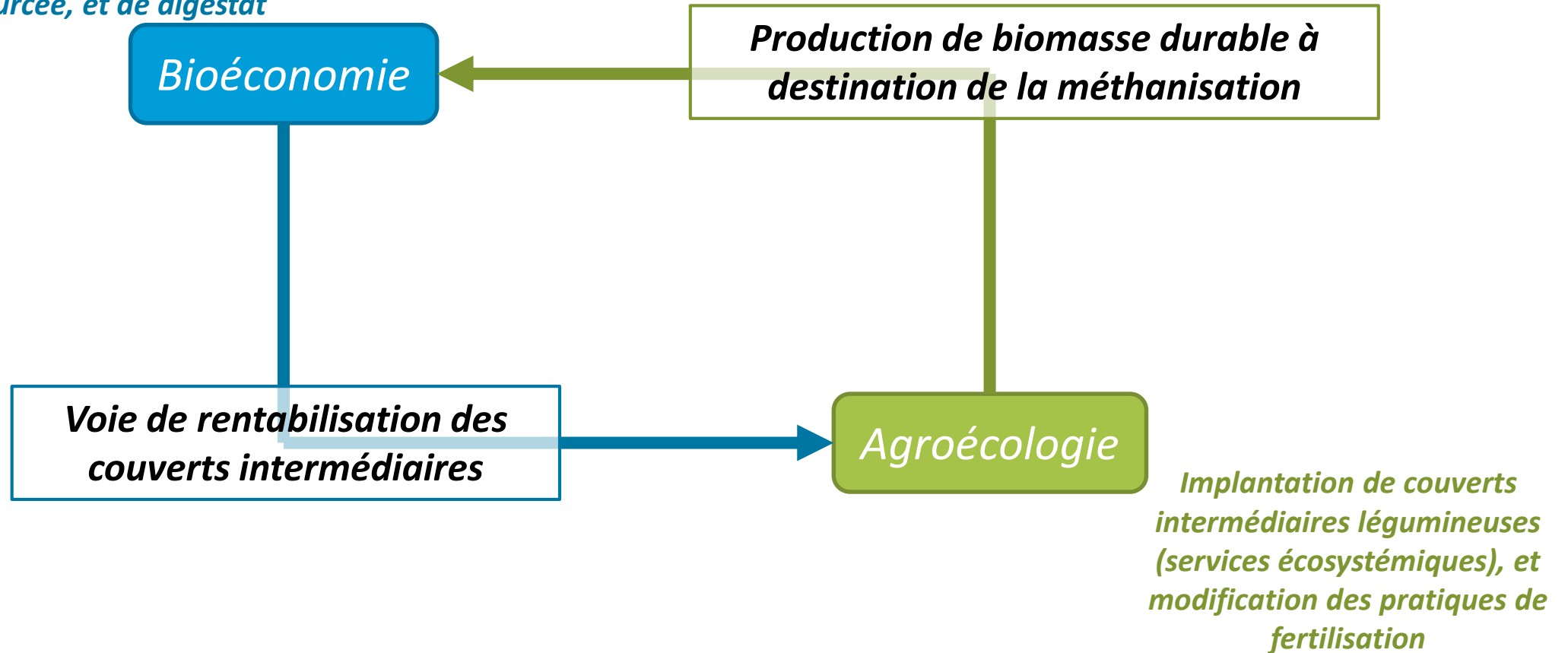
Contexte : Bioéconomie & Agroécologie

Agroécologie

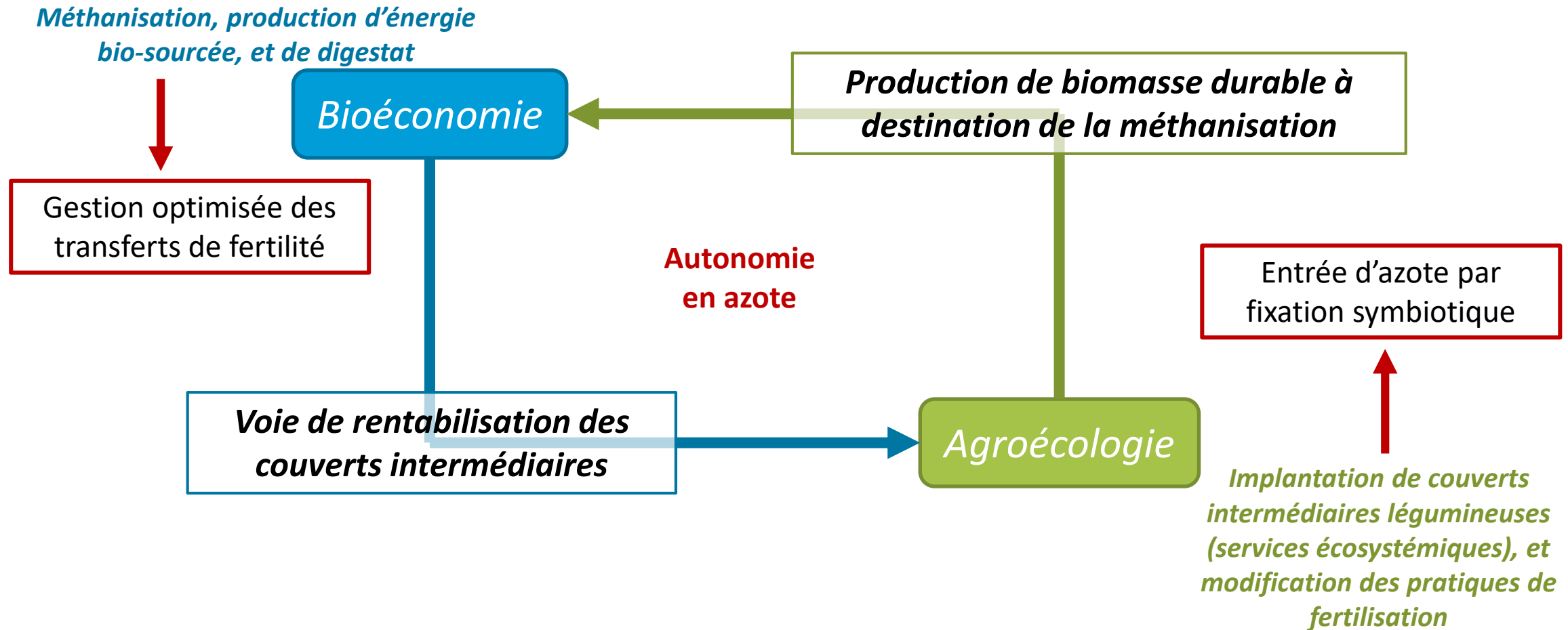
*Implantation de couverts
intermédiaires légumineuses
(services écosystémiques), et
modification des pratiques de
fertilisation*

Contexte : Bioéconomie & Agroécologie

*Méthanisation, production d'énergie
bio-sourcée, et de digestat*

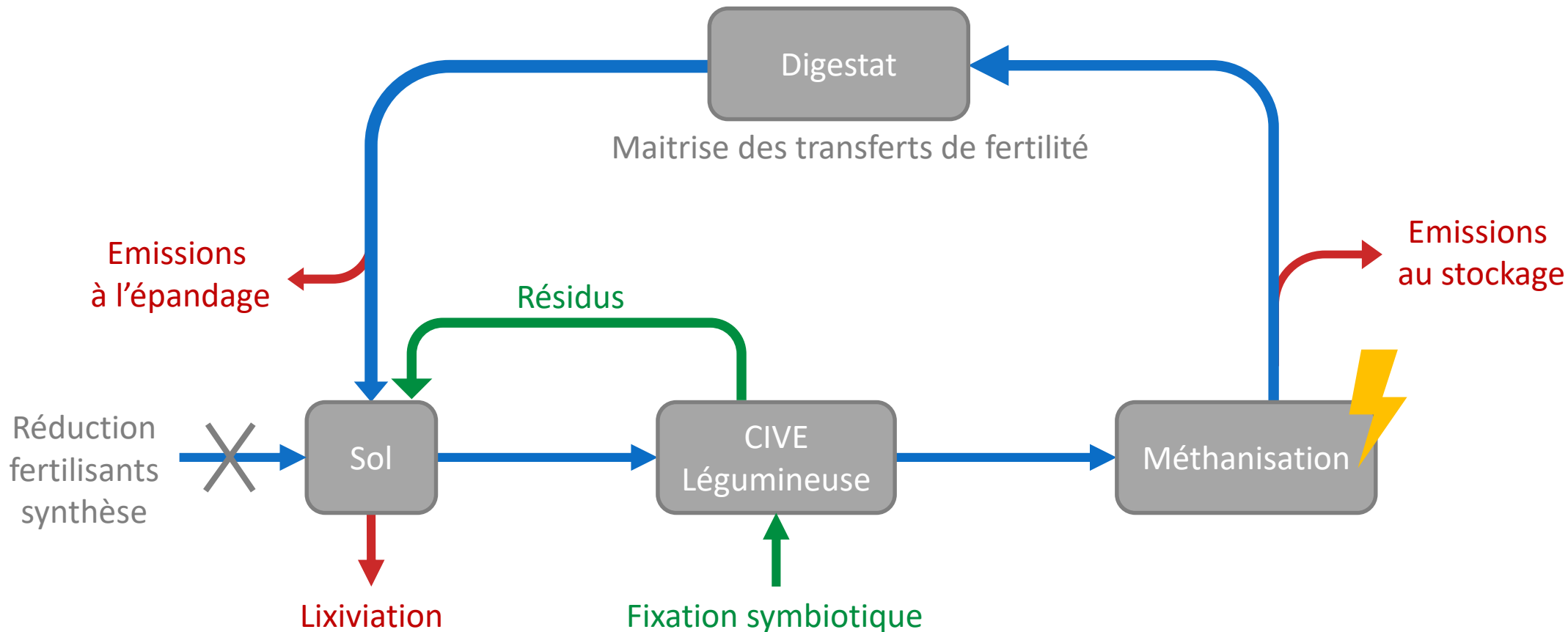


Contexte : Bioéconomie & Agroécologie

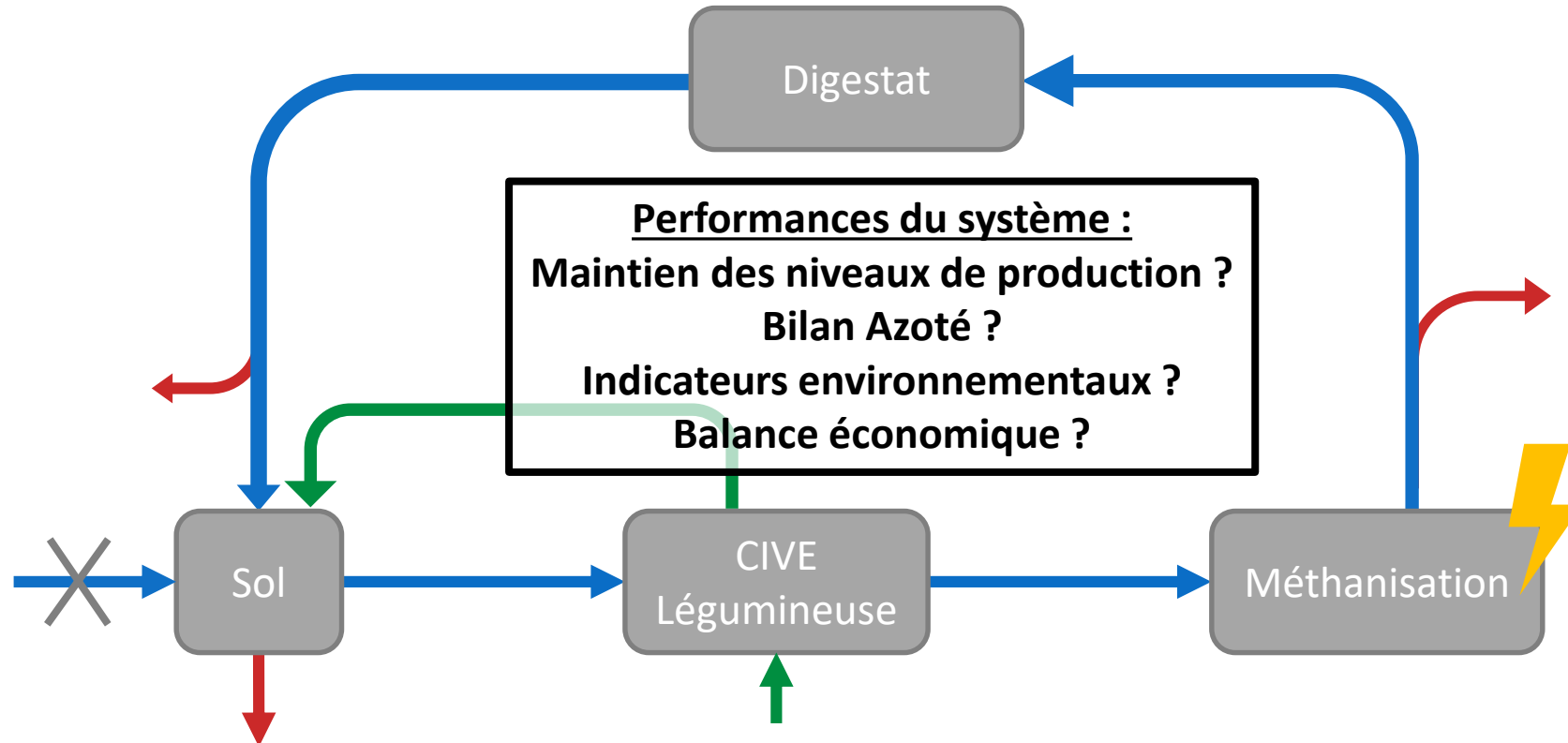


Contexte : Cycle de l'azote

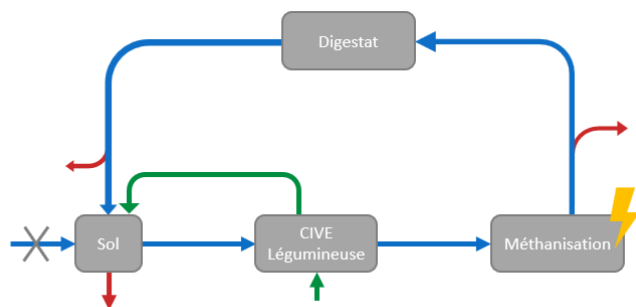
Flux d'azote (**pertes** et **restitutions**) dans le cas d'une utilisation de CIVE légumineuses en méthanisation



Contexte : Cycle de l'azote



Matériel & Méthode : Dispositif de modélisation

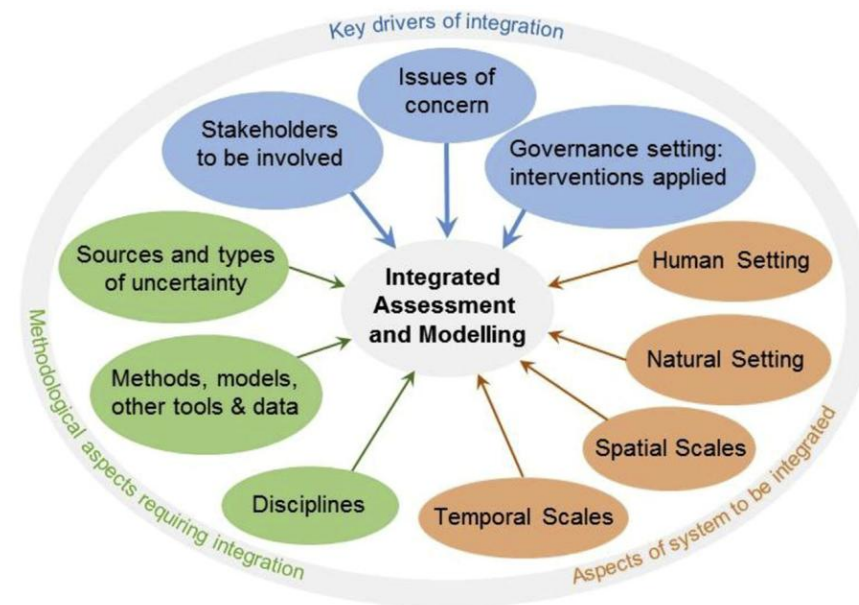


Performance du système =

Résultante de l'interaction de nombreux objets, sur des échelles larges
 → Intégration nécessaire des connaissances disponibles sur chacun de ces objets

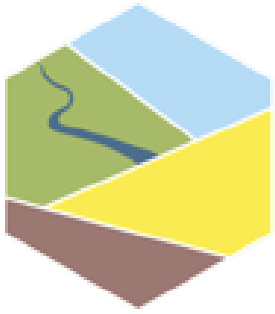
Les **modèles** : une voie d'intégration des connaissances génériques et locales pour accompagner la conception, exploration et évaluation de systèmes socio-écologiques (territoires)

→  MAELIA & SYS-Metha



10 « dimensions of integration » in IAM

Hamilton et al. 2015

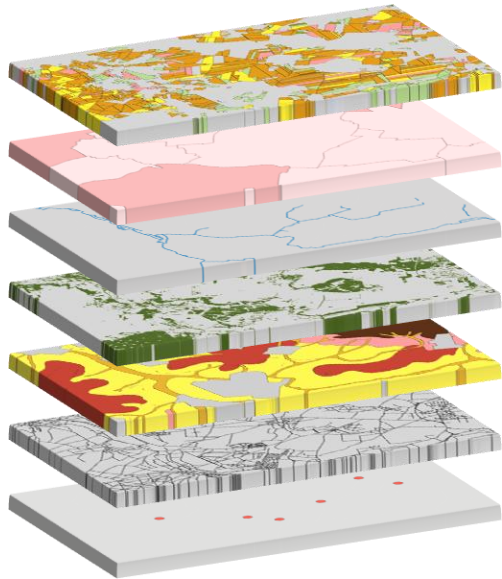


Matériel & Méthode : la plateforme MAELIA

Systeme multi-agent spatialisé

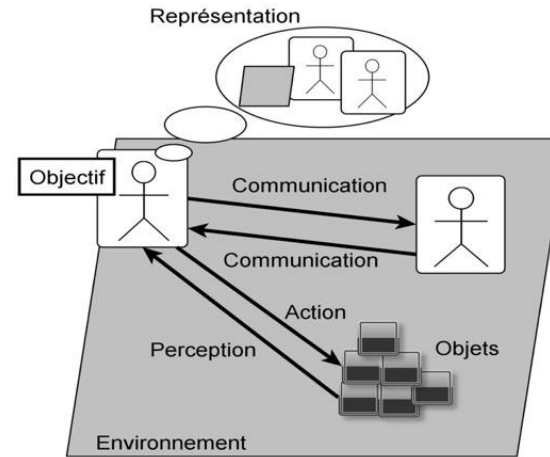
Base de données géoréférencées
-> *structure*

- Couches :**
- Climat
- Sols
- Parcelles et ilots
- Rotations RPG
- Exploitations



+

Chaîne de modèles
-> *dynamique*

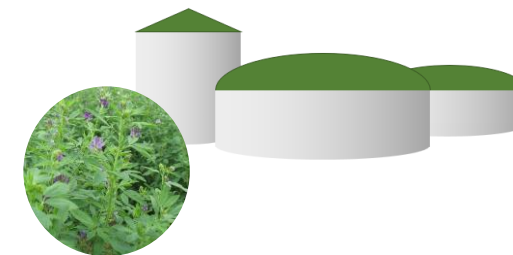
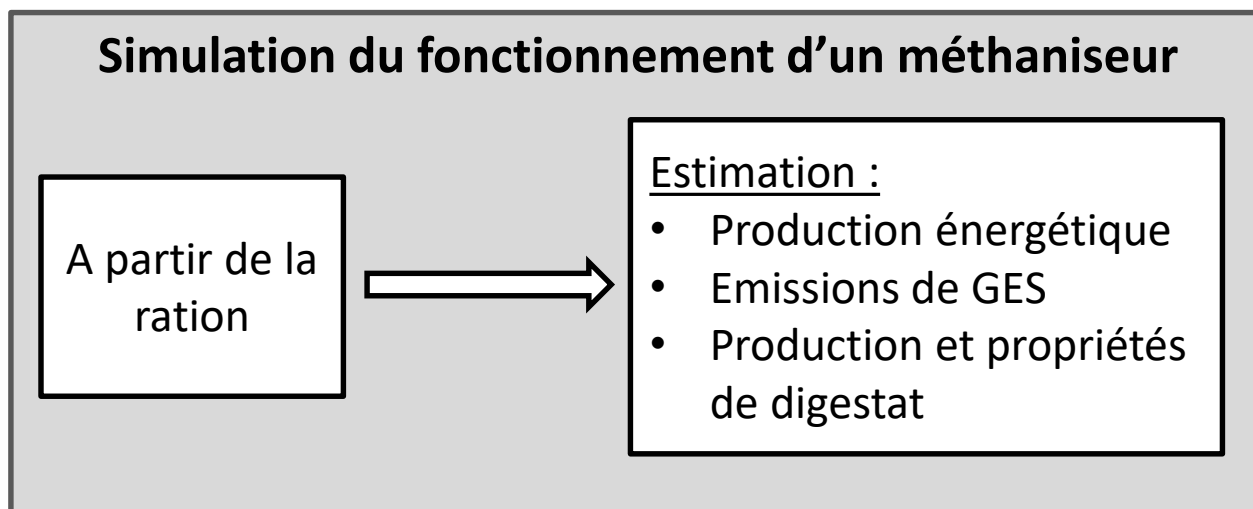


- Modèles couplés :**
- Sol – Plante (AqYield et HerbSim)
 - Règles de décisions agriculteurs
 - Module économique
 - ...

Therond, Olivier, et al. "Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems." (2014)

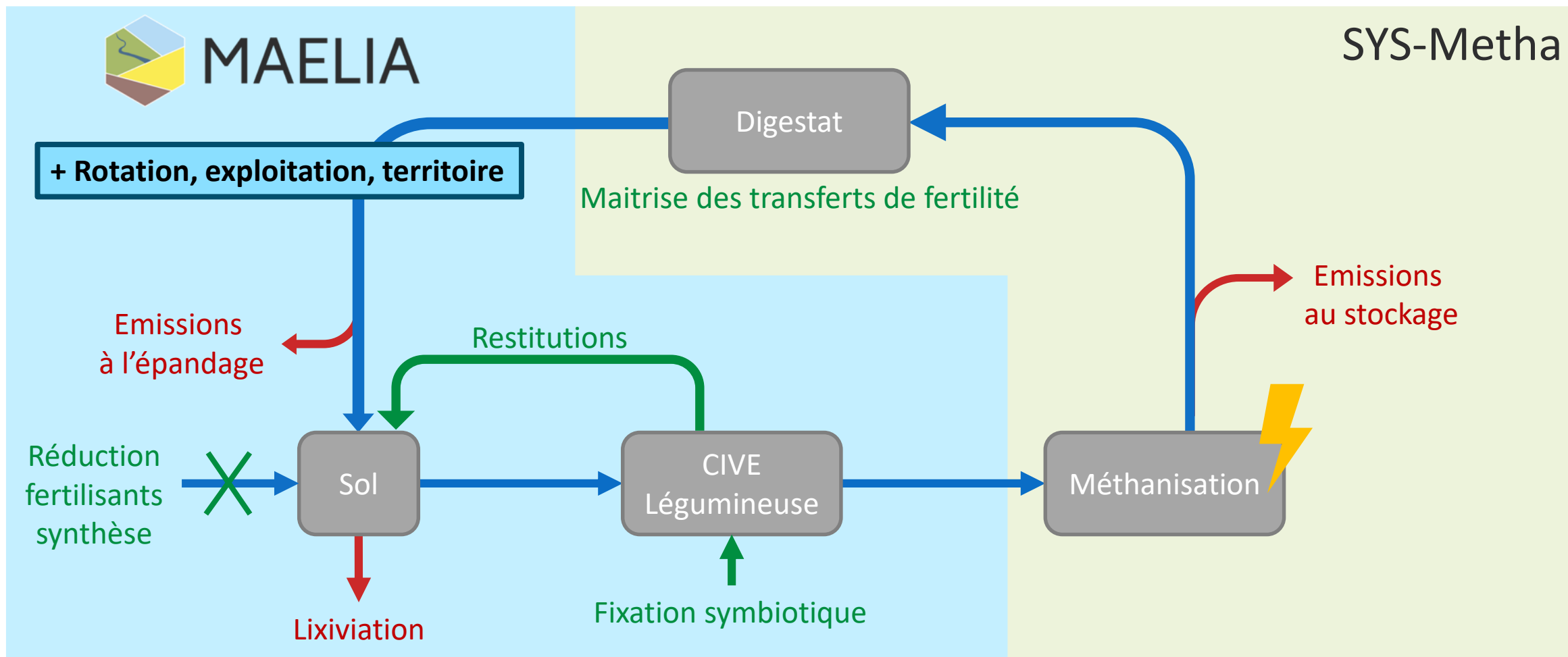


Matériel & Méthode : SYS-Metha

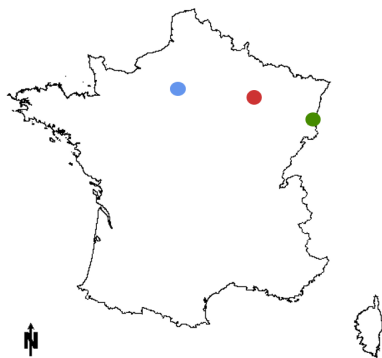


Bareha, Younès; Affès, Rim; Buffet, Julie; Girault, Romain, 2021, "SYS-Metha : Outil de prédiction des flux d'azote et de carbone sur les filières de méthanisation et des propriétés des digestats." Recherche Data Gouv, V1

Contexte : Dispositif de modélisation

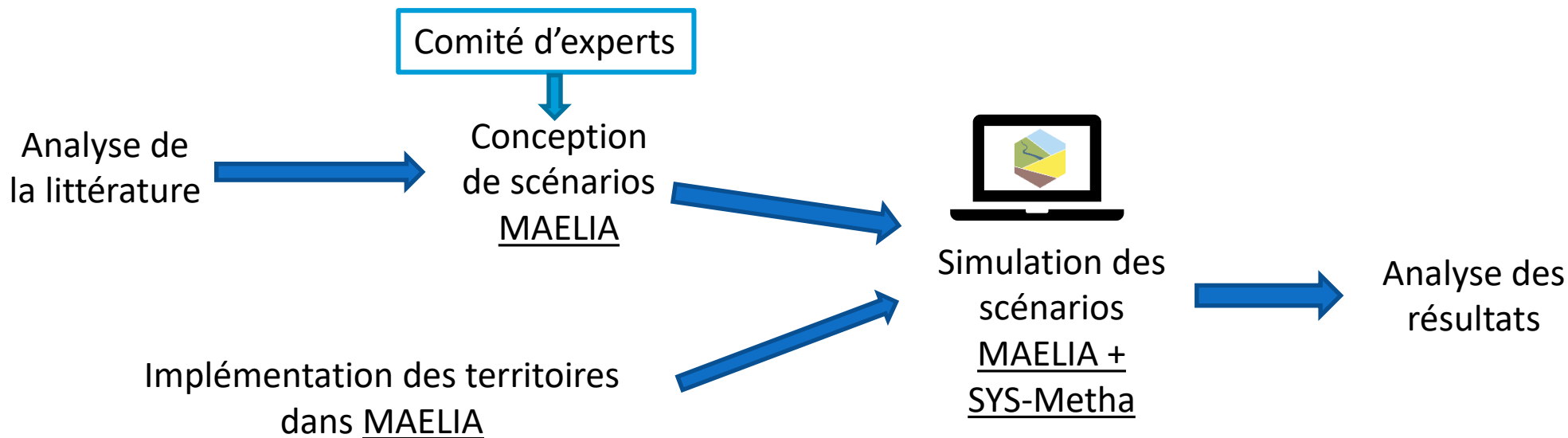


Matériel & Méthode : Dispositif de modélisation



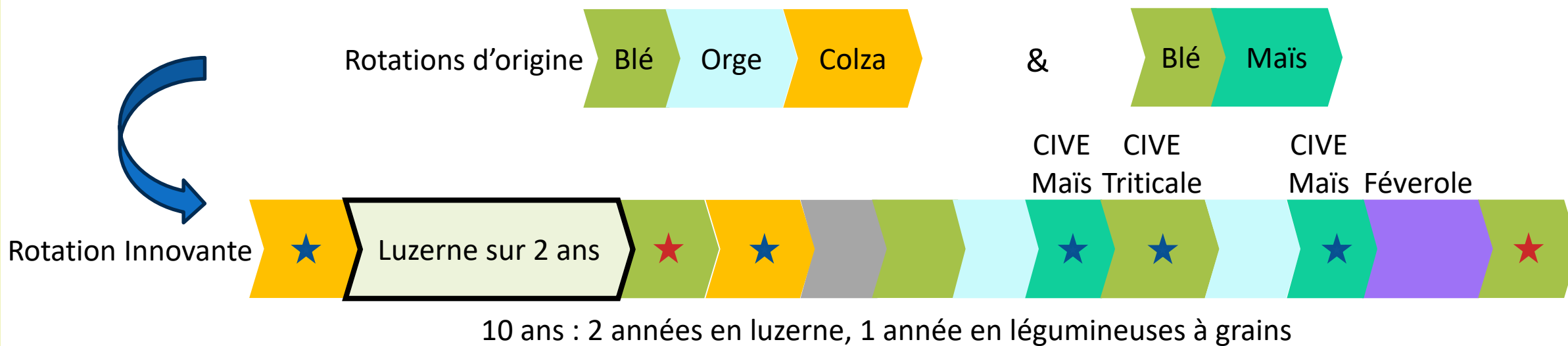
3 Territoires contrastés :

- **Commune de Bure**, Blé/Orge/Colza, faible potentiel agronomique
- **Plaine de Versailles**, Blé/Orge/Colza, fort potentiel agronomique
- **Plaine d'Alsace**, Monoculture de Maïs, fort potentiel agronomique



Matériel & Méthode : Scénarios

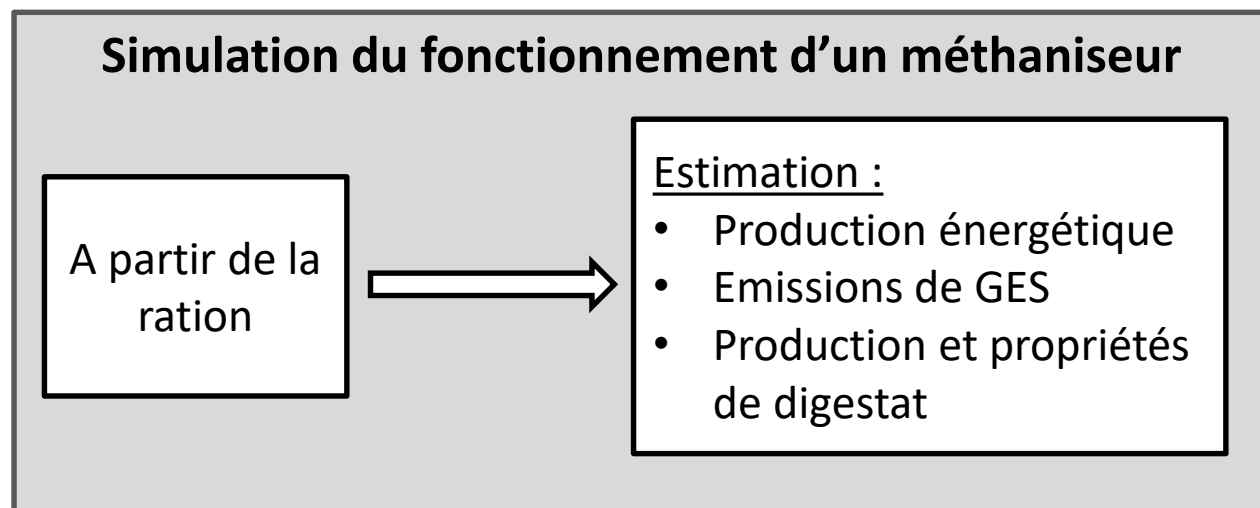
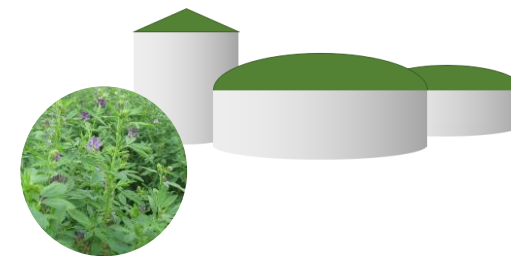
Rotation intégrant la luzerne en prairie temporaire sur 2 ans, et 1 année de légumineuse à grain
 Respect des pourcentages observés pour les cultures principales
 Même exercice pour les 2 autres territoires, en fonction de leurs assolements respectifs
 2 scénarios de déploiement, ex. 65% ou 80% des parcelles du territoire



★ Ajout de digestat

★ Réduction de la fertilisation

Matériel & Méthode : SYS-Metha



Méthanisation & Luzerne

- Utilisation des rendements simulés par MAELIA
- Ration : Luzerne (20%), CIVEs Maïs et Triticale, Maïs ensilage (16%), effluents déjà utilisés sur le territoire
- Digestat obtenu riche en N

Bareha, Younès; Affès, Rim; Buffet, Julie; Girault, Romain, 2021, "SYS-Metha : Outil de prédiction des flux d'azote et de carbone sur les filières de méthanisation et des propriétés des digestats." Recherche Data Gouv, V1

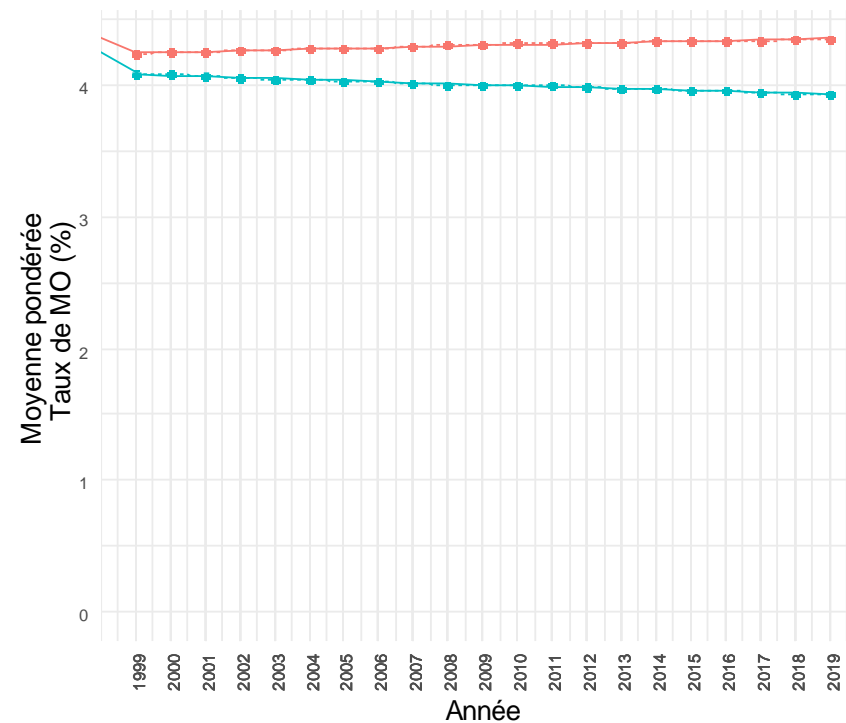
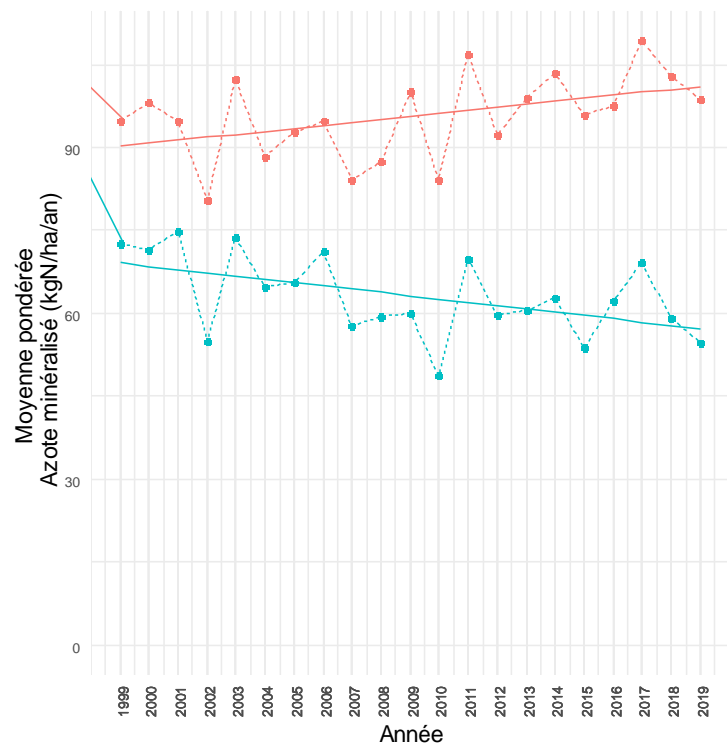
Quelques résultats

Territoire « Commune de Bure », Blé/orge/Colza, faible potentiel agronomique
Scénario de référence VS **Scénario 65% des parcelles en rotation innovante**



Résultats : Azote minéralisé

Scénario de référence VS Scénario 65% des parcelles en rotation innovante

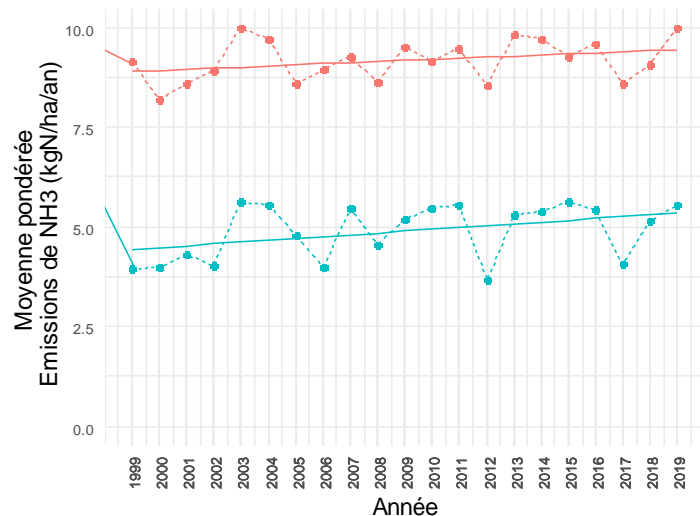


Passage d'une baisse de la quantité d'azote minéralisé à une augmentation au cours des années

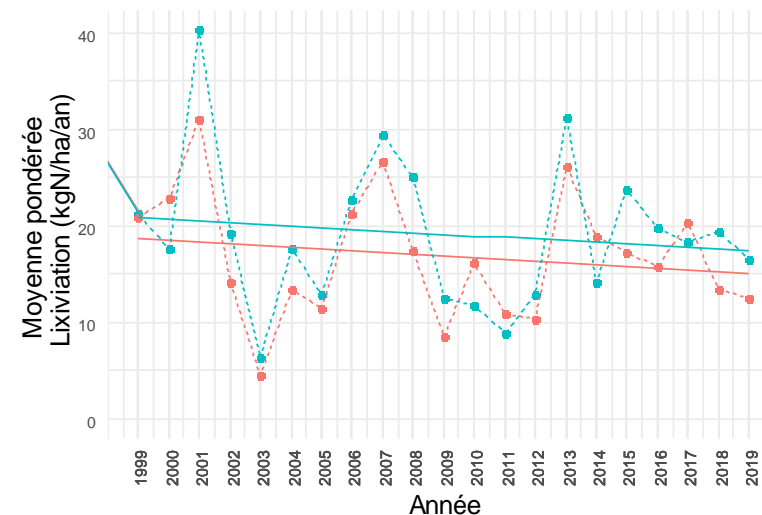
Augmentation du taux de matière organique du sol

Résultats : Emissions de GES et pertes en N

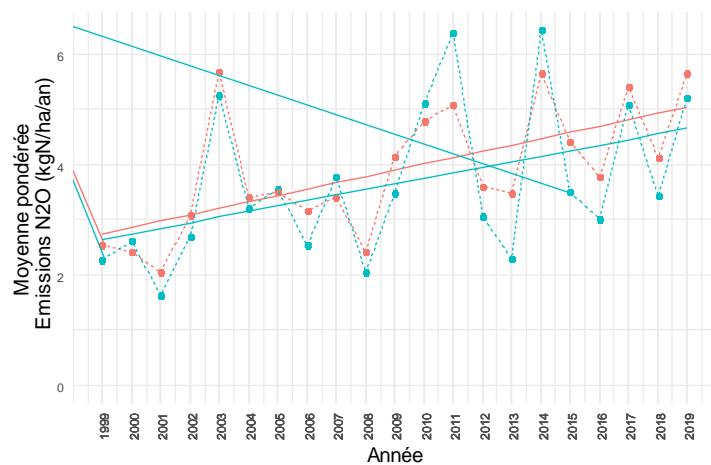
Référence VS 65% des parcelles en rotation innovante



Emissions NH3
Augmentation
➤ épandage de digestat



Lixiviation
Légère diminution
➤ Couverture du sol



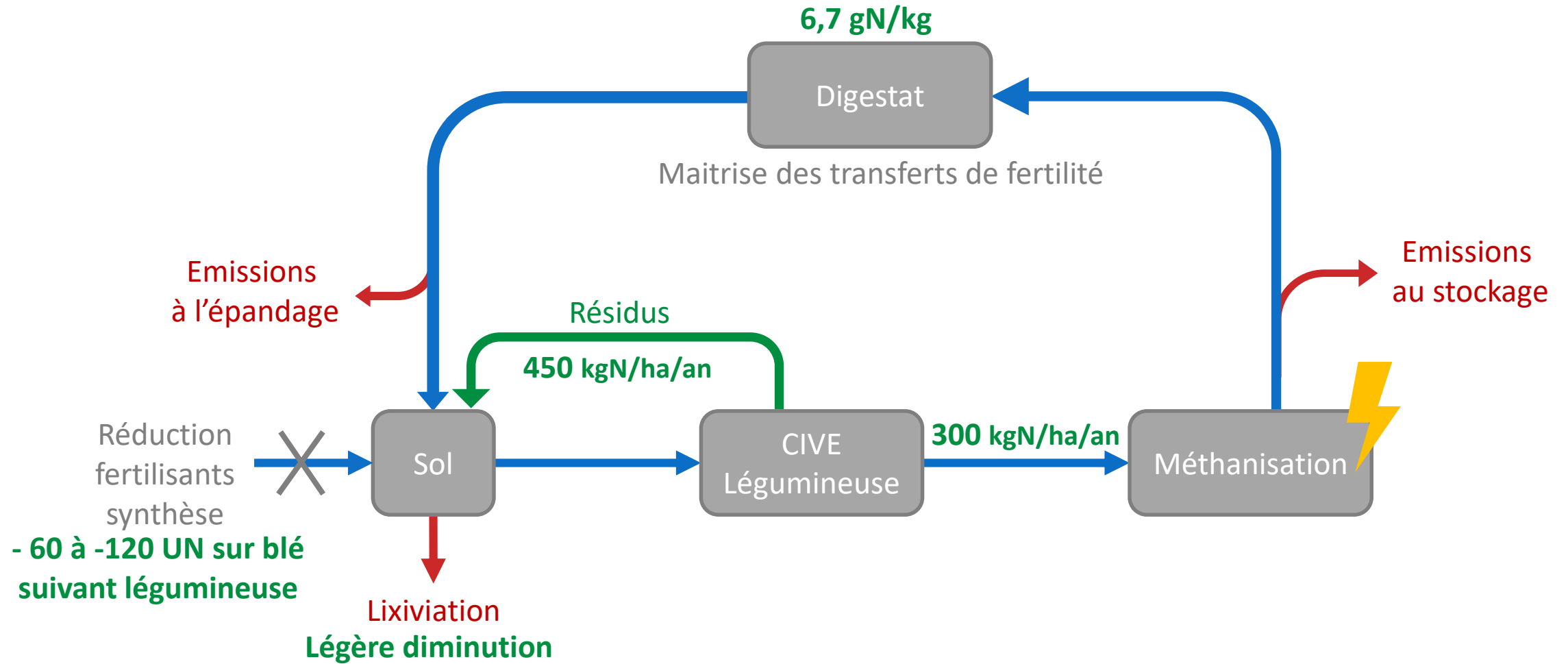
Emissions N2O
Augmentation légère

Résultats : Evolutions des surfaces & et des rendements

Culture	Surfaces (ha/an)			Rendements (t/ha/an)		
	Référence	65%	Evolution (%)	Référence	65%	Evolution (%)
Blé tendre d'hiver	5 090	4 972	- 2.3	7.89	7.62	- 3.45
Colza	3 776	3 066	- 18.82	2.52	2.87	+ 13.83
Orge Hiver	2 977	1 786	- 39.99	7.03	7.35	+ 4.54
Orge Printemps	2 989	1 759	- 41.16	6.66	6.19	- 7.05
Maïs Ensilage	896	319	- 64.45	9.58	9.67	+ 0.93

Faible pertes en rendement, voire augmentation grâce à l'augmentation fourniture en azote du sol, et l'apport de digestat.
Optimisation de la fertilisation possible

Résultats : Bilan azoté



Résultats : Balance économique

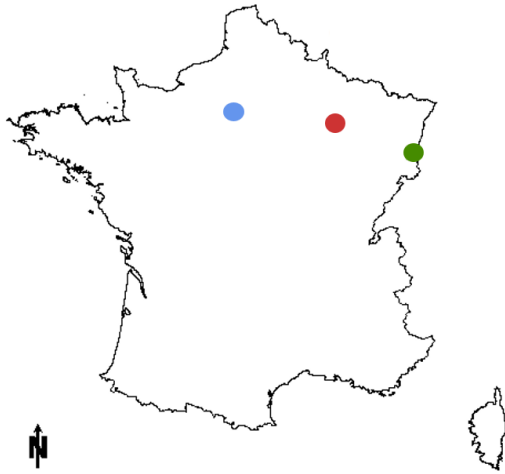
1^{ers} calculs de marge semi-nette à l'échelle de la rotation : **pas de différence significative**

Paramètres importants :

- Coûts de chantier des fauches de luzerne
 - Coût d'ensilage des CIVEs
 - Coût d'épandage du digestat
 - Prix de l'azote minéral
- A évaluer à l'échelle du territoire
- Ajout d'un module d'optimisation de la fertilisation

Perspectives

Contrastes avec les 2 autres territoires et les autres niveaux de déploiement de la rotation

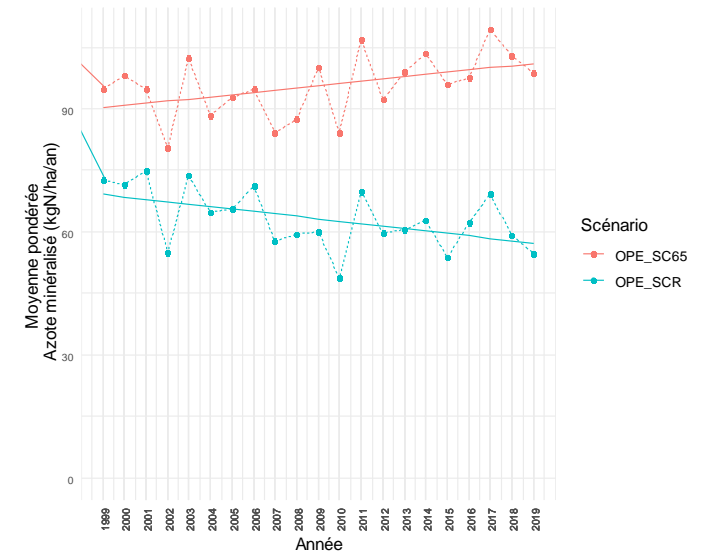


Solutions pour l'augmentation de la luzerne en méthanisation :

- Economique : utilisation luzerne fraîche
- Techniques : coupe plus jeune, recirculation de la phase liquide, ajout d'eau et/ou de fluidifiants et/ou de conservateurs pour l'ensilage



Optimisation de la fertilisation en fonction de la dynamique du territoire (taux de MO)



Take Home Messages

- Utilisation de légumineuses en méthanisation techniquement possible dans certaines proportions
- Gain en autonomie azotée par remplacement des engrais de synthèse (contexte géopolitique ++)
- Balance économique favorable, à creuser
- Nombreux services écosystémiques rendus par la luzerne (couverture végétale, structuration des sols, régulation des adventices)



Analyse environnementale relative à la valorisation du CO₂ issu d'installations de méthanisation

INRAE Transfert, ADEME

ISSALY Dorian, BROCKMANN Doris, EGLIN Thomas, THUAL Julien, BOUVIER Solène, SAUZE Marie



Contexte de l'évaluation



Fin 2025, **720 unités de méthanisation** agricole injectent réseau, + 65 unités par rapport à 2024 (SDES, 2026)
Une **trentaine d'unités capturent leur CO₂**, une dizaine de projets sont en cours de développement (ATEE - Club biogaz, 2026)



Dans un contexte où la **méthanisation agricole existe** et **poursuit son développement** en France, est-il **cohérent** de soutenir des **projets de valorisation du CO₂** de méthanisation **du point de vue environnemental** ?

Évaluation projets de valorisation du CO₂



Quels impacts ?
À quelles bornes (périmètre) ?
Quels types de projets ?

- › Sélection de 10 filières
- › Caractérisation des impacts (scénario de valorisation méthanisation)
- › Périmètre : système de méthanisation agricole restreint ; CO₂ = déchet



Pertinence environnementale



Par rapport à quelle référence ?
Comment réaliser la comparaison ?

- › Caractérisation des impacts du CO₂ marchand (scénario de référence)
- › Évaluation différentielle : bilan net pour comparaison des scénarios
- › Arbitrage (incertitudes)



Soutien au développement de la filière



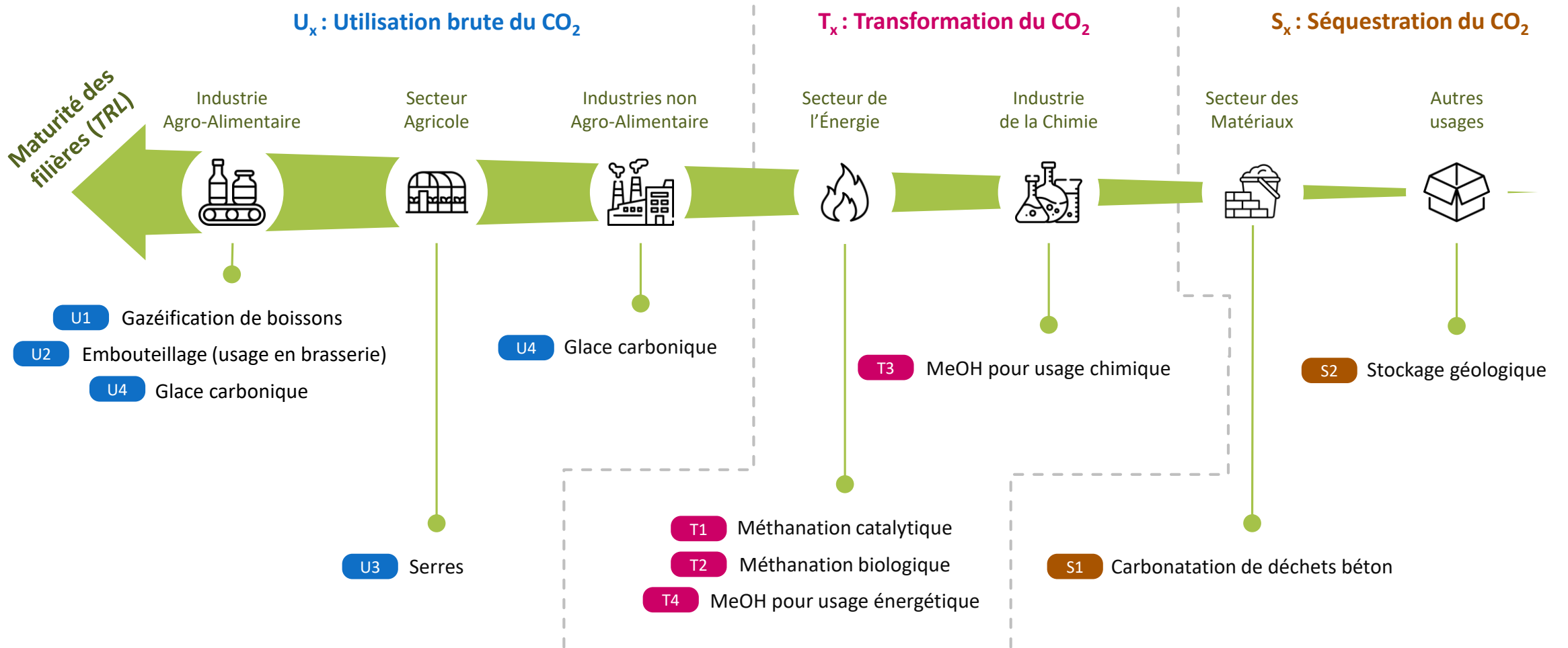
Comment faire l'évaluation de son projet ?
À quels paramètres faut-il être attentif ?

- › Analyses de sensibilité locale et globale
- › Création d'un guide d'évaluation environnementale des projets de valorisation du CO₂ de méthanisation



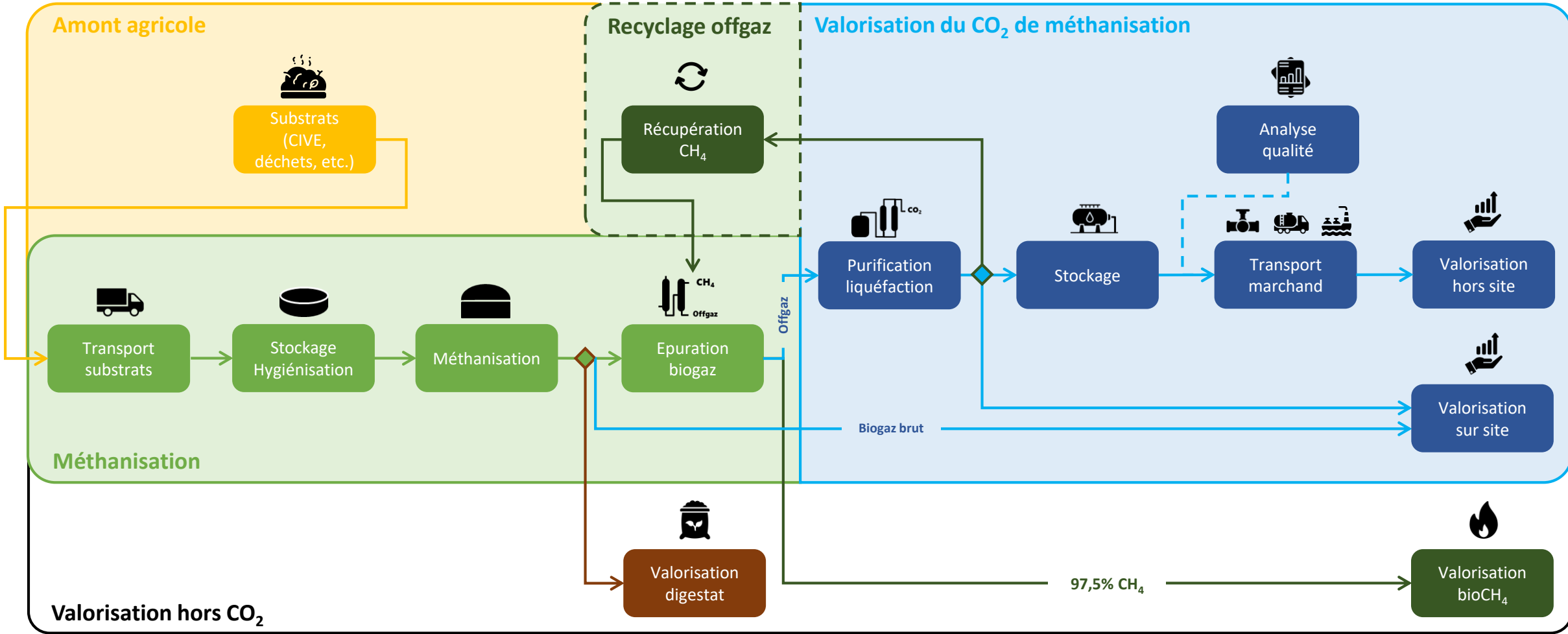


Un panorama de filières étudiées





Périmètre analysé



◇ Allocation des impacts du processus

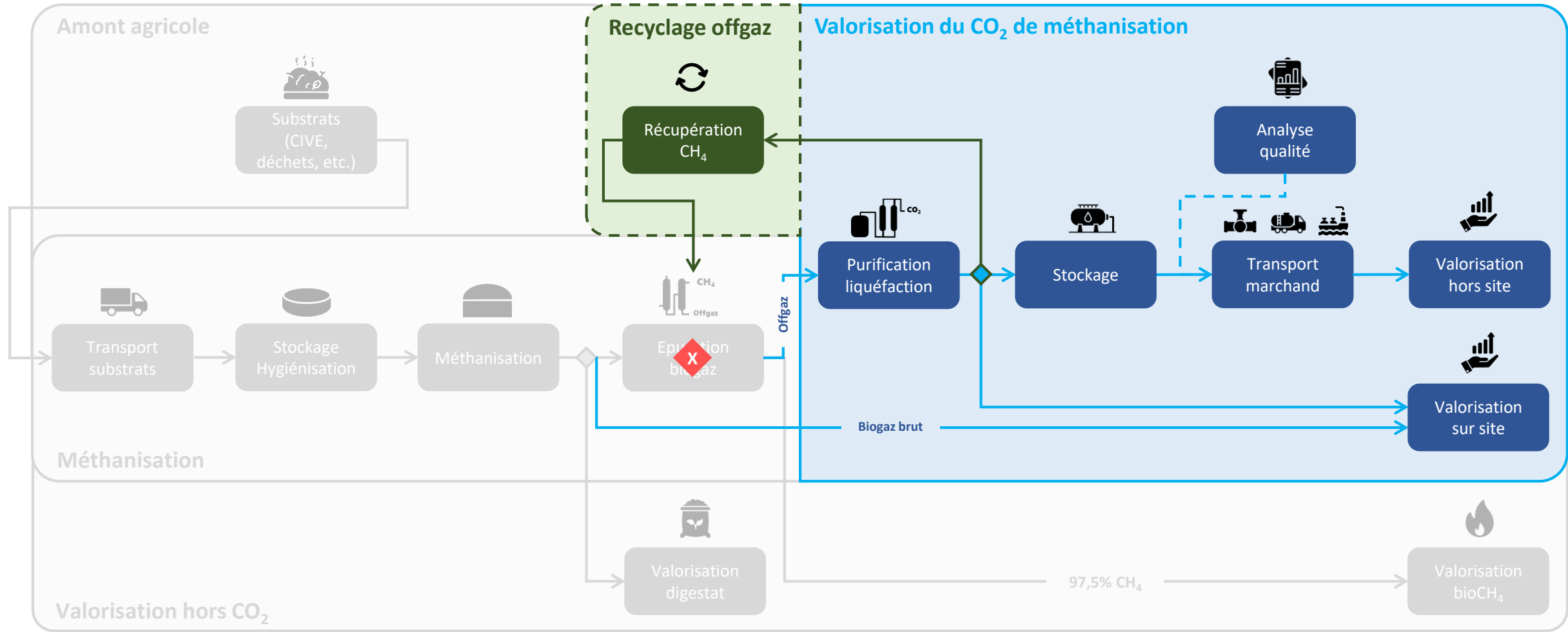




Périmètre analysé



Option retenue : **CO₂ = déchet**
Pas d'allocation des impacts de l'épuration du biogaz sur CO₂ (100% imputés au biométhane)





Approche comparative : définition du CO₂ marchand

Par rapport à quelle référence ?

Critère de représentativité



Géographique

OU



Sectorielle

Critère de pondération



Volumes

OU



Part de marché



Volume du marché FR (estimation) : 1,1 Mt CO₂/an

dont 0,3 Mt autoconsommées pour la production d'urée



368 kt



216 kt



184 kt



40-50 kt

Composition du mix de référence

50,6 % biogénique / 49,4 % fossile

Comment réaliser la comparaison ?

Résultat de l'étude exprimé de manière différentielle (bilan net)

Impact net = Scénario de valorisation – scénario de référence



Arbitrage sur les résultats

Analyse de discernabilité à partir des calculs d'incertitude type Monte Carlo (1000 tirages)

Règle d'arbitrage sur le résultat des tirages (intervalle de confiance):

- › Si $\geq 95\%$ tirages en faveur du scénario A, alors scénario A plus pertinent que scénario B
- › Si $\leq 5\%$ des tirages, scénario B plus pertinent
- › Tirages entre 5% & 95%, pas de conclusion possible



Résumé de l'évaluation



CO₂ liquéfié



Emissions atmosphériques



Références substituées

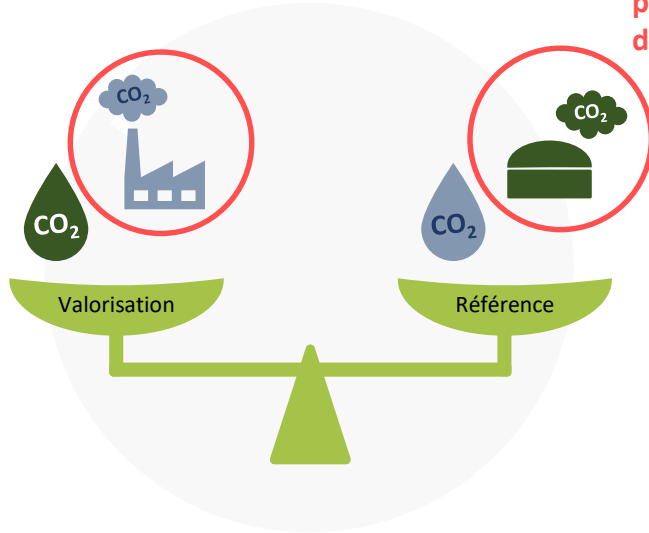


Composante du périmètre de méthanisation

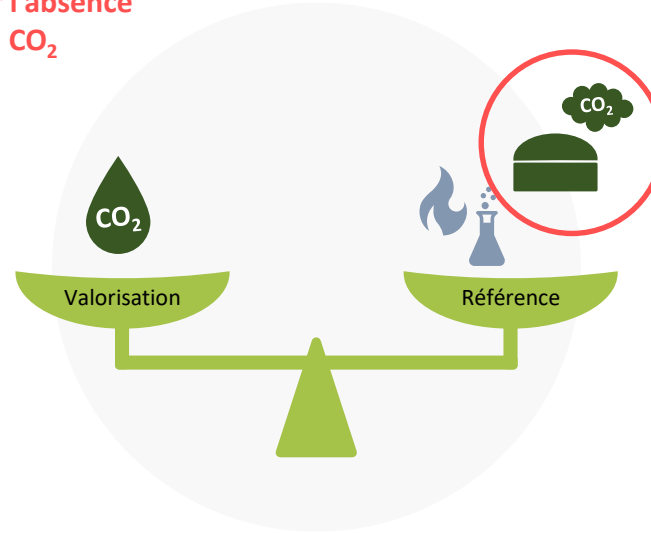


Composante du périmètre de référence

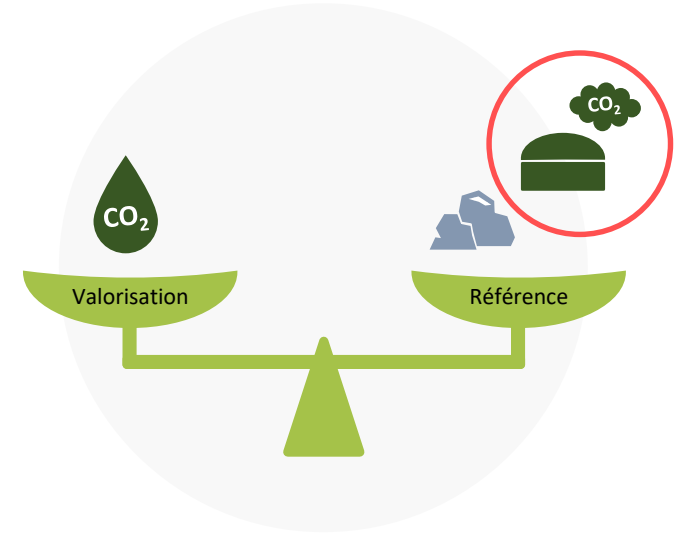
Extension du périmètre, pour marquer l'absence de capture du CO₂



Filières d'utilisation brute du CO₂



Filières de transformation du CO₂



Filières de séquestration du CO₂

Unité fonctionnelle (UF)

Valoriser ou séquestrer 1 tonne marchande de CO₂ provenant de l'épuration de biogaz d'installations de méthanisation agricole en 2025 en France



Environmental Footprint 3.1 (modifiée)

16 catégories d'impacts

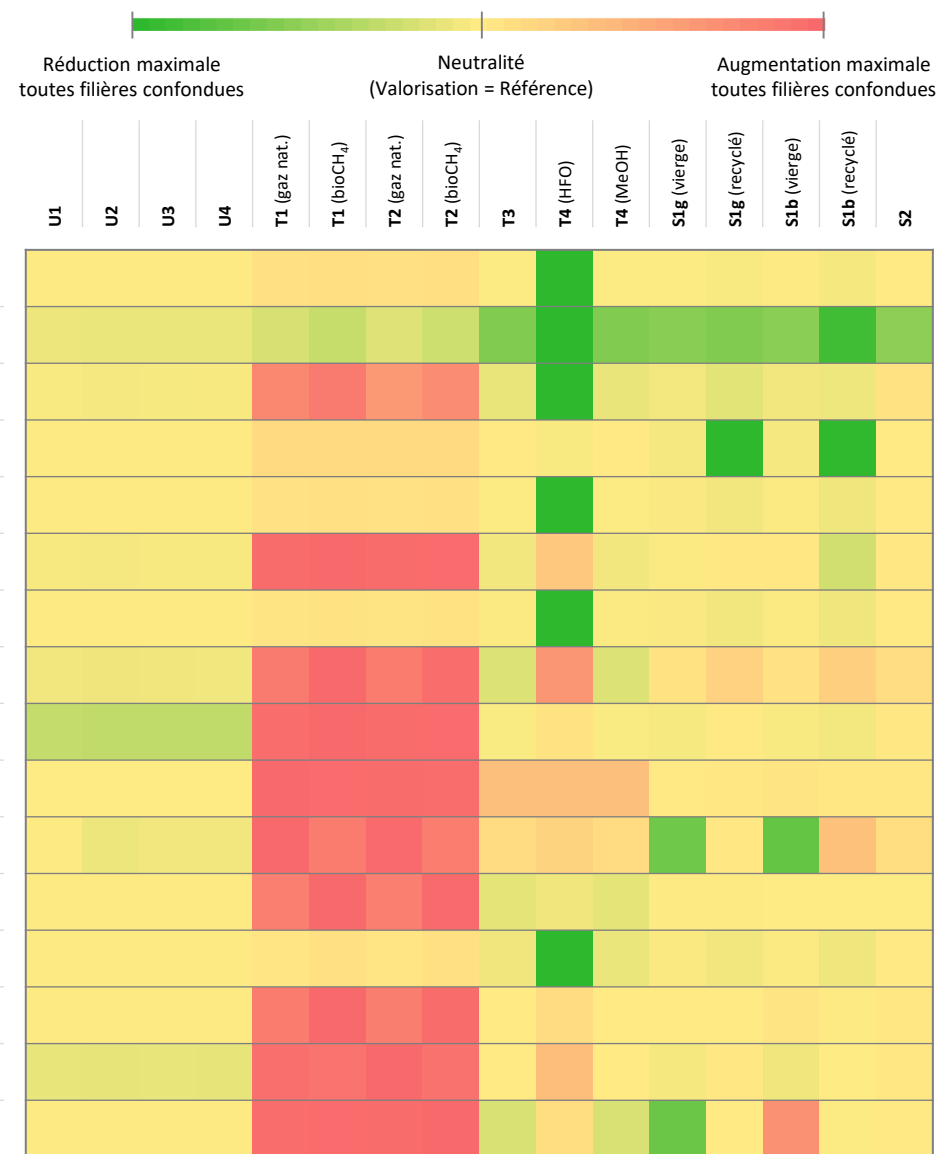
Changement climatique, épuisement des ressources, santé humaine, qualité des écosystèmes



Résultat de l'évaluation

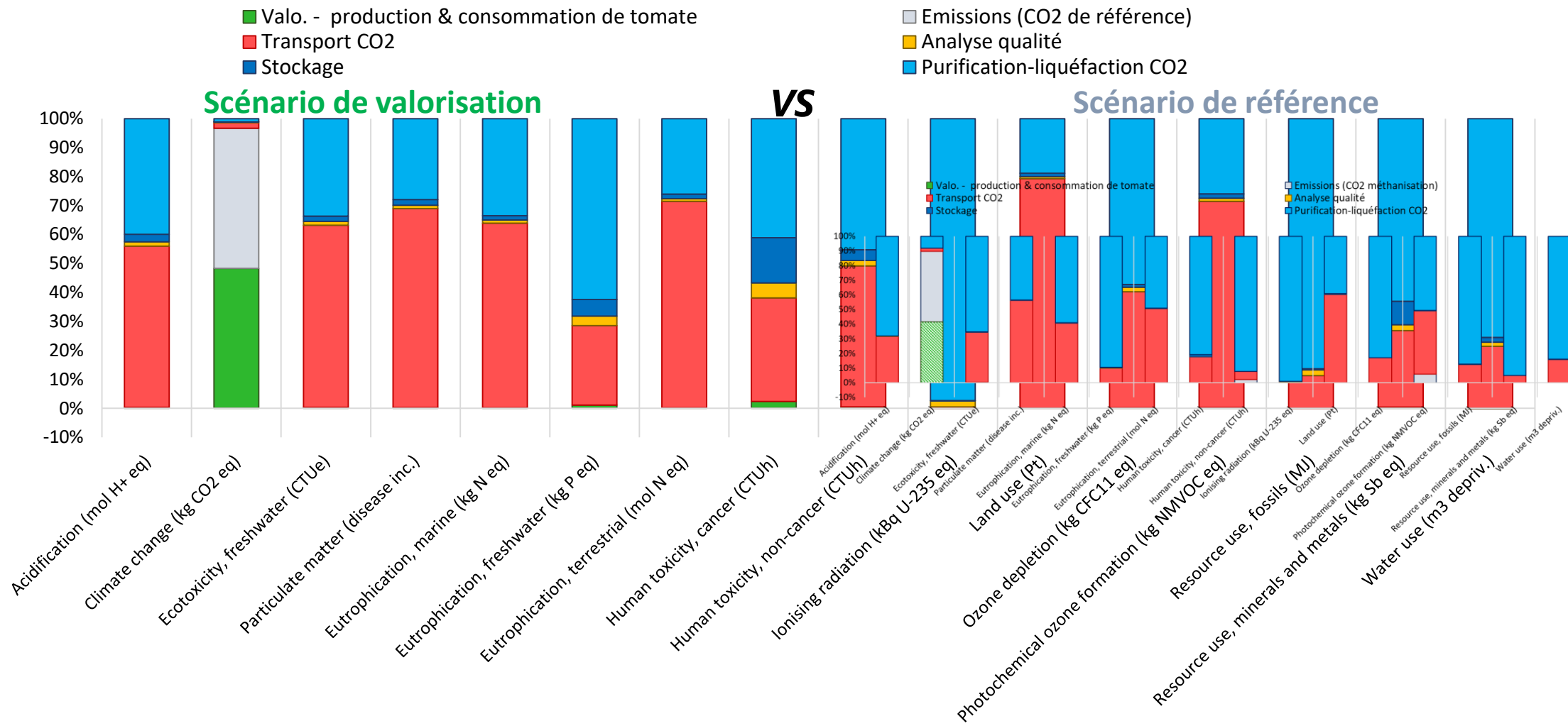
	U1	U2	U3	U4	T1 (gaz nat.)	T1 (bioCH ₄)	T2 (gaz nat.)	T2 (bioCH ₄)	T3	T4 (HFO)	T4 (MeOH)	S1g (vierge)	S1g (recyclé)	S1b (vierge)	S1b (recyclé)	S2
Acidification (mol H+ eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Climate change (kg CO2 eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ecotoxicity, freshwater (CTUe)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Particulate matter (disease inc.)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Eutrophication, marine (kg N eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Eutrophication, freshwater (kg P eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Eutrophication, terrestrial (mol N eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Human toxicity, cancer (CTUh)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Human toxicity, non-cancer (CTUh)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ionising radiation (kBq U-235 eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Land use (Pt)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ozone depletion (kg CFC11 eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Photochemical ozone formation (kg NMVOC eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Resource use, fossils (MJ)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Resource use, minerals and metals (kg Sb eq)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Water use (m3 depriv.)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● Favorable au scénario de valorisation ● Conclusion indéçise ● Favorable au scénario de référence



Construction du résultat : caractérisation

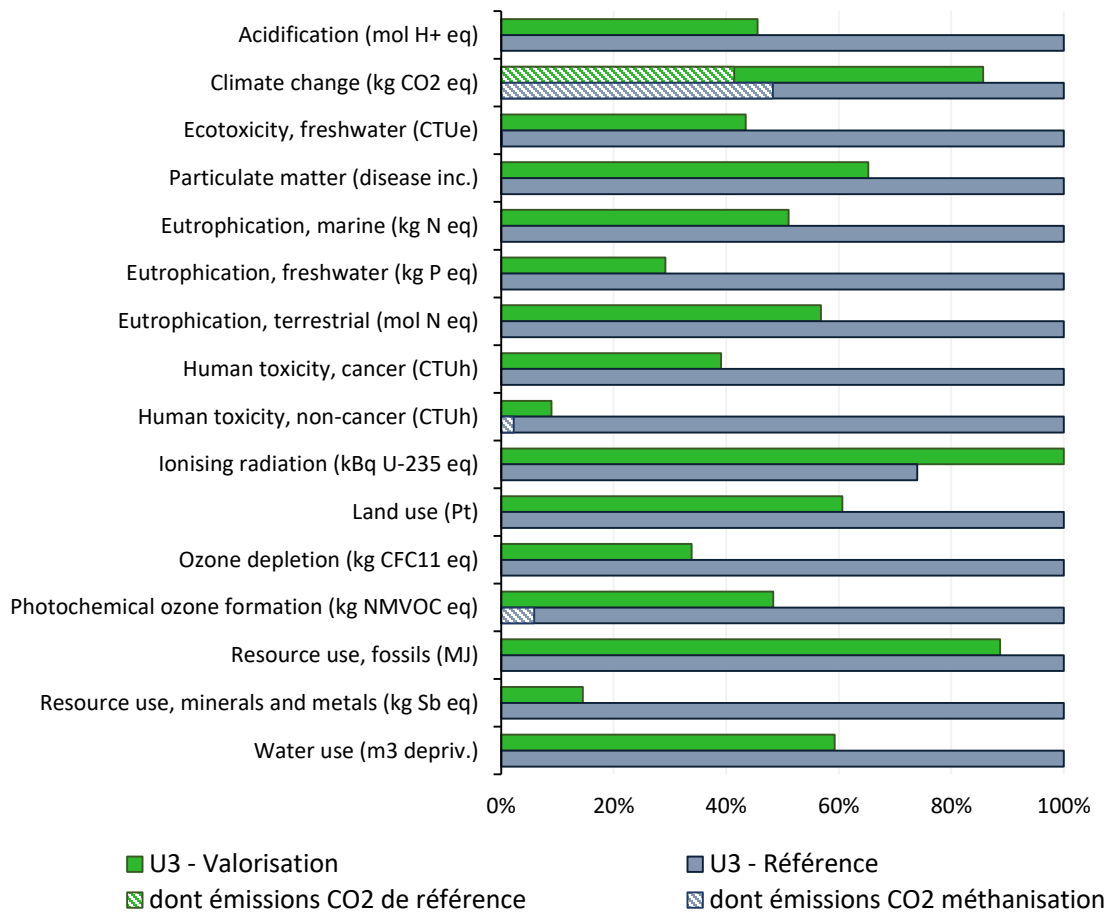
Exemple : U₃ - Serres



Construction du résultat : versus

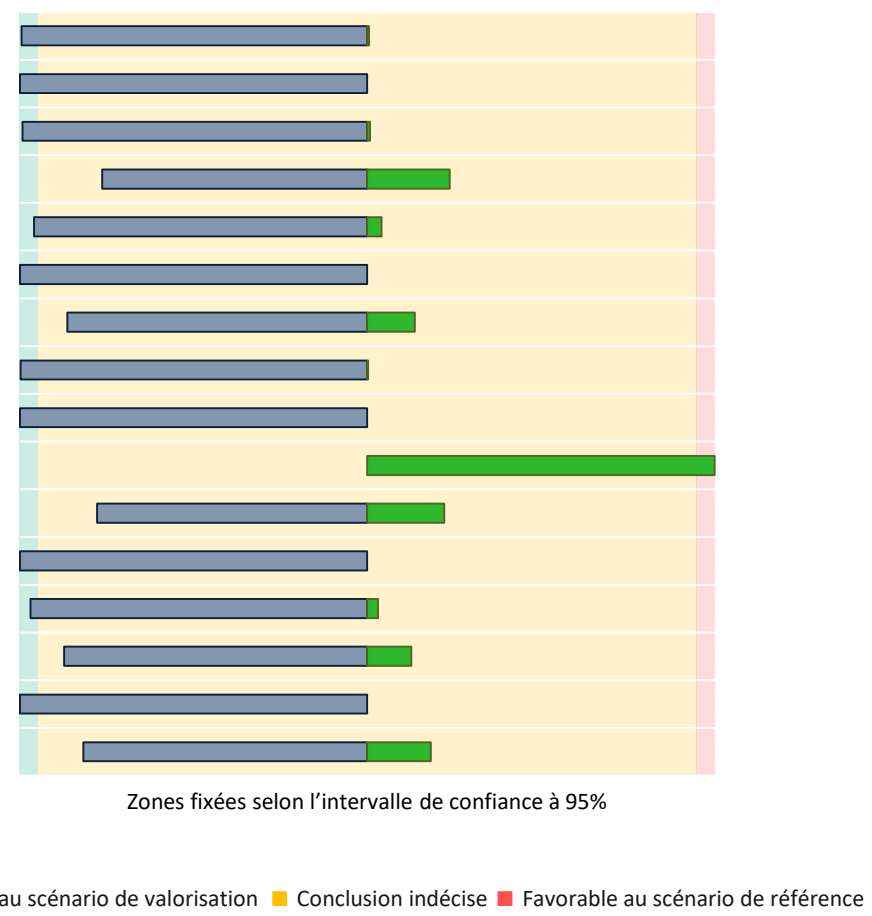
Exemple : U₃ - Serres

Résultat de la comparaison brute

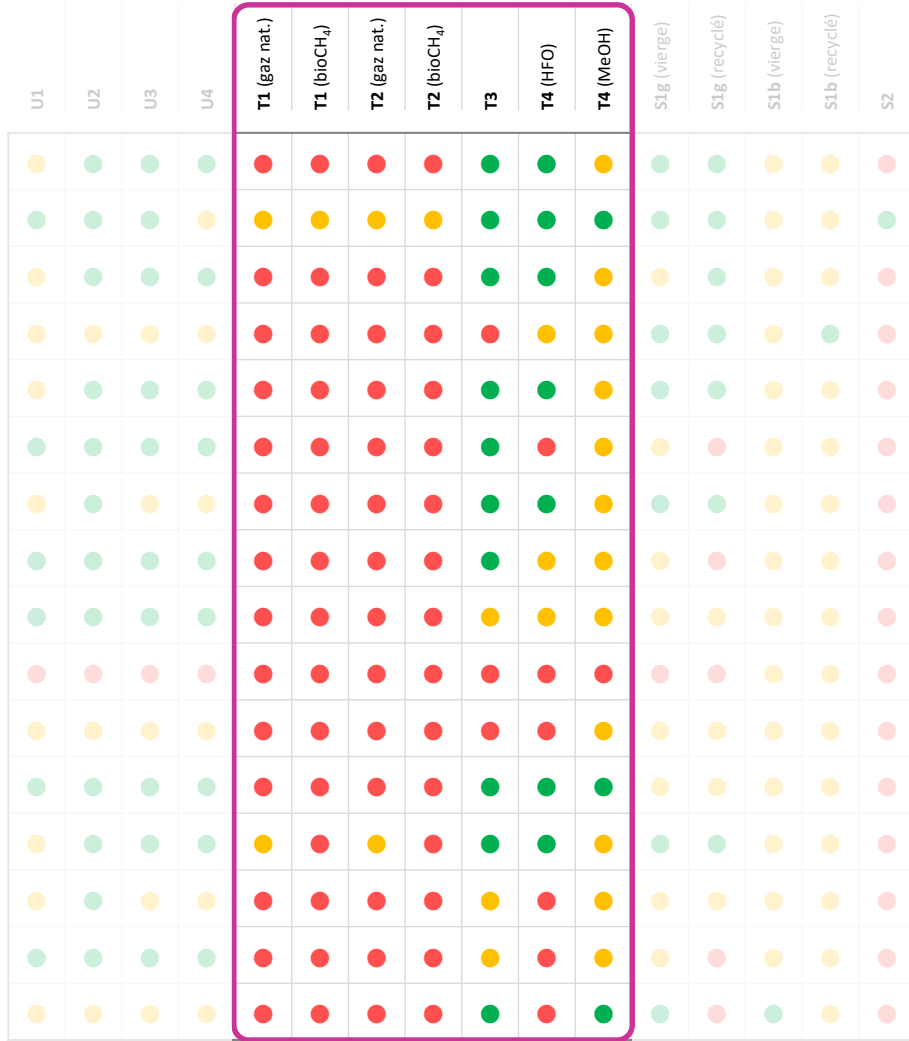


1000 tirages
 Incertitude appliquée

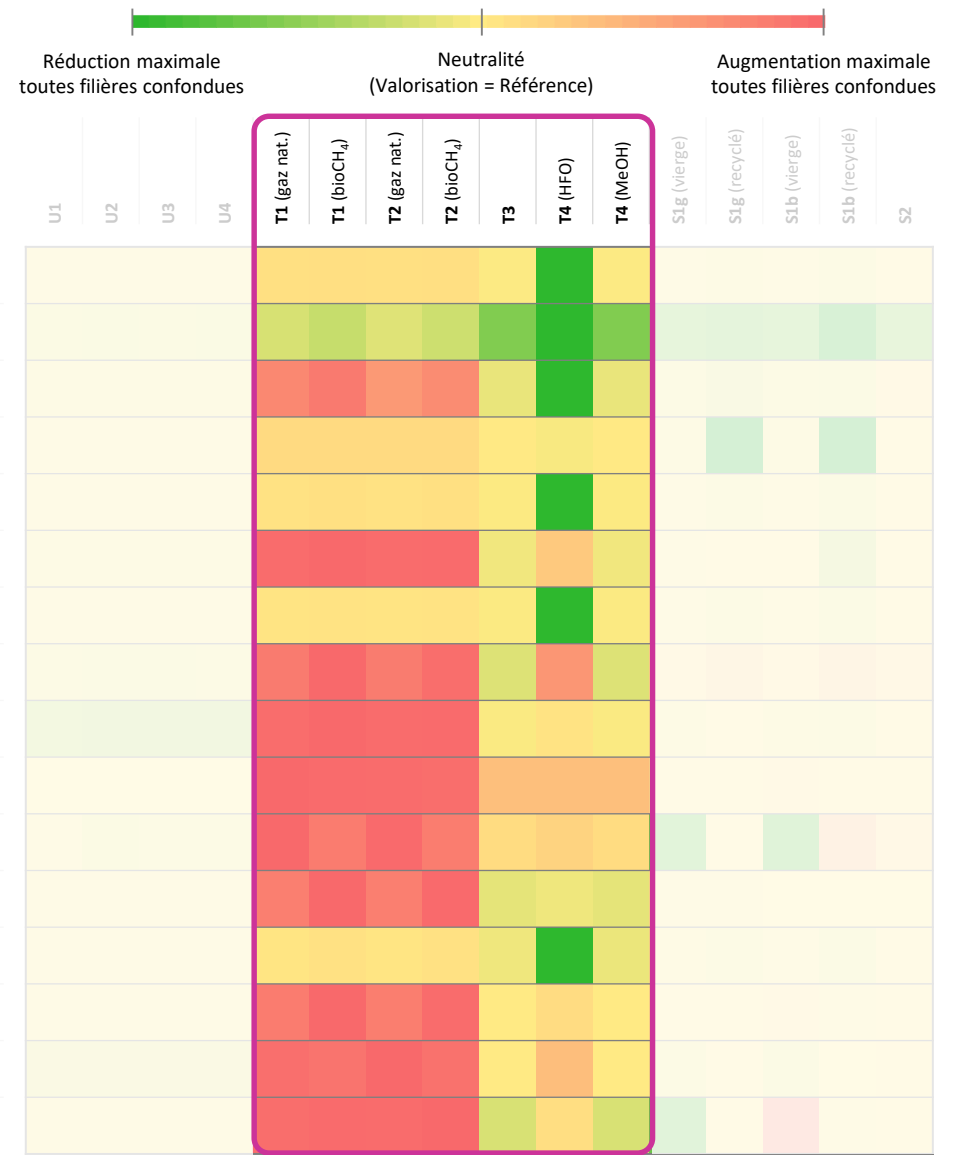
Comparaison consolidée



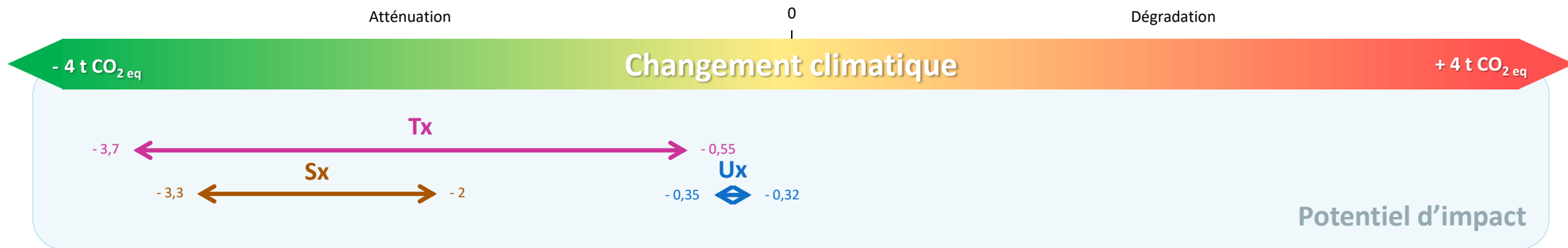
Résultat de l'évaluation



● Favorable au scénario de valorisation ● Conclusion indécis ● Favorable au scénario de référence

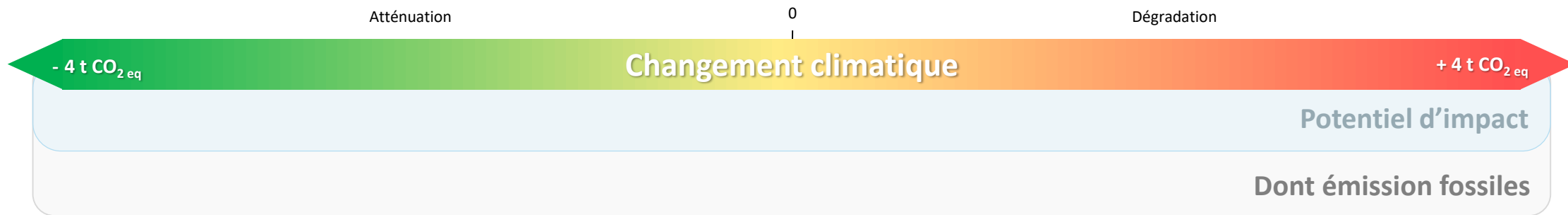


Focus changement climatique



Conclusions générales

Etude vérifiée
(revue critique)



Utilisation du CO₂

Transformation du CO₂

Séquestration du CO₂



Transfert(s) d'impact

Systematique : radiations ionisantes (capture)
Autres catégories à la marge (transport)

Systematiques : radiations ionisantes, particules fines, occupation des terres, ressources fossiles, minérales-métalliques

Pour toutes les catégories (séquestration géologique), dépendant des performances techniques (carbonatation)



Levier(s) d'optimisation

Transport

Design des projets de valorisation

Bonne gestion des infrastructures et optimisation du transport



Enseignement(s)

Valorisation du CO₂ de méthanisation similaire à la valorisation actuelle

Besoin d'évaluation au cas par cas avec une approche adaptée (ex : prospective)

Besoin d'évaluation au cas par cas avec une approche adaptée (ex : territoriale)



Merci pour votre attention

Des questions ?

Contenu de l'étude à retrouver prochainement sur la librairie ADEME

la Librairie
librairie.ademe.fr



Annexe 1 – Source des données

	Gazéification de boissons	Embouteillage pour usage en brasserie	Serres	Glace carbonique	Méthanation catalytique	Méthanation biologique	Méthanol (usage chimique)	Méthanol (usage énergétique)	Carbonatation de déchets bétons	Stockage géologique
Code filière	U1	U2	U3	U4	T1	T2	T3	T4	S1	S2
Scénario de valorisation	Capture CO ₂ méthanisation									
	Jeux de données d'industriels (3 unités de capture CO ₂)									
	Transport marchand CO ₂				Itinéraires moyens		Hypothèse (valorisation sur site → pas de transport)			Itinéraires types
Valorisation	Hypothèses		Agribalyse, hypothèse	Hypothèses		Bibliographie & publications scientifiques		Données de projets industriels, bibliographie & publications scientifiques		
Scénario de référence	Capture CO ₂ marchand									
	Bibliographie & publications scientifiques, hypothèses, Ecoinvent									
	Transport marchand CO ₂				Hypothèses (itinéraire type)		N.A. (pas de recours à un approvisionnement en CO ₂ marchand)			
Valorisation	Hypothèses		Agribalyse, hypothèse	Hypothèses		Ecoinvent (produit substitués)			Hypothèses	

Annexe 2 – Qualité des données

Matrice Pedigree (*Weidema & Wesnaes, 1996*)

Score de qualité	1	2	3	4	5
Fiabilité	Données vérifiées sur la base de mesures	Données vérifiées basées en partie sur des hypothèses ou données non vérifiées basées sur des mesures	Données non vérifiées et basées en partie sur des hypothèses	Estimation qualifiée (par exemple par un expert industriel)	Estimation non qualifiée
Exhaustivité	Des données représentatives provenant d'un échantillon suffisant de sites sur une période adéquate pour compenser les fluctuations normales	Données représentatives provenant d'un nombre plus restreint de sites mais pour des périodes adéquates	Données représentatives provenant d'un nombre adéquat de sites mais sur des périodes plus courtes	Données représentatives mais provenant d'un nombre plus restreint de sites et de périodes plus courtes ou données incomplètes provenant d'un nombre adéquat de sites et de périodes	Représentativité des données inconnues ou incomplètes provenant d'un plus petit nombre de sites et/ou de périodes plus courtes
Repr. Temporelle	Moins de 3 ans de différence avec l'année d'études	Moins de 6 ans de différence avec l'année d'études	Moins de 10 ans de différence avec l'année d'études	Moins de 15 ans de différence avec l'année d'études	Âge des données inconnu ou plus de 15 ans de différence
Repr. Géographique	Données provenant de la zone étudiée	Données moyennes d'une zone plus étendue mais dans laquelle la zone étudiée est incluse	Données provenant de zones ayant des conditions de production similaires	Données provenant d'une zone dont les conditions de production sont légèrement similaires	Données provenant de zones inconnues ou de zones dont les conditions de production sont très différentes
Repr. Technologique	Données spécifiques aux entreprises, procédés et matériaux à l'étude	Données provenant de procédés et de matériaux à l'étude mais provenant d'entreprises différentes	Données provenant de procédés et de matériaux à l'étude mais d'une technologie différente	Données sur des procédés ou matériaux apparentés mais de même technologie	Données sur des procédés ou matériaux apparentés mais de technologie différente

Notation moyenne par scénario

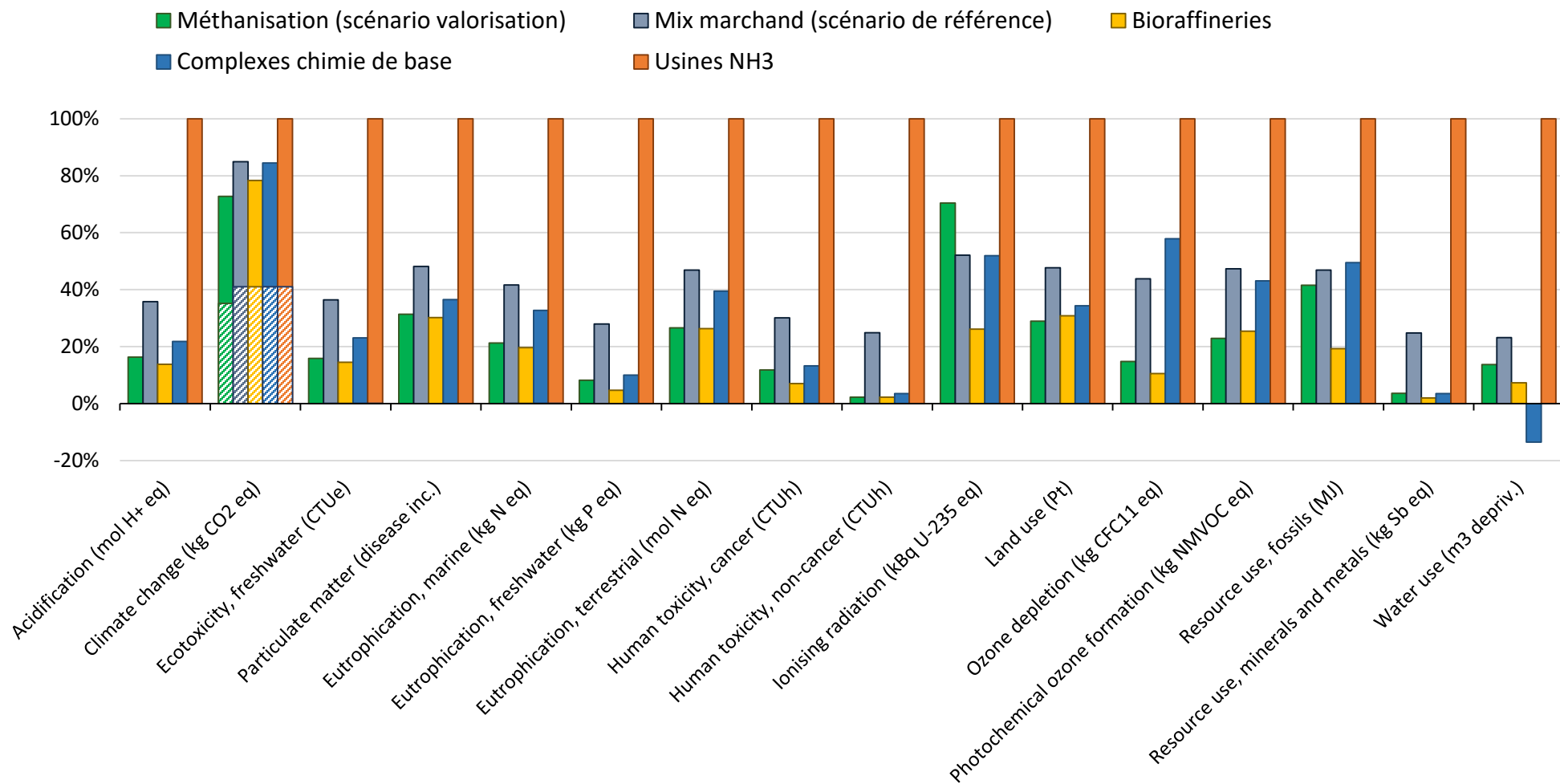
Valorisation	Référence
3,1	3,5
4,1	4,5
1,6	3,0
1,5	2,3
1,9	2,1

2,4

3,1



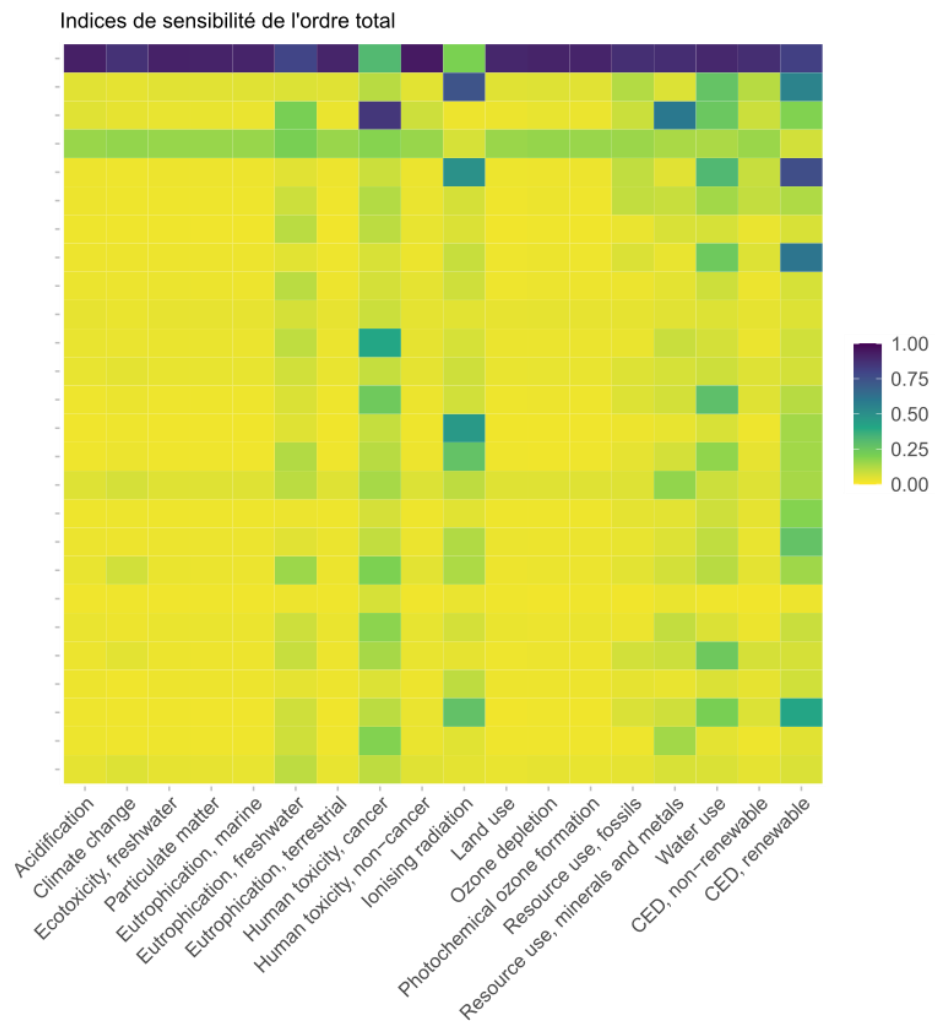
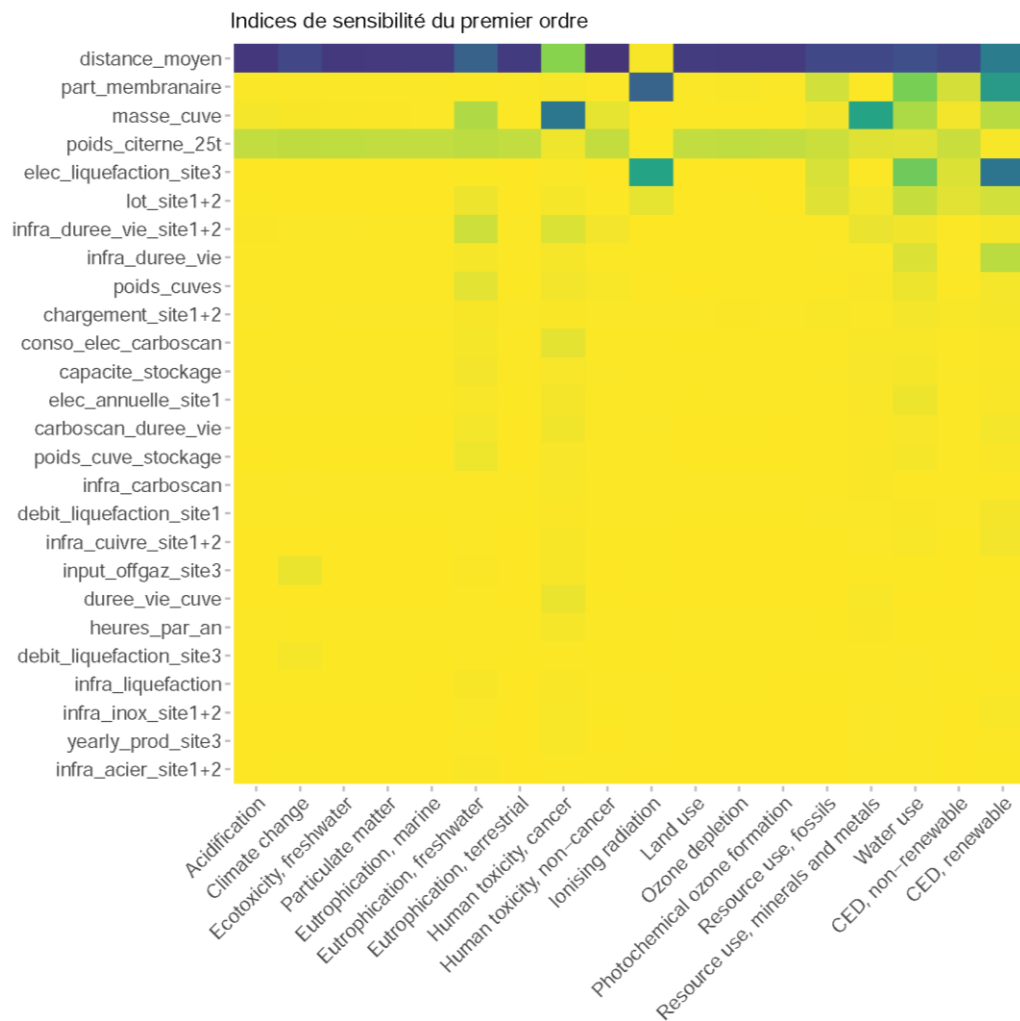
Annexe 3 – Exemple analyse de sensibilité : origine du CO₂





Annexe 4 – Analyse de sensibilité globale

Exemple : U₃ - Serres





Annexe 5 – Bilan conso. énergie primaire

(Cumulative Energy Demand)

Code filière	Filière	Consommation d'énergie primaire (CED v1.11)						Cumul (MJ/UF)
		Non-renouvelable (MJ/UF)			Renouvelable (MJ/UF)			
		Fossile	Nucléaire	Biomasse	Biomasse	Eolien, solaire, géothermique	Hydraulique	
U1	Gazéification de boissons	1 145	3 178	0,03	22	86	149	4 581
U2	Embouteillage pour usage en brasserie	688	3 169	0,02	20	85	146	4 107
U3	Serres	818	3 167	0,02	21	85	147	4 237
U4	Glace carbonique	277	1 276	0,01	8	34	59	1 654
T1	Méthanation catalytique	20 096	115 591	0,97	885	3 313	5 807	145 694
T2	Méthanation biologique	19 939	113 765	0,98	877	3 264	5 742	143 587
T3	MeOH usage chimique	8 291	39 593	0,10	281	1 061	1 784	51 009
T4	MeOH usage énergétique	10 002	39 734	0,64	336	1 085	1 874	53 031
S1	Carbonatation de déchets bétons - granulats	1 062	4 222	0,09	35	117	216	5 652
	Carbonatation de déchets bétons - béton	57 280	19 981	1,17	998	650	9 034	87 945
S2	Séquestration géologique	1 577	3 212	0,29	30	104	387	5 311

Optimisation de systèmes de culture biomasse pour une méthanisation durable

Premiers enseignements de la plateforme Trajectoire

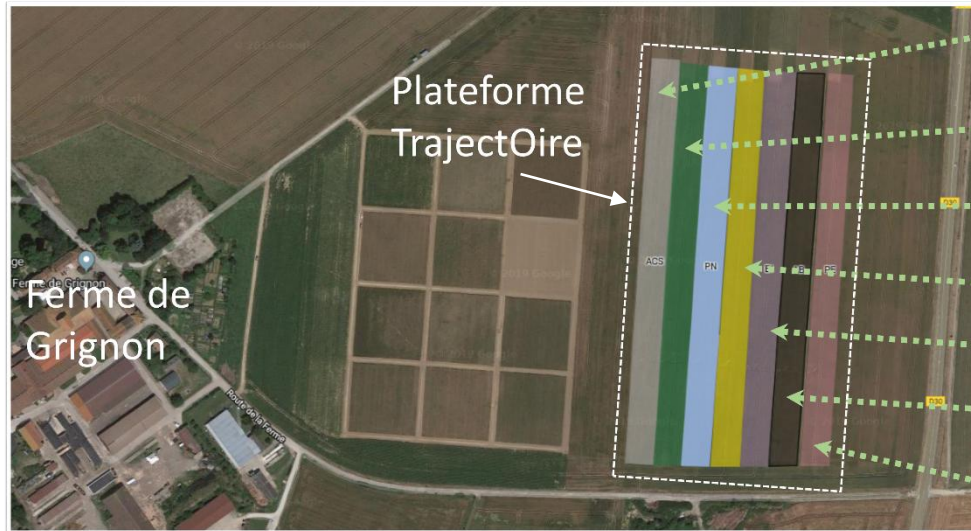
Sophie Carton, Yves Python, Tanguy Carissan
AgroParisTech
Ferme expérimentale de Grignon
sophie.carton@agroparistech.fr



La plateforme Trajectoire



Une parcelle homogène de la ferme d'AgroParisTech à Grignon, divisée en sept systèmes de culture en bandes de plus d'1 ha chacune



- Agriculture de conservation des sols (ACS)
- Bas carbone (GES-)
- Performance nourricière (PN+)
- Référence (REF) / Méthanisation orientation végétale (MOV)
- Bas intrants (BI)
- Agriculture biologique (AB)
- Interactions avec l'élevage (PE) / Méthanisation orientation animale (MOA)

Caractéristiques de la parcelle

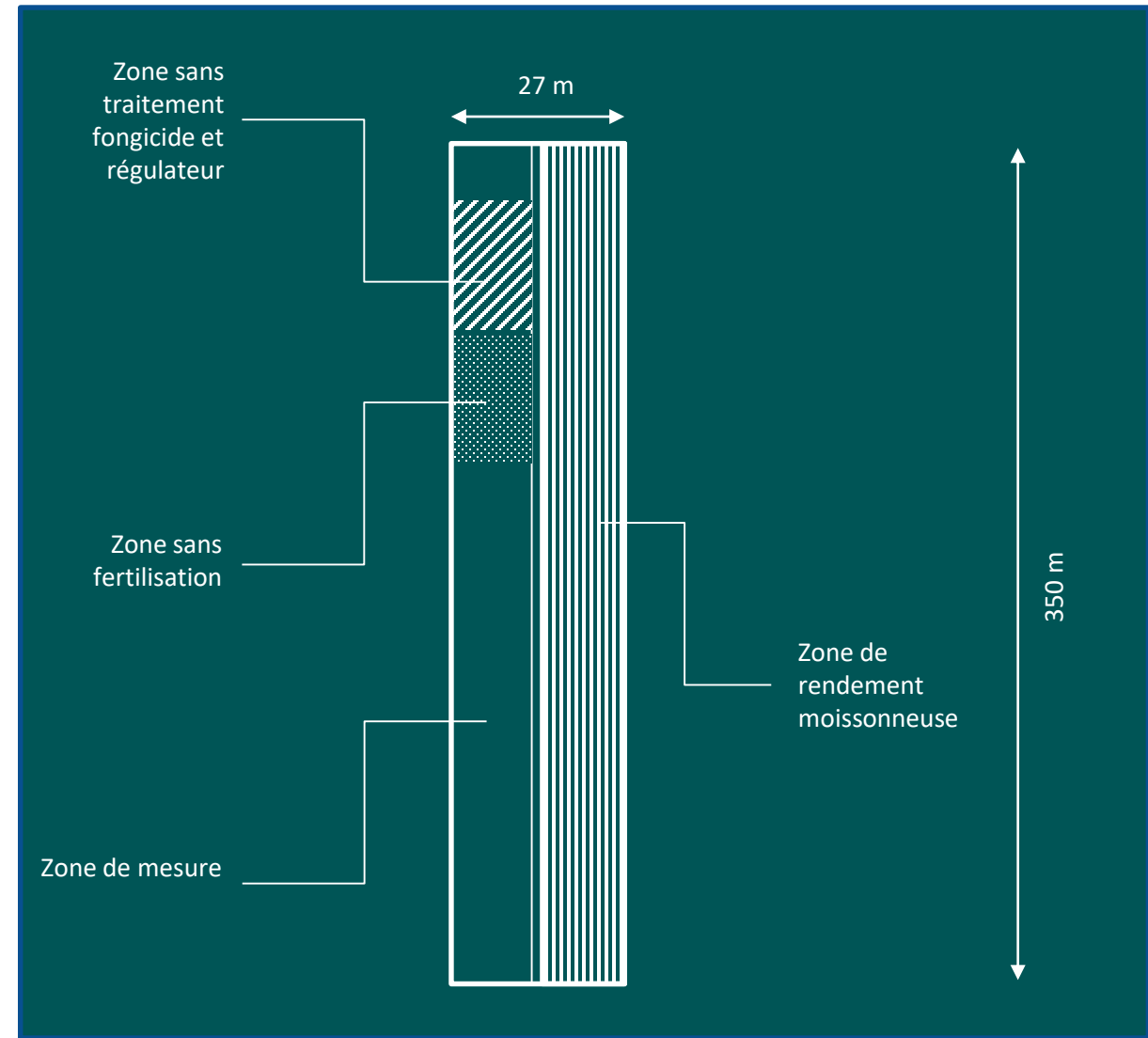
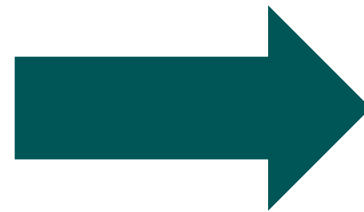
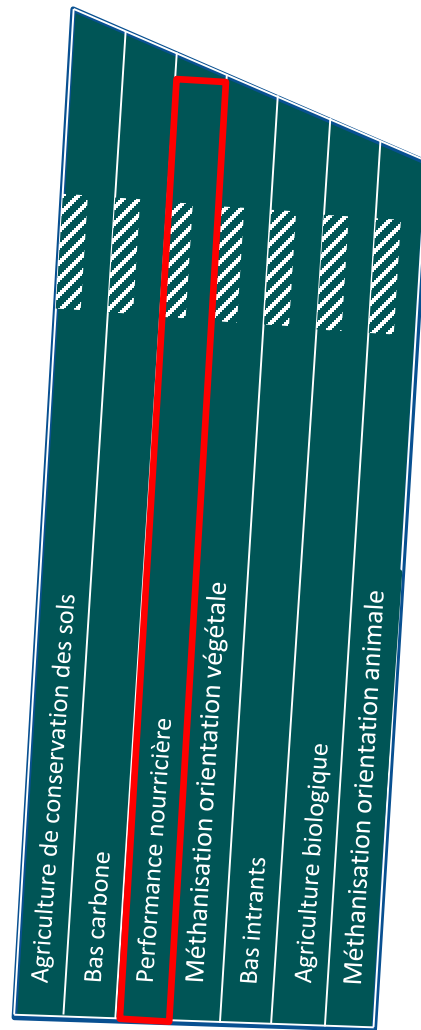
- Limons profonds
- Précédent maïs - parcelle propre
- Conduite homogène depuis 2008
- Hétérogénéité Est-Ouest
- Rotation de base : blé – 2ème paille – colza ou féverole – blé – maïs
- Adaptation des rotations en fonction des nouvelles contraintes/objectifs

Analyses moyennes 2017

pH	C org	MO	P ₂ O ₅	Carbone (40 cm)	RU
7,7	1,56 %	2,6 %	0,211 g/kg	65-85 t C	200 mm



Zoom sur une bande/système de culture



Principes et objectifs généraux

OPTIMISATION ET SUBSTITUTION

Démontrer que l'optimisation de systèmes de culture apporte des bénéfices significatifs sur le plan technico-économique et environnemental

INSERTION FILIERE / TERRITOIRE

Démonstration sur des cultures typiques du territoire (hors pommes de terre et betteraves), inscrites dans une filière bien installée, dans des systèmes de culture existants

CONDITIONS AGRICULTEUR

Mise en œuvre des conditions permettant d'utiliser du matériel en « taille réelle » et d'intervenir au meilleur moment

OBJECTIVER LES PERFORMANCES

Utiliser les outils de la recherche pour mesurer les flux et évaluer les performances réelles des systèmes

DIFFUSION des
résultats et
enseignements
vers les
agriculteurs,
prescripteurs et
institutionnels

Objectiver les performances par les mesures et les calculs

- Emissions de protoxyde d'azote (N_2O) dans l'air,
- Fuites de nitrates (NO_3^-) et de matières actives dans l'eau,
- Microbiologie (biomasse microbienne totale, biomasse fongique)
- Teneurs en carbone et caractéristiques physico-chimiques du sol,
- Teneurs en azote du sol et disponibilité pour les plantes (sondes PRS)
- Reliquats entrée-sortie d'hiver,
- Teneur en azote de la biomasse,
- Rendements des cultures et composantes, coefficient apparent d'utilisation de l'azote,
- Température du sol et de l'air, hygrométrie, humidité du sol,
- Sur MOV et MOA : volatilisation ammoniacale, réserve utile du sol, tassement
- Evaluation multicritère : consommations d'énergie primaire, émissions de GES, coûts et marge, IFT ...



Les partenaires

Financeurs de la 2^{ème} rotation



PRÉFECTURE DE LA RÉGION
D'ÎLE-DE-FRANCE
DRIAAF

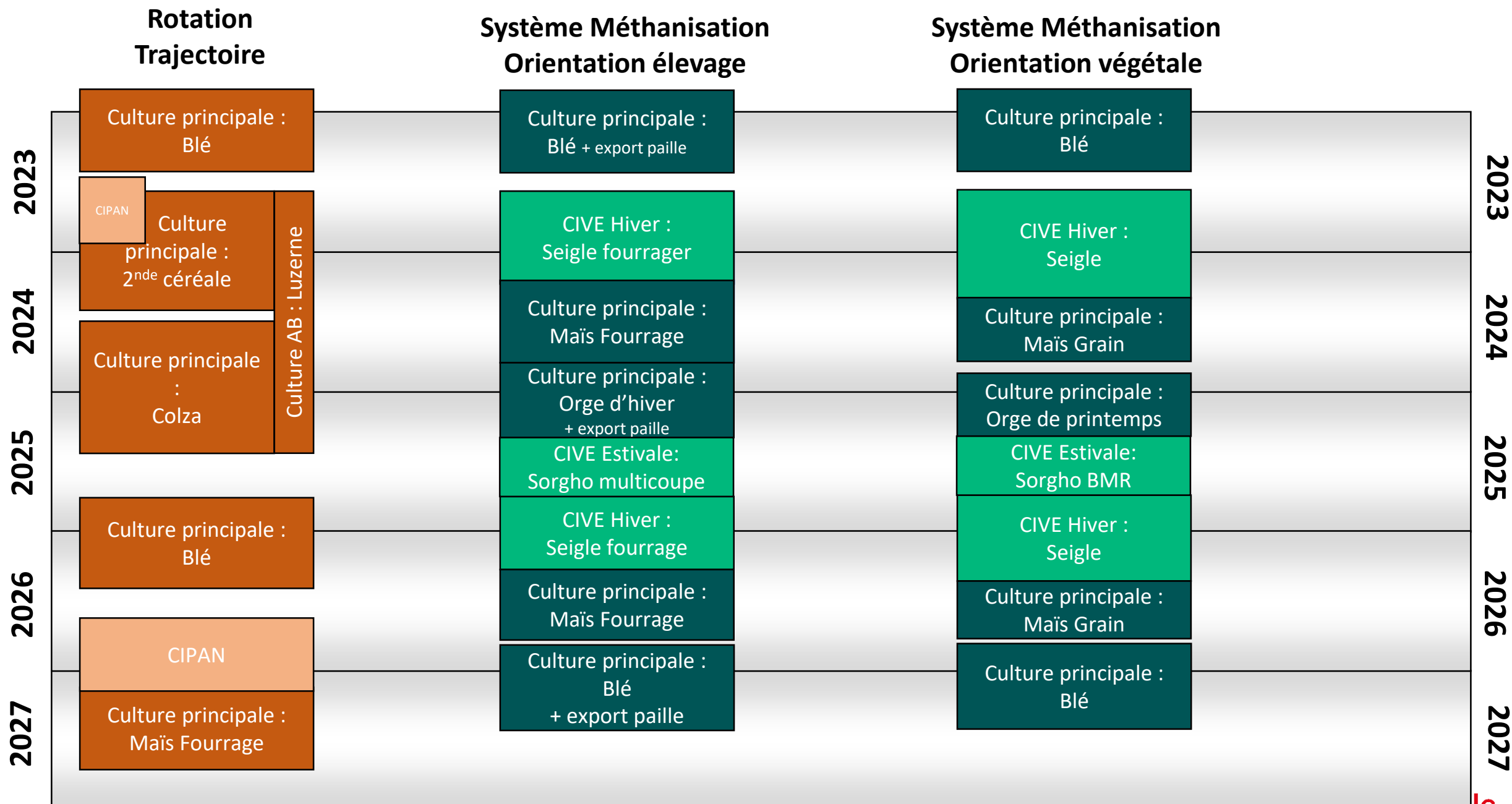


Ils nous ont soutenus sur la période 2017-2022 :



Partenaires techniques et scientifiques





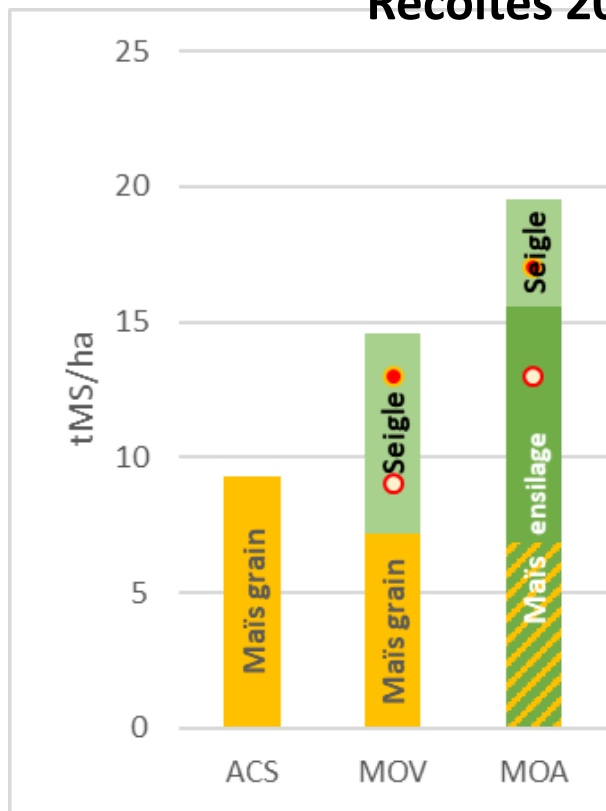
Focus sur les itinéraires techniques 2023-24 et 2024-25 et contexte météo

- Quantité N total :
 - 179 uN total sur MOV seigle + maïs grain (100% minéral car pas de digestat)
 - 187 uN total sur MOA seigle + maïs ensilage (70 m3 lisier, 66 uN minéral)
 - 258 uN total sur MOV et MOA orge + sorgho (60 m3 digestat, 0 minéral)
- Epannage digestat 2025 : pendillard et rampe à patins
- Zéro phyto sur CIVE
- Deux années 2024 et 2025 globalement pluvieuses



Résultats de productivité brute

Récoltes 2024



Maïs grain (qtx/ha à 15°H) :

- ACS : 110
- MOV : 84

Maïs ensilage (tMS/ha) :

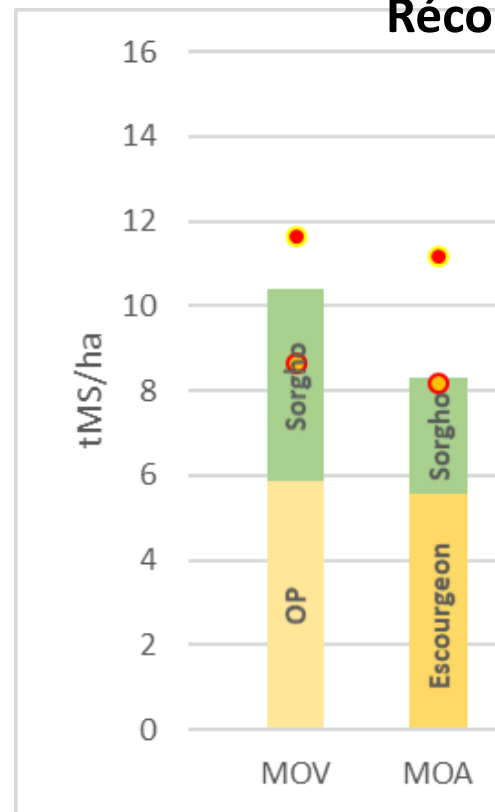
- MOA : 15,6
- Dont 81 qtx d'eq. grains

Seigles (tMS/ha) :

- MOV : 7,4
- MOA : 4,0

- Objectif de rendement
- Dont maïs

Récoltes 2025



Orges (qtx/ha à 15°H) :

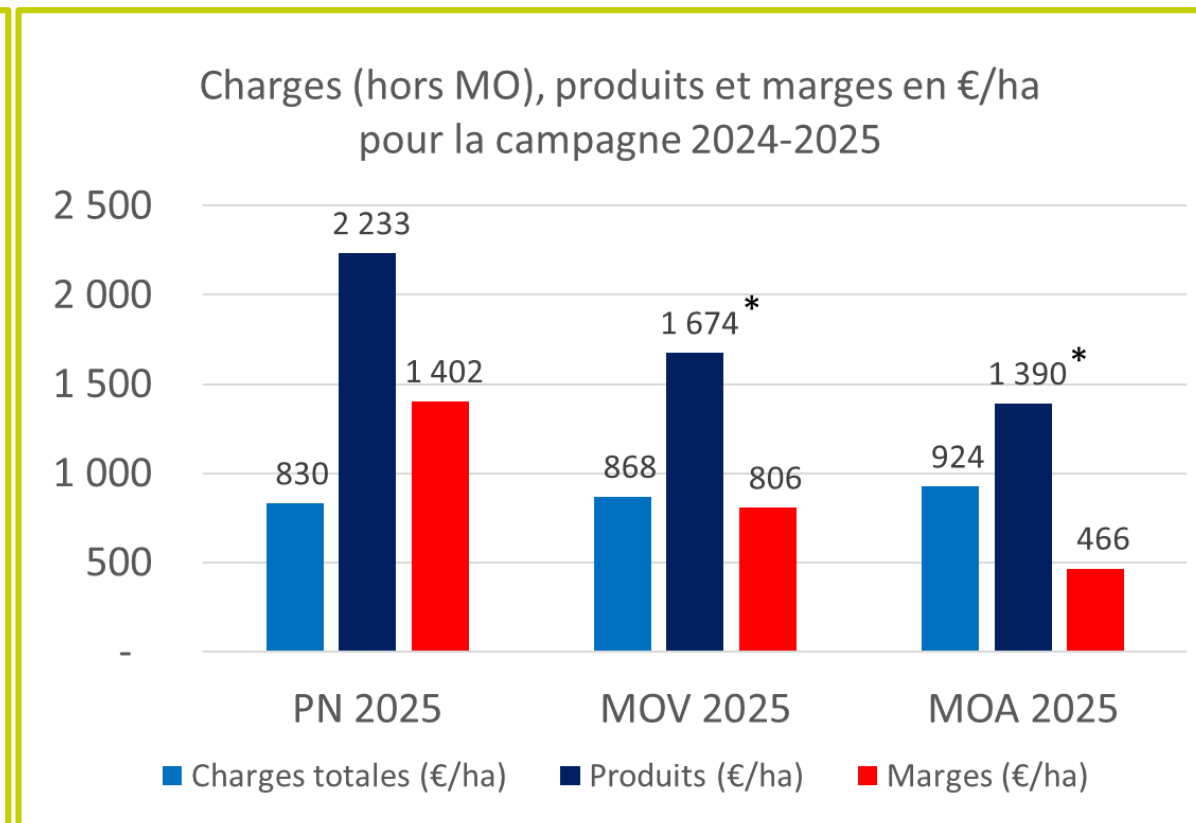
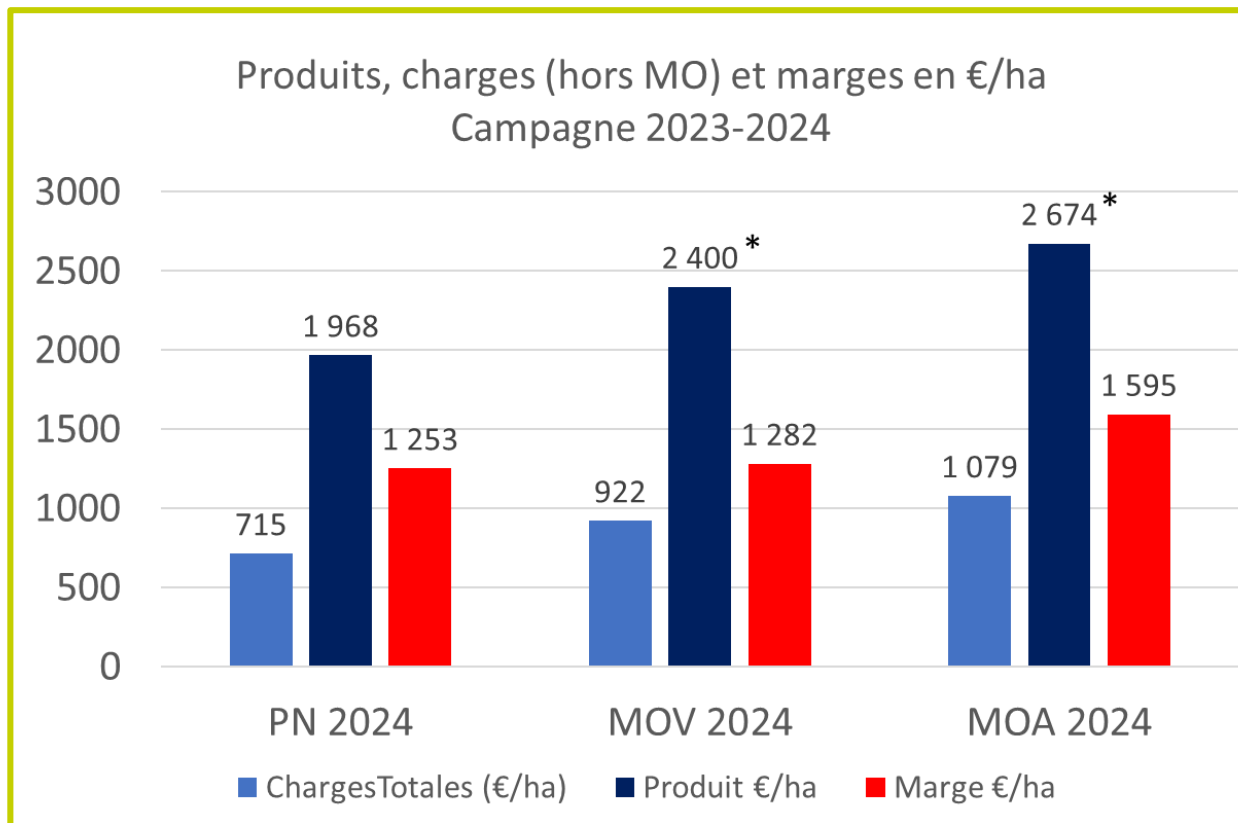
- MOV : 69
- MOA : 65

Sorgho (tMS/ha) :

- MOV : 4,5
- MOA : 2,7

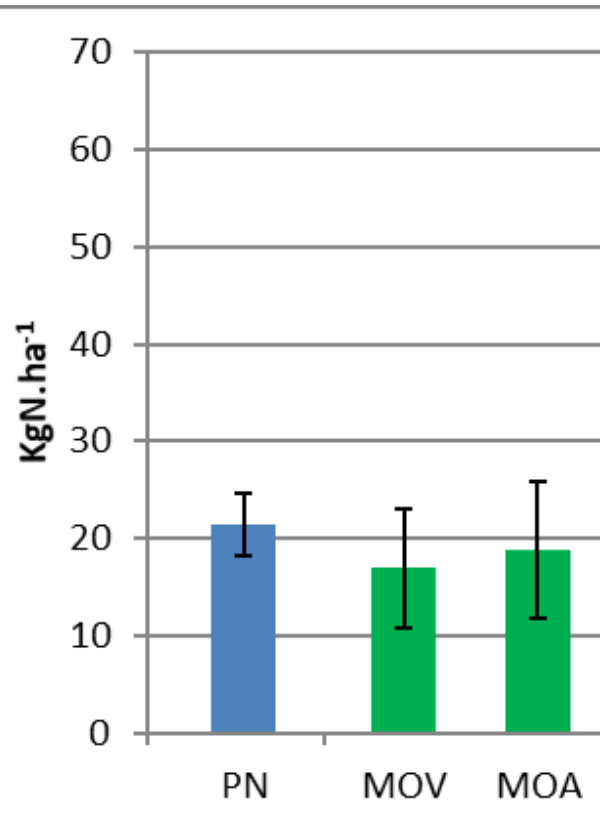
- Objectifs
- Dont orges grains

Produits, charges et marges



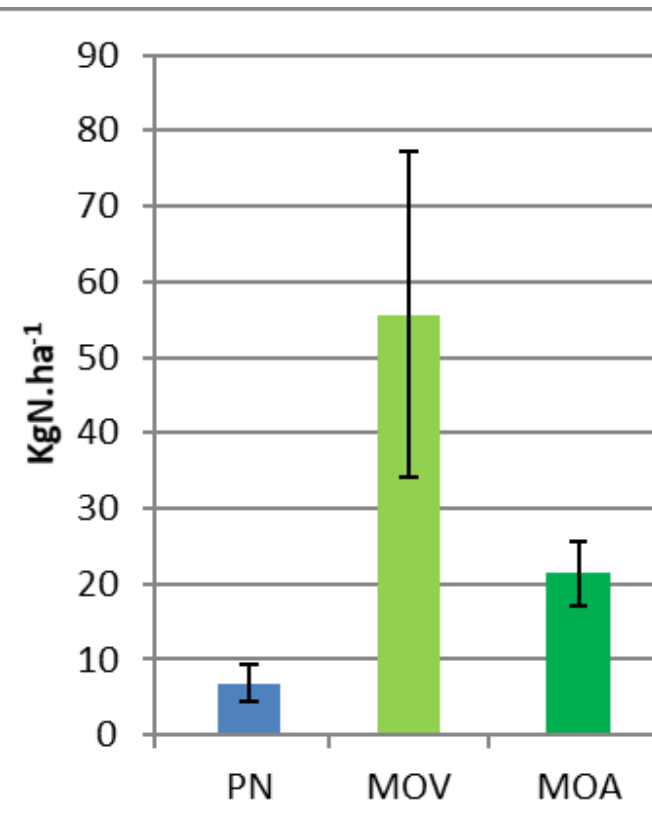
* hypothèse prix cession interne CIVE = 120 €/tMS

Cumuls d'azote lixivié (NO₃⁻)



2023-2024

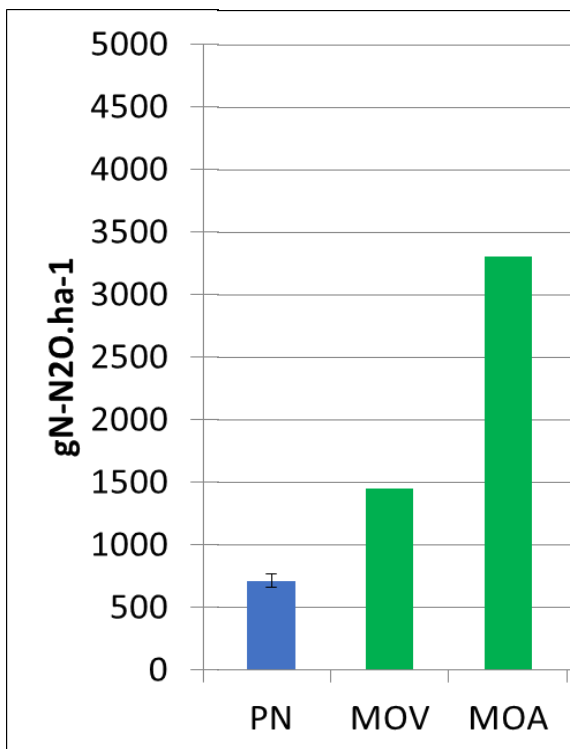
- Globalement des pertes importantes (entre 10 et 25 uN sur MOV et MOA, jusqu'à 50 uN sur une autre bande)
- Les IC avant orges (dont PN) ont probablement limité les pertes malgré leur destruction précoce
- Les seigles ont permis une meilleure maîtrise des pertes



2024-2025

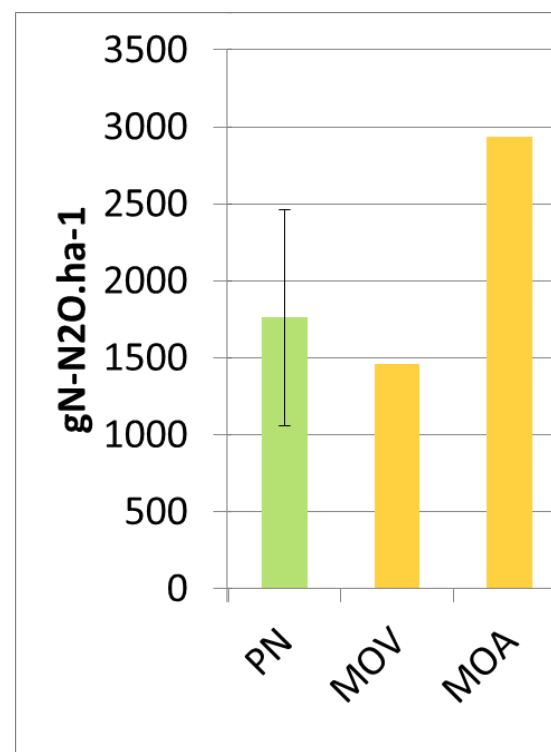
- Pertes variables entre 6 et 58 uN
- MOV est pénalisé du fait du précédent maïs grain
- MOA est intermédiaire
- Les colzas (dont PN) montrent le meilleur effet CIPAN

Emissions de protoxyde d'azote (N₂O)



2023-2024

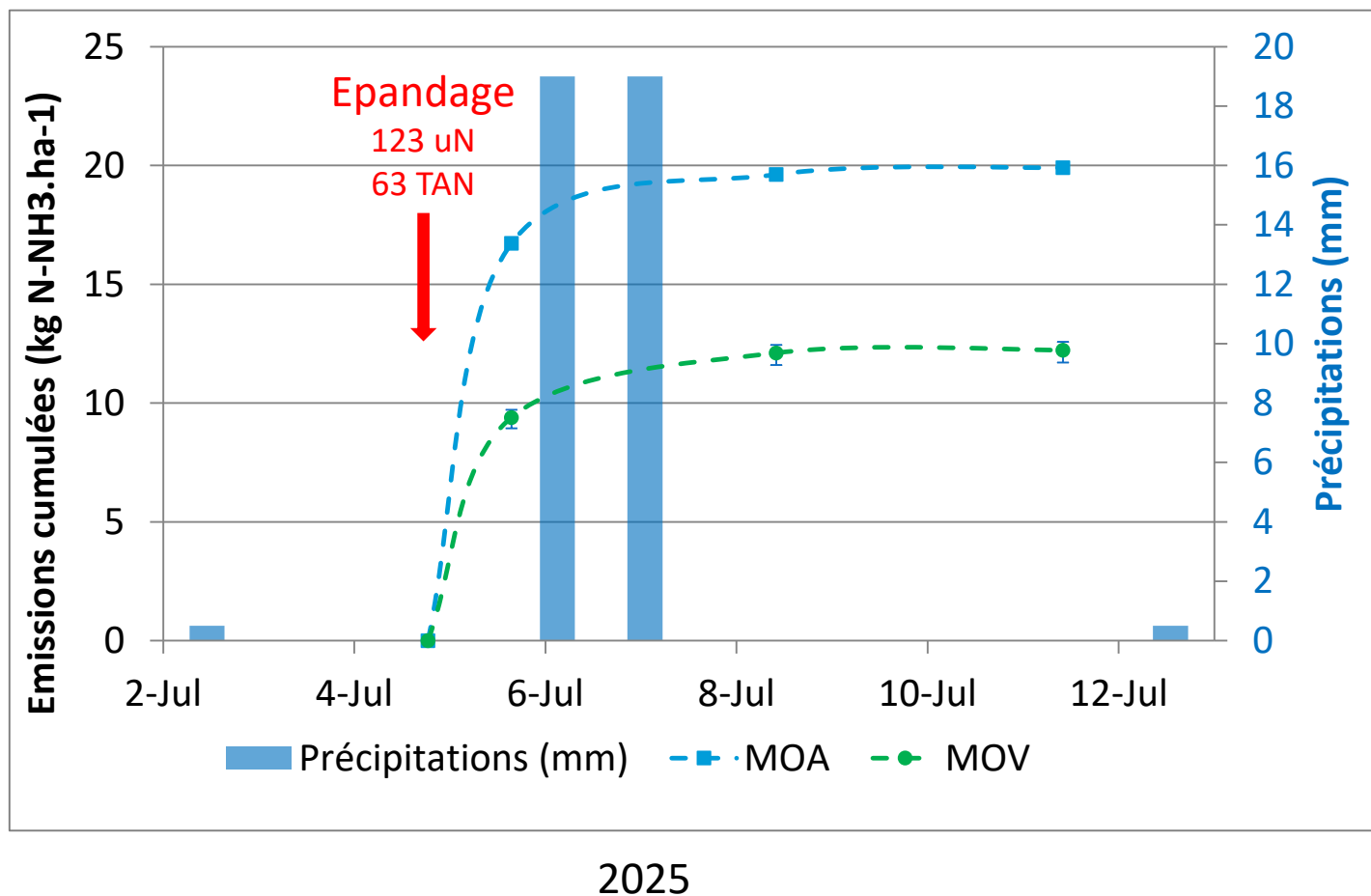
- Des émissions marquées sur MOA (apport lisier)
- Facteurs d'émission corrigés :
 - 1,3% en MOA
 - 0,3% en MOV
 - 0 en PN



2024-2025

- Emissions plus fortes qu'attendues sous colza en juillet 2025
- Pics exceptionnels au moment de l'épandage de digestat au semis des sorghos
- Un effet bande lié à la structure du sol est possible sur MOA
- Facteurs d'émission corrigés :
 - 0,9% en MOA
 - 0,3% en MOV
 - 0,5% en PN

Volatilisation ammoniacale



- Pertes globales assez limitées
 - 12 à 20 uN, soit 20 à 30% de l’N ammoniacal, soit 10 à 16% de l’N totale
- 80% des pertes lors de la première campagne de mesure : dynamique d’émission classique, accentuée par un effet des précipitations
- Pertes plus importantes en MOA : Structure du sol ? Effet inhibiteur de nitrification ?

Conclusions

- Une expérimentation système longue durée, à vocation démonstration/diffusion et à taille « réelle », dans un contexte particulier
- Une approche multicritère : technico économique et environnementale
- Une synthèse globale des résultats (incluant matières active, biomasse microbienne et fongique, tassement, etc.) pour fin 2026/début 2027
- Des résultats relativement attendus :
 - L'effet des CIVE d'hiver sur les nitrates
 - Emissions d'ammoniac sur digestat ... mais maîtrisées grâce à des pratiques adaptées
- D'autres moins connus :
 - L'effet du retard de semis post CIVE d'hiver sur le développement des maïs
 - Les émissions de N₂O liées à l'épandage des matières organiques
- D'autres à explorer / confirmer :
 - Le tassement du sol
 - La recharge de la réserve hydrique
 - Le stockage de carbone
 - Biomasse microbienne et fongique du sol



JRI, 17-19 mars 2026

Sessions Agronomie et Environnement



f.doumit@atee.fr



ATEE - Tour Eve - 1 place du Sud

CS20067 - 92800 PUTEAUX

Tél. : 01 46 56 91 43 - www.atee.fr



Retrouvez les infos scientifiques
sur InfoMetha.org

