



Journées Recherche et Innovation Biogaz et Méthanisation

Sessions Procédés et Valorisation

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



Sommaire

Animateurs

PRÉTRAITEMENTS, CARACTÉRISATION ET QUALITÉ DE LA BIOMASSE

Romain Cresson

[Prétraitement séquentiel fongique et oxydatif biomimétique de la paille de cultures : effets sur les caractéristiques de la biomasse lignocellulosique et la production de biométhane - Shrutihi Meenakshisundaram, Unilasalle Beauvais](#)

[De la conserverie de légumes au digesteur : comprendre et maîtriser le stockage des coproduits végétaux pour maximiser leur valorisation énergétique - Paule Evelyne Ella Gbehe, EUREDEN, INRAE OPAALE](#)

[Devenir des bactéries pathogènes dans cinq méthaniseurs : analyse croisée par culture, dPCR et métagénomique - Nathalie Wery, LBE - INRAE](#)

[Etude de l'impact des alternatives aux baches plastiques conventionnelles pour la couverture des silos d'ensilage en méthanisation - Clément Van Vlierberghe, LBE - INRAE](#)

BIOMÉTHANATION IN SITU, ROBUSTESSE ET CHANGEMENT D'ÉCHELLE

Pierre Fontanille

[METHASCALE : reproductibilité et transférabilité des résultats au cours des changements d'échelle en méthanisation - Christine Peyrelasse, APESA](#)

[Evaluation de la robustesse de la biométhanation in situ face aux surcharges organiques et d'hydrogène - Lucia Braga Nan, LBE – INRAE](#)

[Modélisation de la biométhanation in situ - Tatiana Segura, INRAE, Université de Montpellier, LBE, ENGIE Lab CRIGEN](#)

[De la digestion anaérobie à l'électrométhanogénèse : rôle des biofilms électroactifs pour maximiser la conversion de substrats complexes réels en biométhane - Anne-Laure Borg, ENGIE](#)

DIGESTATS : CONCEPTION, VALORISATION ET DURABILITÉ

Romain Girault

[Impact des critères de conception des unités de méthanisation sur le potentiel méthanogène résiduel du digestat - Romain Girault, OPAALE INRAE](#)

[METHASOLCN : Méthanisation et retour au sol - prédire la minéralisation du carbone et de l'azote des intrants et digestats par des méthodes spectrales - Julie Jimenez, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement - LBE INRAE](#)

[Une stratégie combinée acidification-séchage pour améliorer la valorisation agronomique des digestats : devenir de la matière et des contaminants Julie Jimenez, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement - LBE INRAE](#)

[Optimisation multi-objectif d'une filière de méthanisation : évaluation de la production durable de biogaz et de la gestion du digestat sous variabilités saisonnières - Wasim Ahmed, INRAE LBE](#)

MICROBIOLOGIE, INHIBITION ET CONDITIONS OPÉRATOIRES

Guillaume Henry

[Découvrir l'optimum caché : Impact de la température sur la phase d'hydrolyse de la méthanisation - Elie Nader, Suez](#)

[Digestion anaérobie mésophile des boues d'épuration municipales sous fortes concentrations de propionate de sodium en conditions semi-continues : inhibition et modifications de la communauté microbienne - Joël Awinzure Agumah et Thierry Ribeiro, Université de technologie de Compiègne \(UTC\)](#)

[Traitement de l'H₂S dans le biogaz sans nécessité d'O₂ via laveur par liquide catalytique - Maxime Brissaud, Ch4Process et Marwa Said, Natran R&I](#)

[Optimisation de procédés de méthanation biologique : Etude du cycle du soufre et impact sur les activités biologiques au sein de cultures mixtes de microorganismes - Léa Laquillaut, INSA Toulouse](#)

PROCÉDÉS ET VALORISATION

PRÉTRAITEMENTS, CARACTÉRISATION ET QUALITÉ DE LA BIOMASSE

Animateur
Romain Cresson

1 **Shruthi Meenakshisundaram**, Unilasalle Beauvais

Prétraitement séquentiel fongique et oxydatif biomimétique de la paille de cultures : effets sur les caractéristiques de la biomasse lignocellulosique et la production de biométhane

2 **Paule Evelyne Ela Gbehe**, EUREDEN INRAE OPALE

De la conserverie de légumes au digesteur : comprendre et maîtriser le stockage des coproduits végétaux pour maximiser leur valorisation énergétique

3 **Nathalie Wery**, LBE INRAE

Devenir des bactéries pathogènes dans cinq méthaniseurs : analyse croisée par culture, dPCR et métagénomique

4 **Clément Van Mierberghe**, LBE INRAE

Etude de l'impact des alternatives aux baches plastiques conventionnelles pour la couverture des silos d'ensilage en méthanisation

Prétraitement séquentiel fongique et oxydatif biomimétique de la paille de cultures : effets sur les caractéristiques de la biomasse lignocellulosique et la production de biométhane

Shruthi Meenakshisundaram^{1,2}, Vincenzo Calcagno^{1,3}, Claire Ceballos¹, Antoine Fayeulle¹, Estelle Léonard¹, Virginie Herledan³,

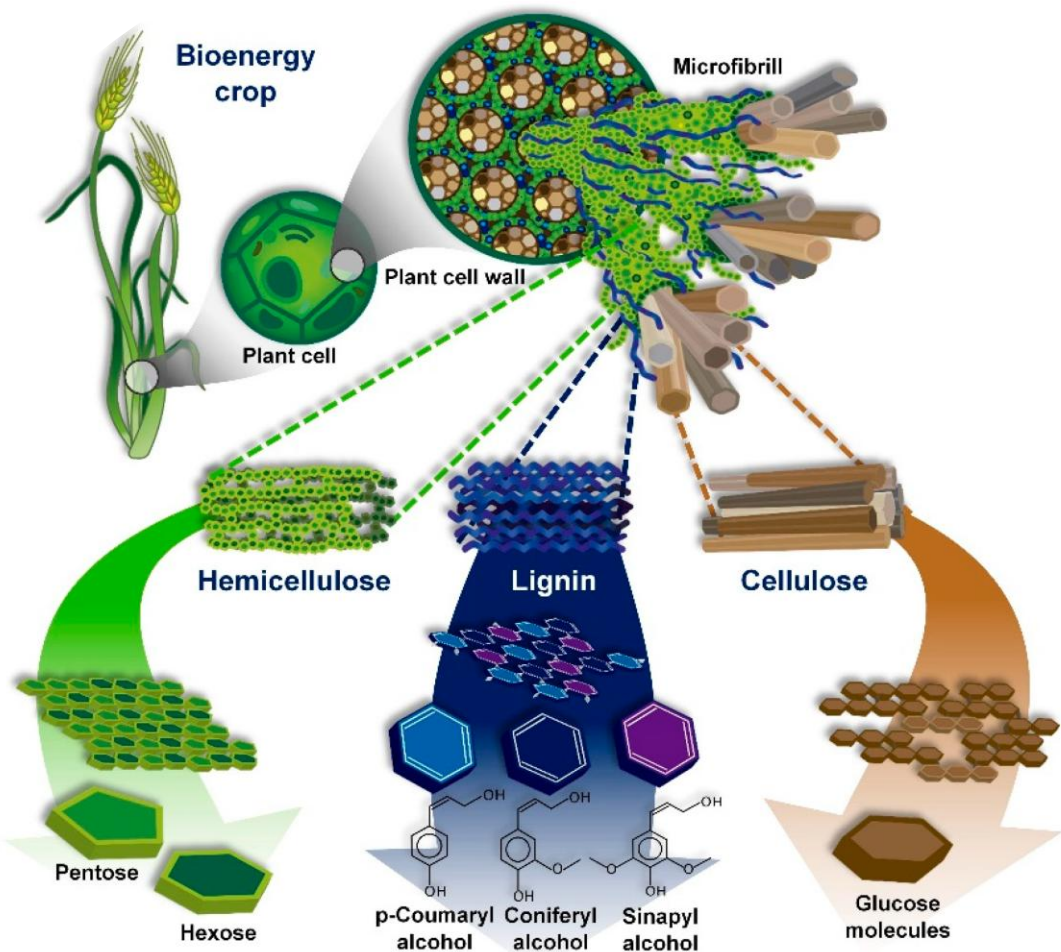
Jean-Marc Krafft³, Yannick Millot³, André Pauss¹, Claude Jolival³ and Xiaojun Liu¹

¹ Université de technologie de Compiègne, ESCOM, Alliance Sorbonne Université, TIMR, Compiègne, France

² Institut Polytechnique UniLaSalle, Université d'Artois, ULR 7519, Rue Pierre Waguët, 60026 Beauvais, France

³ Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Réactivité de Surface (LRS), 4 place Jussieu, F-75005 Paris, France

Paille: abondante, énergie inexploitée



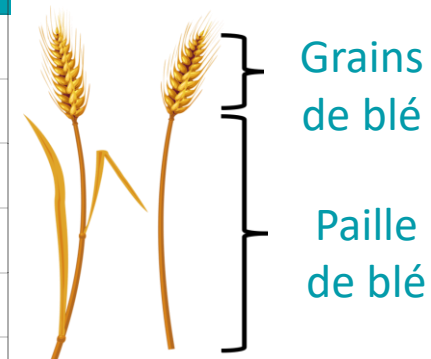
Structure de la biomasse lignocellulosique et de ses biopolymères : cellulose, hémicellulose et lignine.
Source : Hernández Beltrán et al. (2019)

Perspectives ADEME : Les gisements agricoles pourraient représenter près de 90 % du potentiel de production de biogaz envisagé à l’horizon 2050.¹

Disponibilité de la paille :

- Production de blé en Europe : 134 millions de tonnes/an.²
- 0,85 kg de paille produit pour 1 kg de blé.
- Biomasse peu coûteuse.

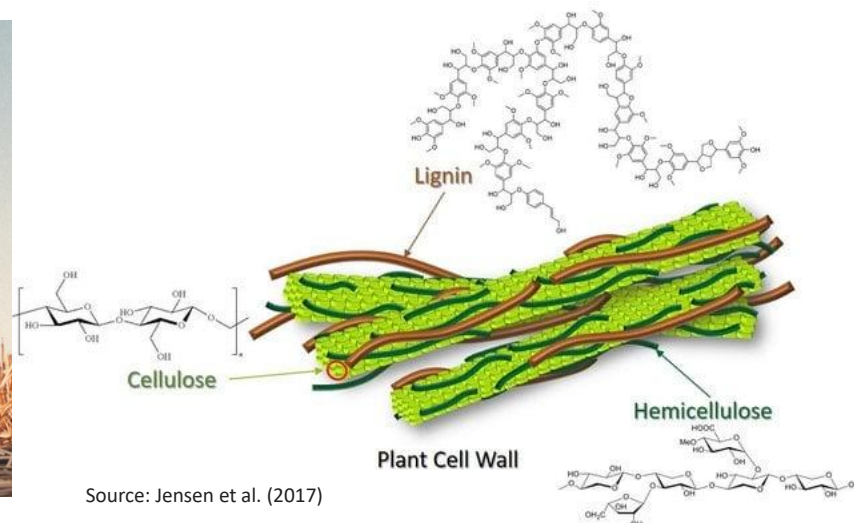
Paille de blé	Composition
Lignine	11 - 26 %
Hémicellulose	20 - 45 %
Cellulose	32 - 46 %
Amidon	0 - 3 %
Protéines	2 - 6 %
Cendres	0 - 2 %



¹Thual, J., Martin, S., Mousset, J., 2023. La Méthanisation - AVIS D’EXPERTS. Agence de la Transition Ecologique (ADEME).

²Commission européenne, Direction générale de l’agriculture et du développement rural. (s. d.). *Statistiques sur les céréales.*

Le prétraitement est essentiel

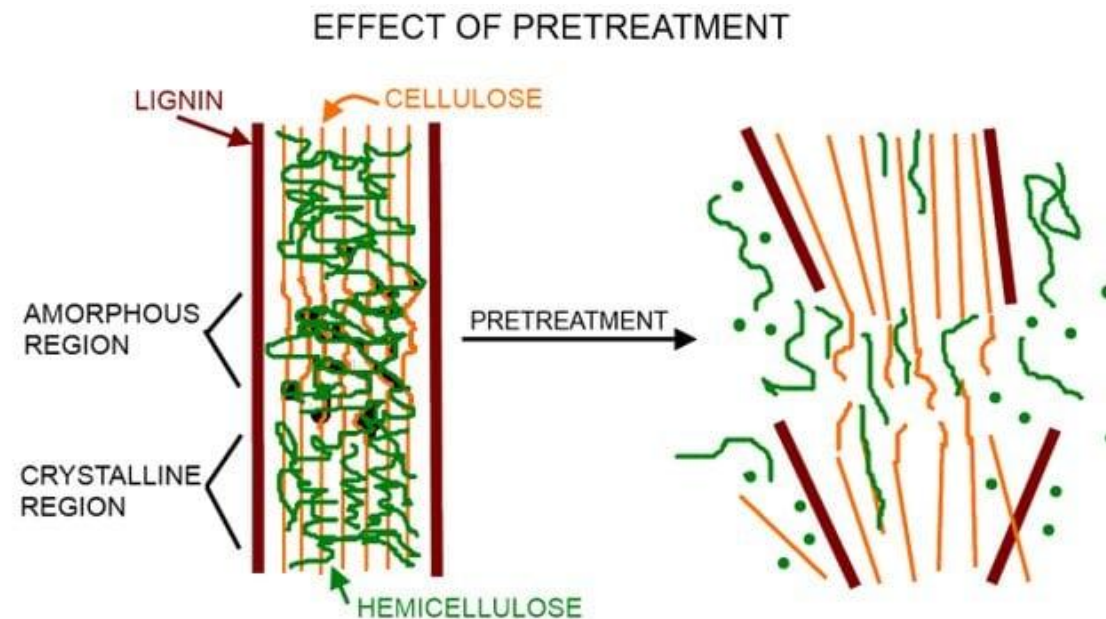


Structure :

- La composition varie selon l'espèce, la saison et l'origine
- La cellulose – substrat principal pour la méthanisation
- Le niveau de lignification et la cristallinité de la cellulose rendent la biomasse récalcitrante

Biotransformation :

- Le prétraitement désintègre la structure complexe de la biomasse lignocellulosique (LCB).
- Il améliore l'accessibilité des substrats aux microorganismes et ainsi l'hydrolyse, qui constitue l'étape limitante de la digestion anaérobie.



Jensen, C.U., Rodriguez Guerrero, J.K., Karatzos, S. et al. Fundamentals of Hydrofaction™: Renewable crude oil from woody biomass. Biomass Conv.

Bioref. 7, 495–509 (2017). <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0248-8>

Krope, J., Ghani Olabi, A., Goričanec, D., & Božičnik, S. (Eds.). (2017). Bioenergy and Biofuels: (conference proceedings) / 10th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection, (June 27th-30th, 2017, Bled, Slovenia): Vol. SEEP 10. University of Maribor

Press. <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/239>

Stratégies de prétraitement

Prétraitement fongique

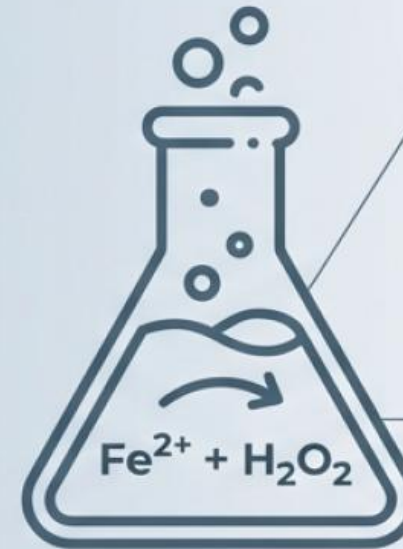
Mécanisme :
Dégradation enzymatique naturelle
- délignificateurs naturels

Caractéristiques :
Efficace mais lente



Champignons de pourriture blanche
(*Pleurotus ostreatus*)

Prétraitement chimique modéré - oxydatifs



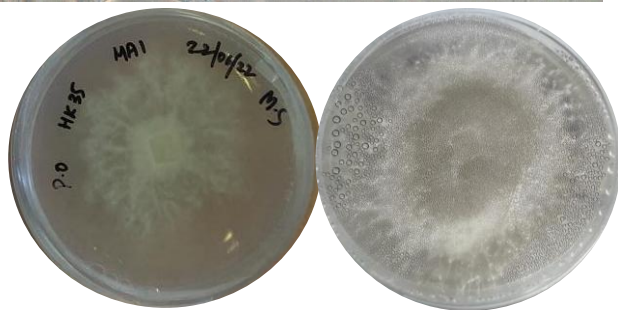
Mécanisme : Réaction de Fenton - Production intensifiée de radicaux - oxydation biomimétique (qui renforce la délignification fongique)

Caractéristiques : Rapide et peu coûteuse (faible dose)

Les Souches



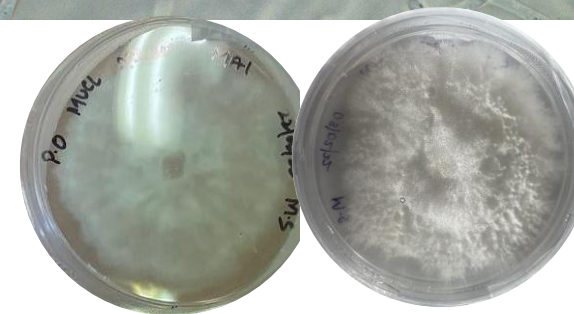
PO3 (MUCL 29420)



Une souche pure isolée à partir de mycélium sur bois





HK35








Première souche hybride commerciale, à haut rendement, tolérante à une gamme de conditions de culture

Question de recherche

- Comment la **souche** de *Pleurotus ostreatus* et l'**ordre des prétraitements** biologique et chimique influencent-ils la **dégradation** de la biomasse lignocellulosique et le **potentiel de biométhane** ?

Les Souches	
PO3 (Souche sauvage)	
HK35 (Souche hybride commerciale)	

Les Séquences	
FP : Prétraitement fongique seul	 → (30 Jours)
FP + CP : Fongique → Chimique	 (30 Jours) →  (24 Heures)
CP + FP : Chimique → Fongique	 (24 Heures) →  (30 Jours)

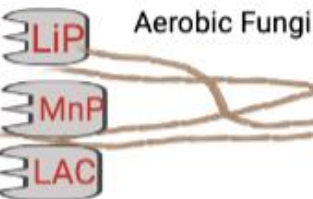
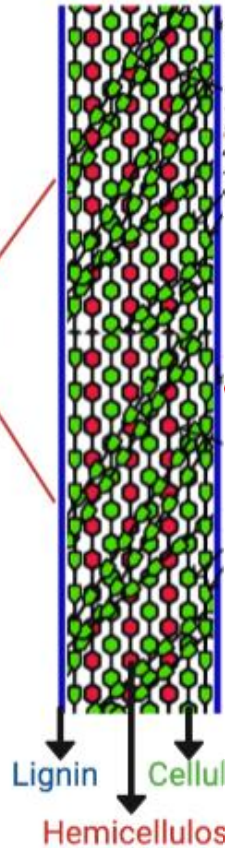
Approche

(3 g de mycélium : 15 g de paille dans 300 mL de milieu minéral sans glucose ; 30 jours, 22 °C, agitation.)



Plant cell

Straw

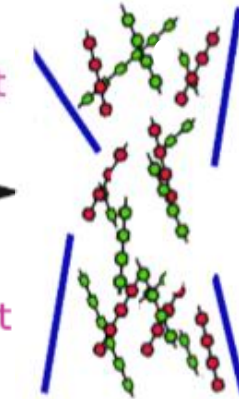


Oxidants

(15 g de paille + 300 mL d'eau déminéralisée pH ajusté à 3, 24 h, agitation
Concentrations finales : $1,065 \times 10^{-3}$ M $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
et 0,15 M H_2O_2 .)

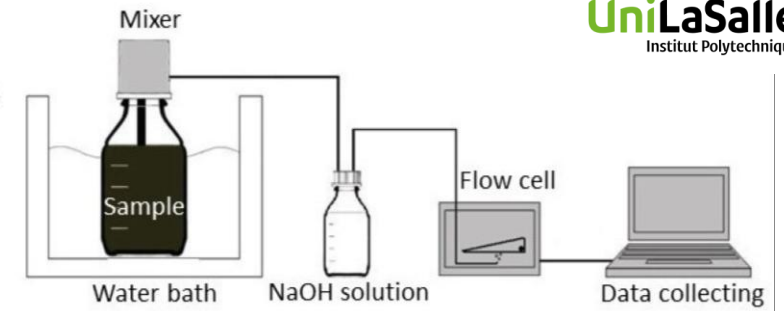
Fungal Pretreatment

Chemical Pretreatment



Pretreated Biomass

Anaerobic Digestion



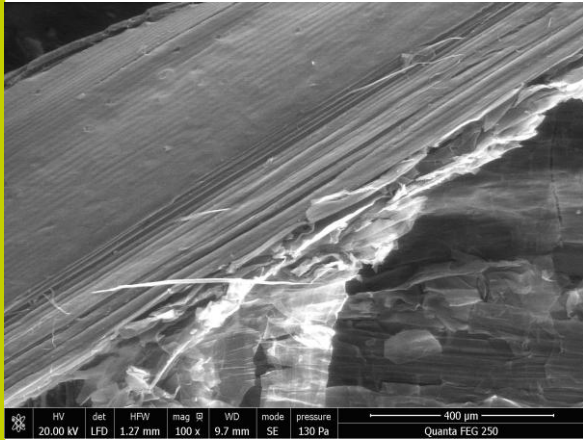
Automatic Methane Potential Test System (AMPTS)

Analysis	Technique
Biomass composition	Thermogravimetric Analysis (TGA)
Surface morphology	Scanning electron microscopy (SEM)
CHNSO composition	Elemental analyzer
Functional groups	Attenuated total reflection (ATR)
Crystallinity index	Wide angle X-ray diffraction (WAXD), Solid-state Nuclear Magnetic Resonance (ssNMR)
Porosity	Simon's staining

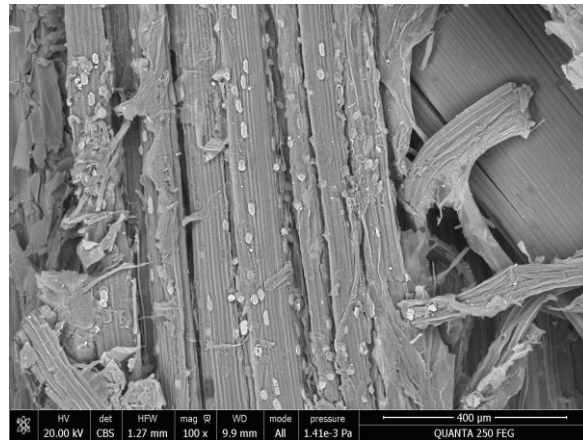
Microscopie électronique à balayage (MEB)

GS: Paille broyée et tamisée

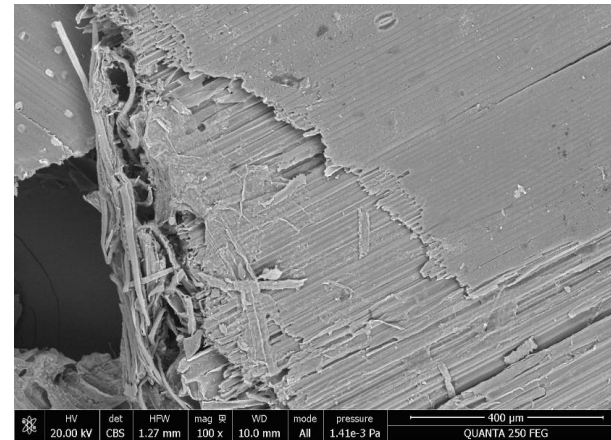
GS



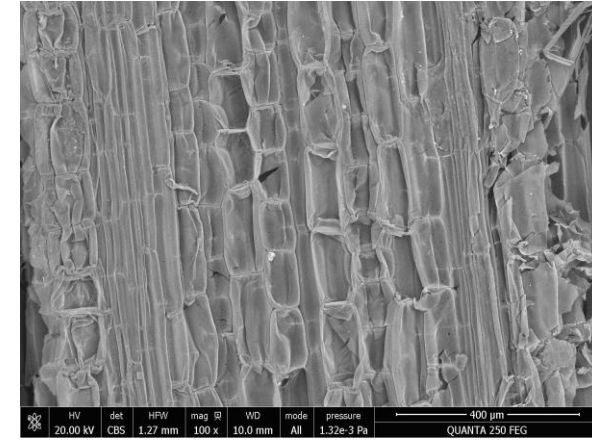
PO3_FP



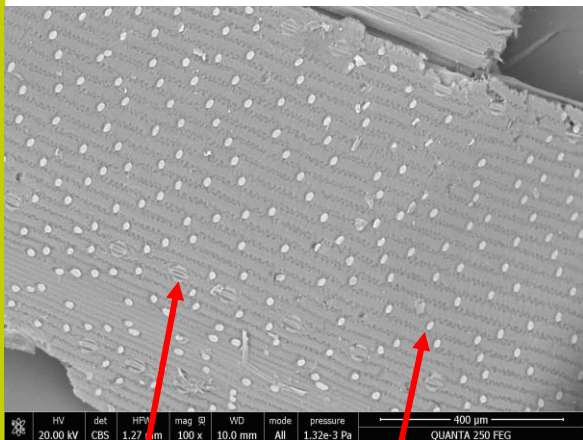
PO3_FP+CP



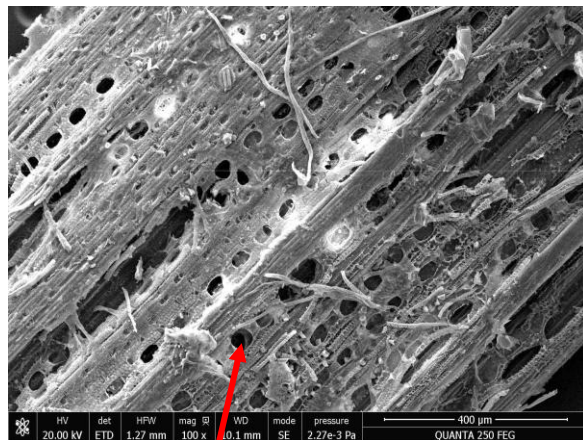
PO3_CP+FP



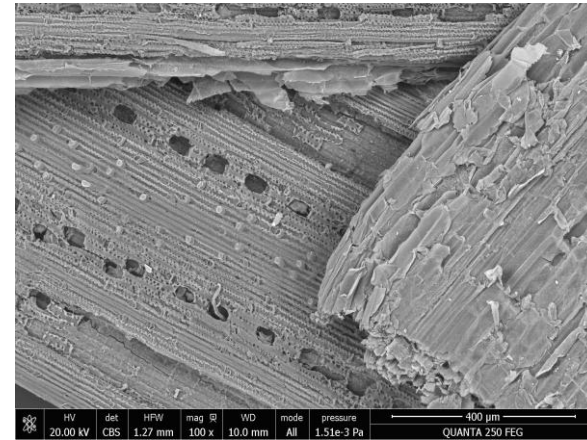
Control



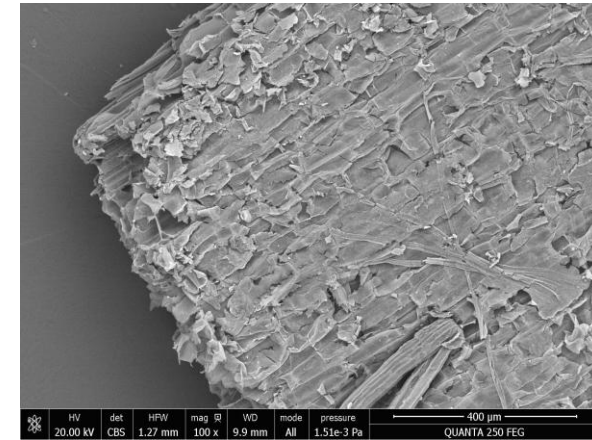
HK35_FP



HK35_FP+CP



HK35_CP+FP



Stomates

Silice

Pores

Grossissement: 100x

Composition de la biomasse

Basée sur l'analyse thermogravimétrique (TGA)

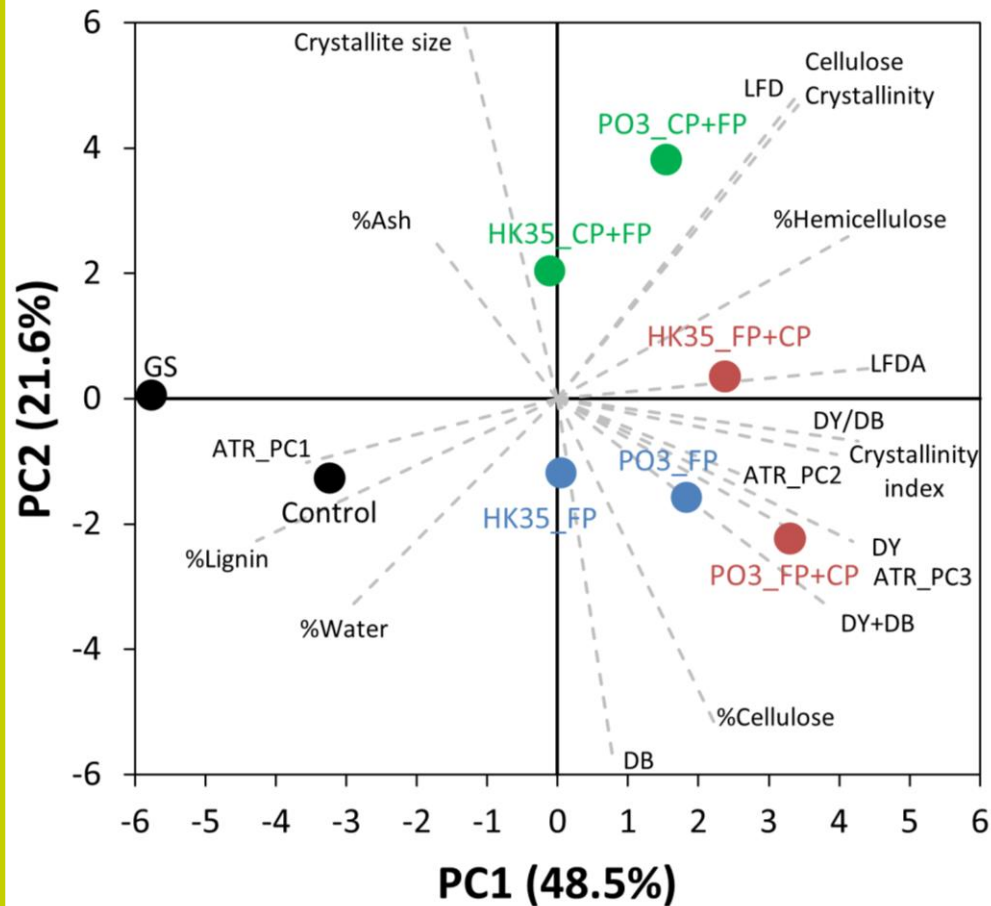


GS: Paille broyée et tamisée

- La proportion de **lignine** a diminué après les prétraitements d'environ 23 à 34 %.
- La proportion d'**hémicellulose** a augmenté avec les prétraitements combinés.
- Aucun changement significatif dans la teneur en **cellulose**.
- **PO3** : Forte rétention des polysaccharides ; **HK35** : Perte de matière plus importante due à la solubilisation (ce qui explique la présence de pores).

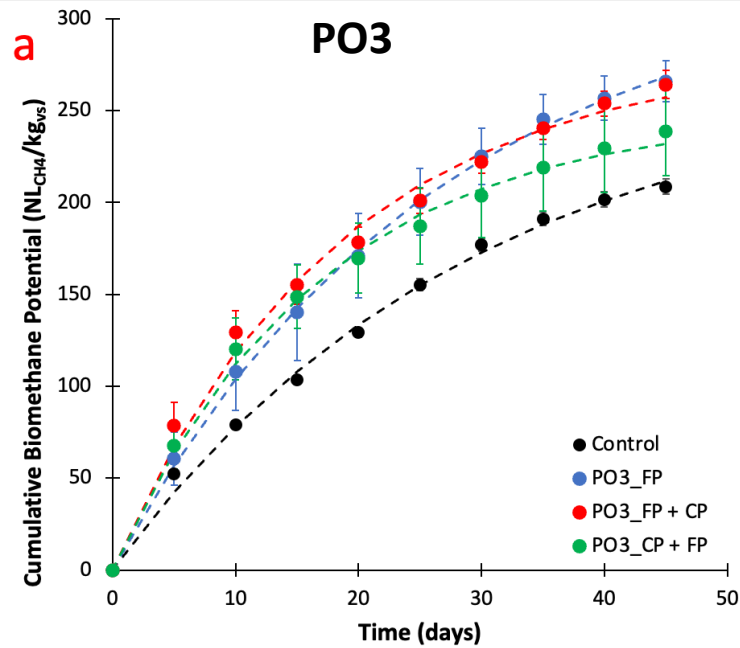
Analyse en composantes principales (ACP)

des données multi-caractérisations



- **PC1 (48,5 %) = effet principal du prétraitement :**
 - GS + contrôle se regroupent du côté PC1 négatif → signature “brute/peu modifiée”;
 - tous les échantillons prétraités se déplacent vers PC1 positif → accessibilité accrue / remodelage chimique
- **PC2 (21,6 %) = effet de la séquence (dominant) :**
 - CP+FP (vert) se regroupe à PC2 positif près de cristallinité de la cellulose, LFD, %hémicellulose.
 - FP+CP (rouge) se regroupe à PC2 négatif, plus proche des paramètres d’accessibilité (coloration) + ATR_PC3.
- Effet souche secondaire : la séparation est davantage liée à l’ordre du prétraitement qu’à PO3 vs HK35.

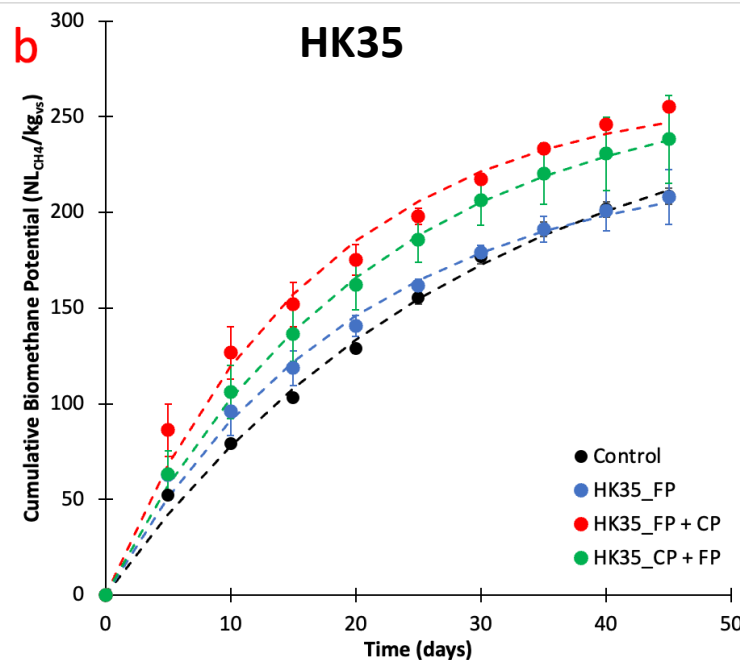
Biomethane Potential (BMP)



Par rapport au **témoin** :

FP : PO3 a montré une augmentation de **27,5 % du BMP**, tandis que HK35 n'a montré aucune amélioration — ce qui met en évidence une variation entre les souches.

FP+CP : Une augmentation de **22,3 %** a été observée pour HK35, mais aucun bénéfice n'a été constaté pour PO3 — suggérant une réduction de la récalcitrance de la biomasse.



CP+FP : Une augmentation de **14,3 %** a été observée pour HK35, mais aucun bénéfice pour PO3 — le prétraitement chimique rend davantage de polysaccharides disponibles pour la croissance fongique, réduisant ainsi la quantité de substrat disponible pour la conversion en biogaz.

- **PO3** fonctionne mieux **seul**.
- **HK35** nécessite une **synergie chimique** pour atteindre son potentiel maximal en termes de l'intensification de la production du biométhane.

Conclusions

1. L'objectif ultime :



Réduire la récalcitrance sans compromettre les glucides fermentescibles.

2. Adapter la souche à la méthode :



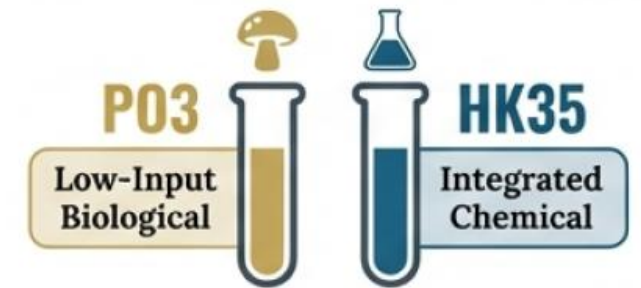
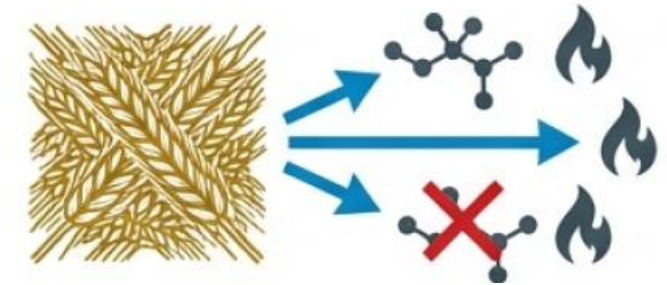
HK35 nécessite un prétraitement chimique combiné pour atteindre son potentiel maximal en biométhane. La souche PO3 peut être utilisée en prétraitement biologique seule.

3. L'ordre des prétraitements est déterminant :



FP → CP : fonctionne

CP → FP : inefficace en raison de la consommation de glucides par les champignons



Merci Beaucoup!

Acknowledgments



Équipe encadrante de la thèse

André Pauss

Vincenzo Calcagno

Adama Konate

Thierry Ribeiro (UTC)

Antoine Fayeulle

Claude Jolival

Stéphane Mottelet

Laura André

Claire Ceballos

Virginie Herledan

Estelle Léonard

Jean-Marc Krafft

Xiaojun Liu

Yannick Millot



MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION





17 – 19 mars 2026 NANCY

JOURNÉES RECHERCHE INNOVATION

Biogaz Méthanisation

De la conserverie de légumes au digesteur : comprendre et maîtriser le stockage des coproduits végétaux pour maximiser leur valorisation énergétique

P. E. Ella GBEHE^{*1,2}, Mathieu DUFOUR², Ronan QUENTEL², Jean Michel GUERIN², Pascal PEU¹

¹ INRAE, UR OPAALe, 17 av. de Cucillé, CS 64427, 35044 Rennes, France, ² EUREDEN, 34 Rue Ferdinand Buisson, 56000 Mellac, France.



Contexte et Objectif



CONTEXTE

- En 2024, récolte totale d'environ **1,8 million de tonnes de légumes** vers les usines de production (*PANOFELT 2024*)
- Jusqu'à **65 % des fruits et légumes bruts** deviennent des déchets lors de la transformation industrielle (*Ros et al., 2013*).
- Potentiel méthanogène des légumes entre **190 et 520 CH₄-NL/kgMV** (*Hillion, 2017*).
- Utilisation de fluides à hautes températures **consommateurs de gaz**



Industrie des légumes **dynamique**



Quantité **significative** de coproduits (Épluchures, pulpe, pelures, écart de tri ...)



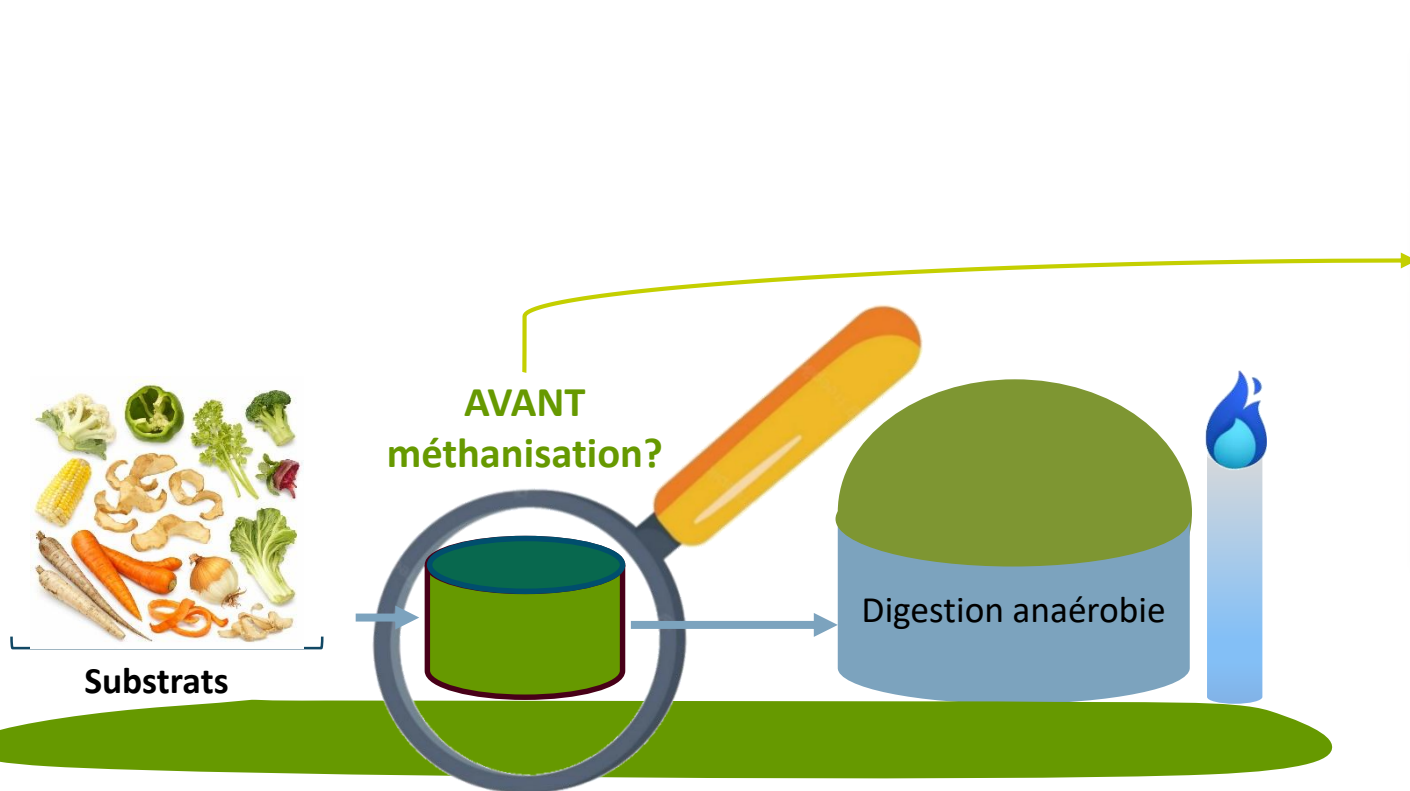
Fort potentiel méthanogène (=capacité de production de méthane)



Réduction de la consommation du gaz naturel

CONTEXTE

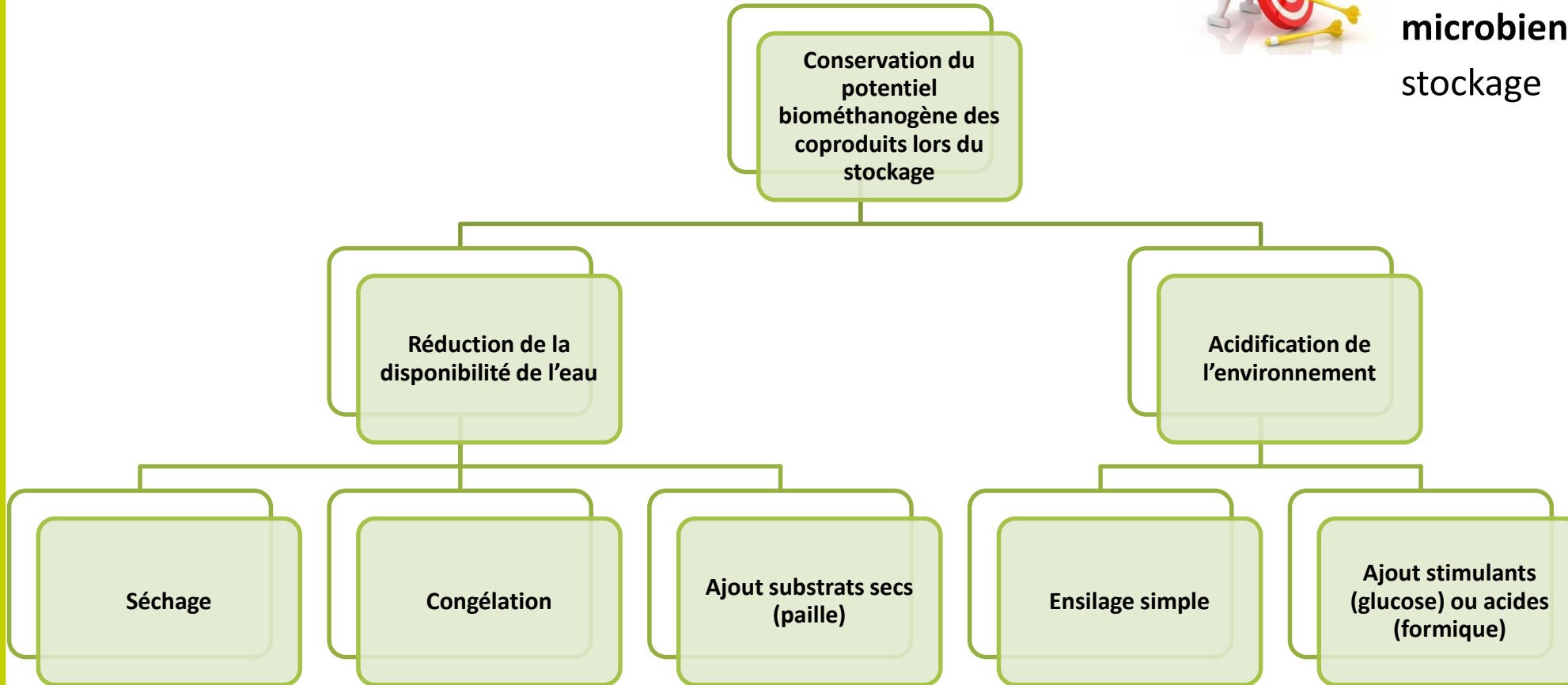
- Coproduits : valorisation non systématique
- Forte tendance à la dégradation pendant stockage → perte de matière et de potentiel méthanogène



- Stockage adapté → **Préservation** du potentiel méthanogène



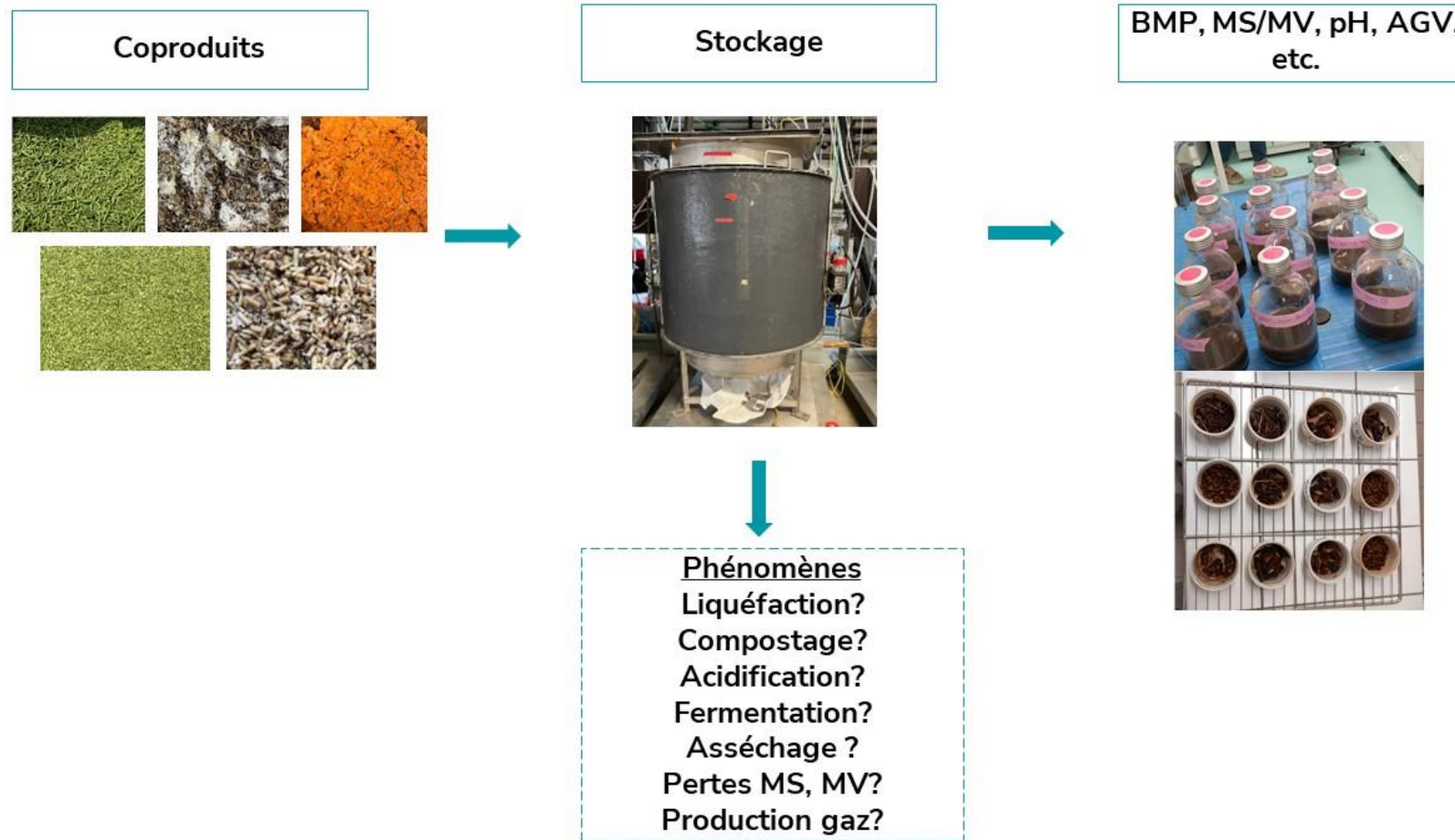
Réduire ou inhiber l'activité microbienne indésirable lors du stockage



OBJECTIF



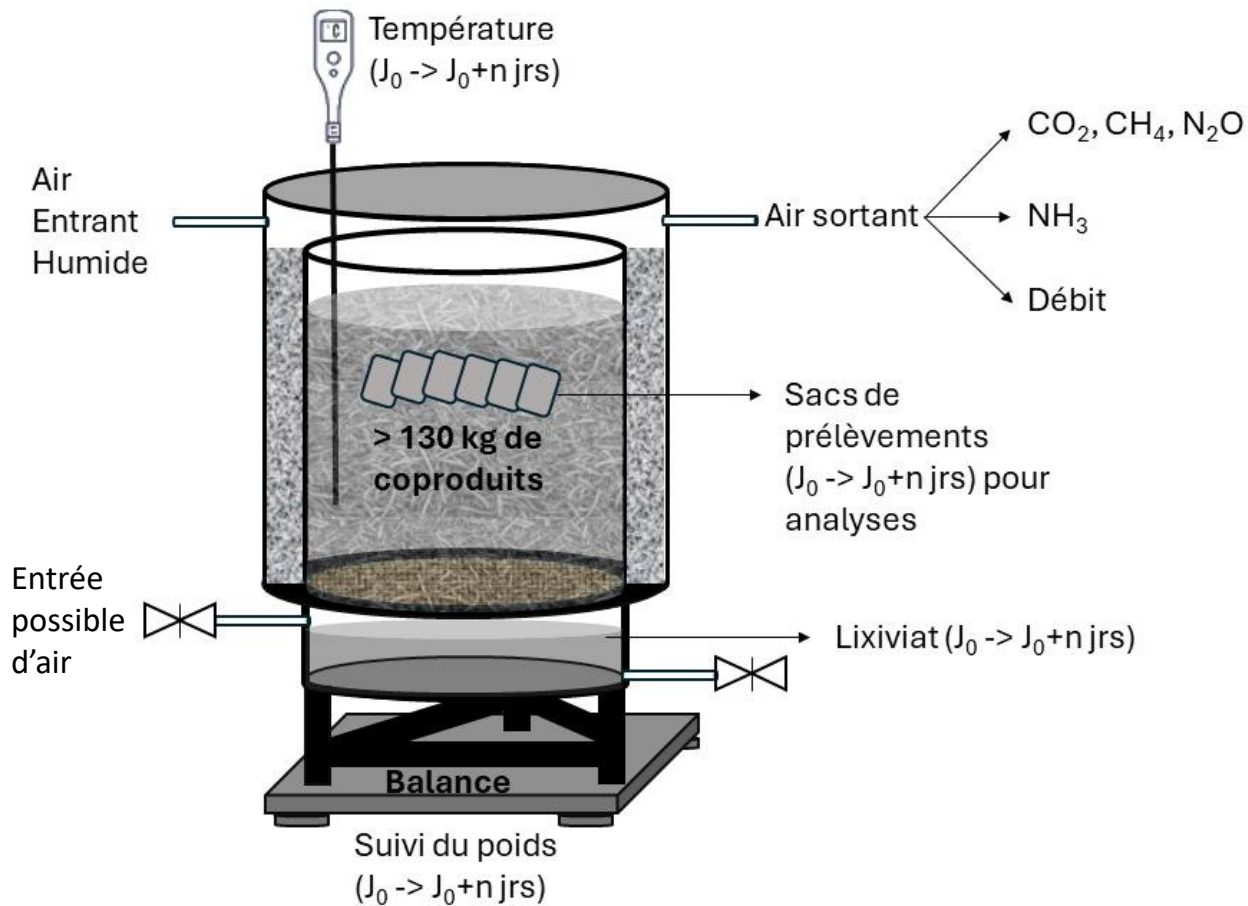
Étudier le comportement de ces coproduits dans des conditions non-contrôlées pour mieux les ajuster ensuite



Matériels et méthodes

MATÉRIEL ET MÉTHODE: DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Échelle pilote : réacteurs 300 L



Analyses coproduits et lixiviat au cours du temps

MATÉRIEL ET MÉTHODE: COPRODUITS

- Coproduits les plus significatifs et représentatifs du site



d'aucy France, Le
Faouët, France

OPAALE RENNES

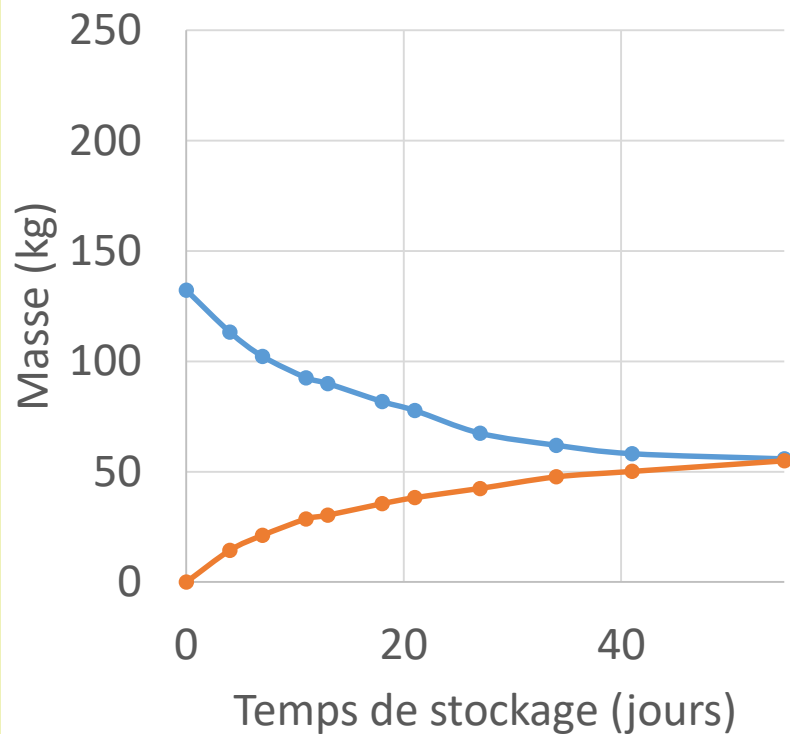


Résultats et discussion

RESULTATS ET DISCUSSION

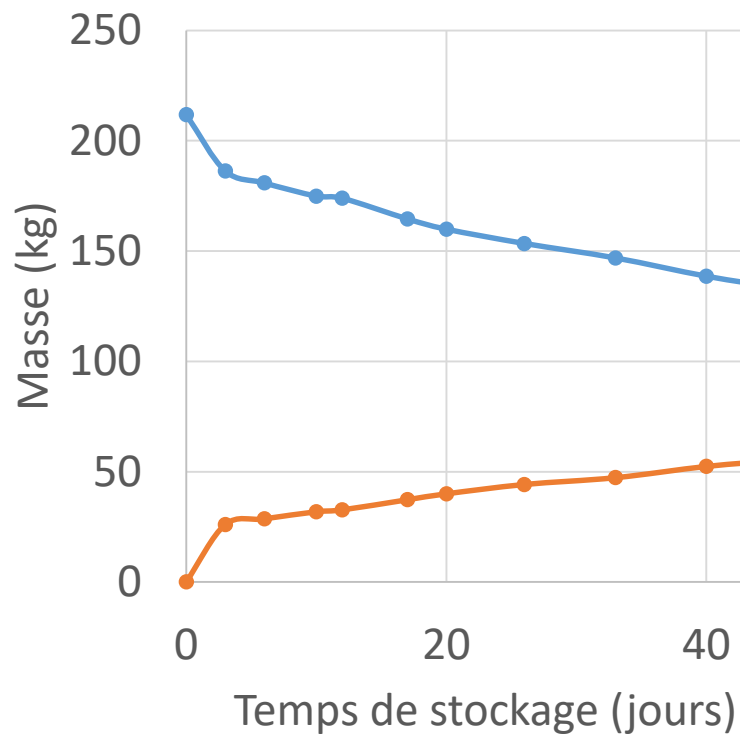
Évolution de la masse de coproduits et de lixiviat au cours du temps

HV



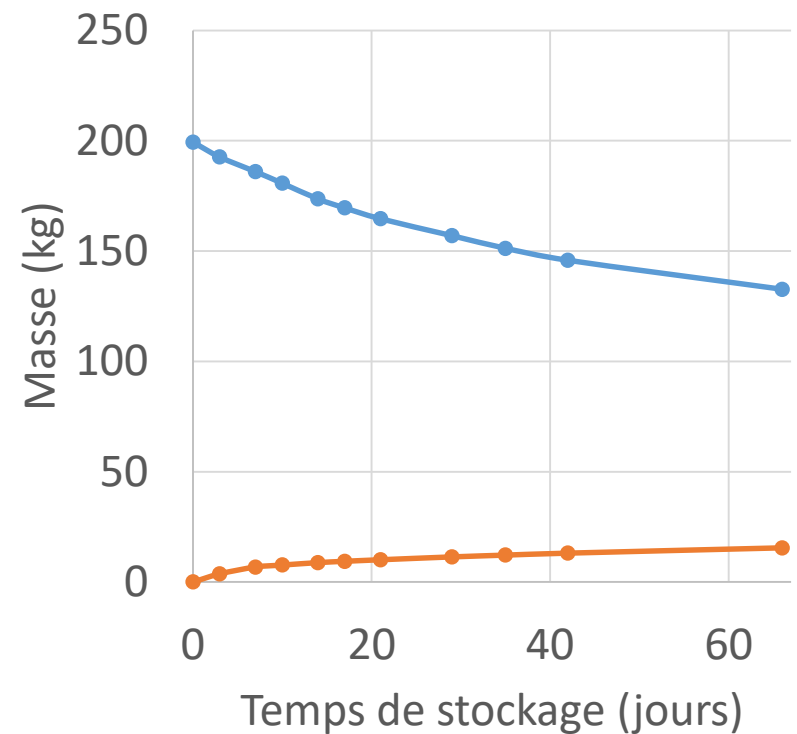
— Masse tas (kg) — Masse Lixiviat (kg)

CaR



— Masse tas (kg) — Masse Lixiviat (kg)

F

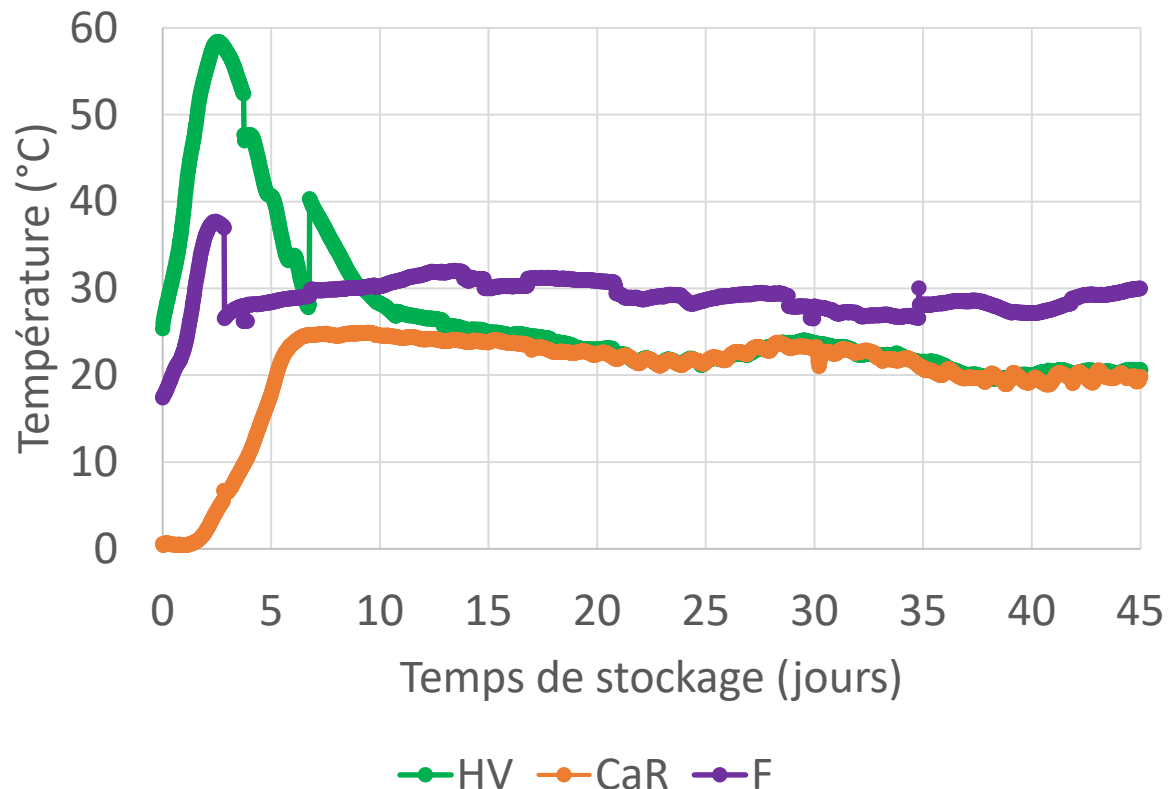


— Masse tas (kg) — Masse Lixiviat (kg)

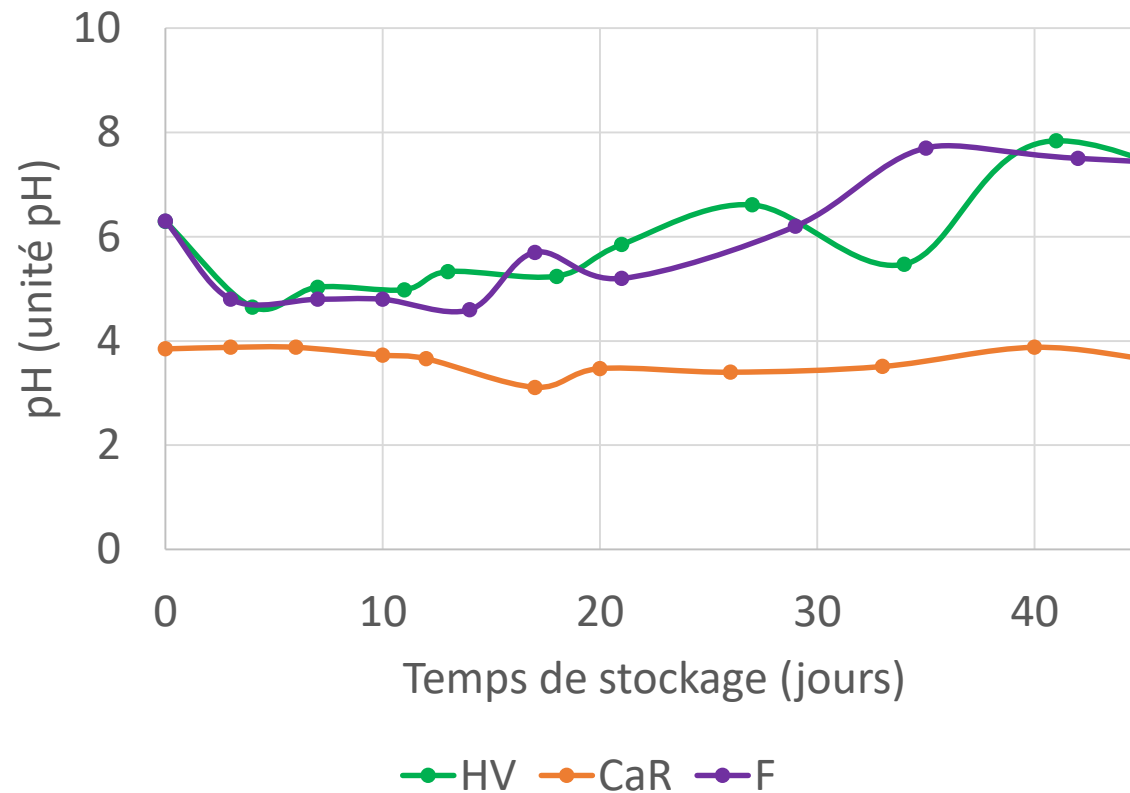
RESULTATS ET DISCUSSION

Evolution de la température et du pH

Température

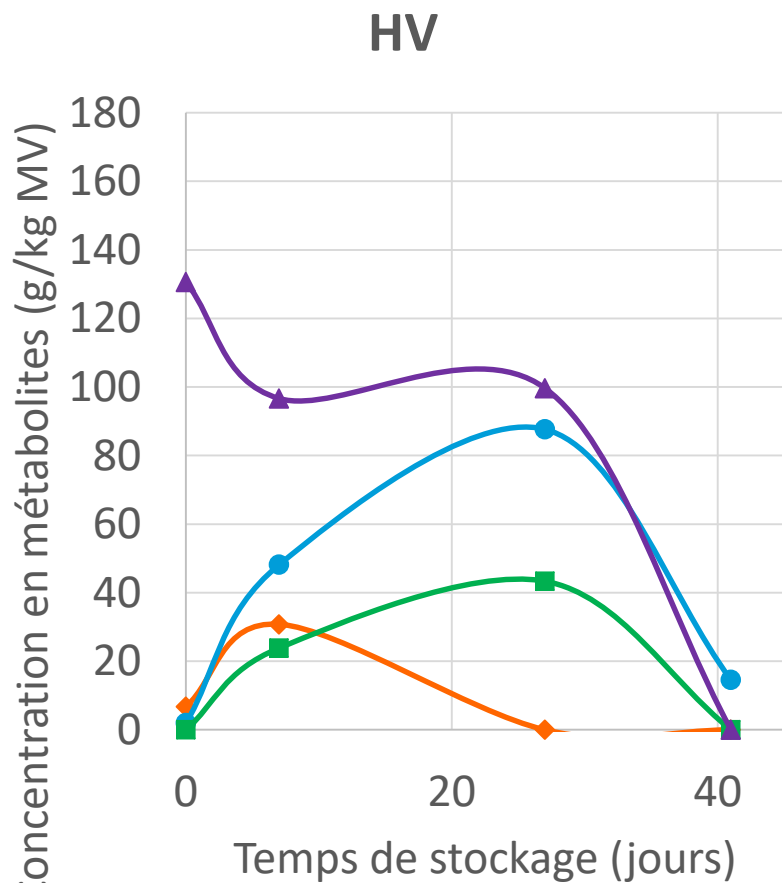


pH

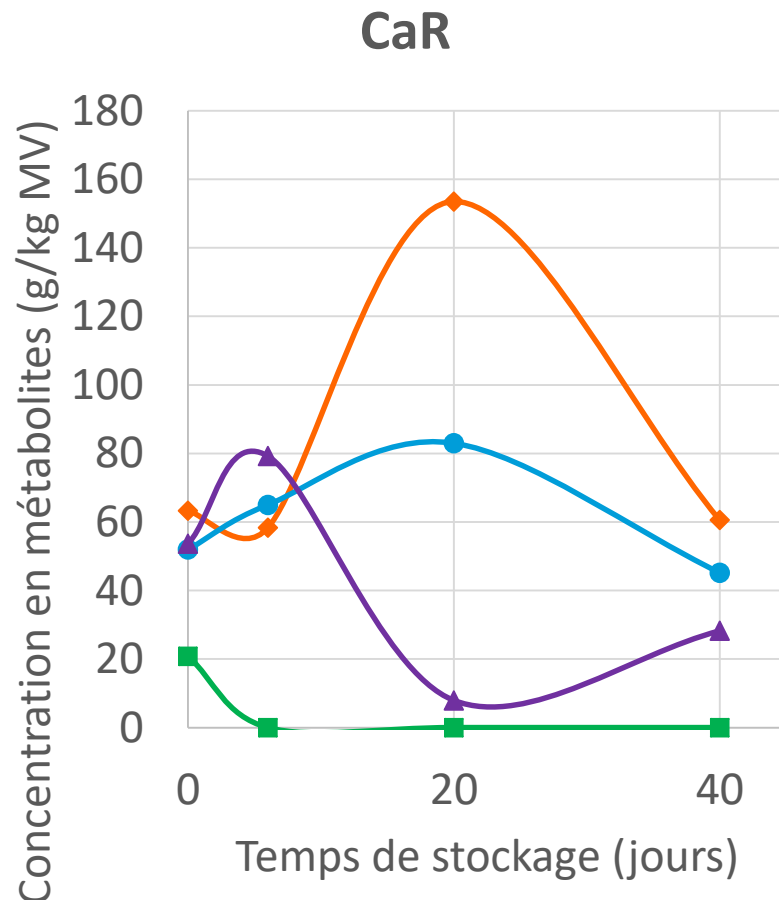


RESULTATS ET DISCUSSION

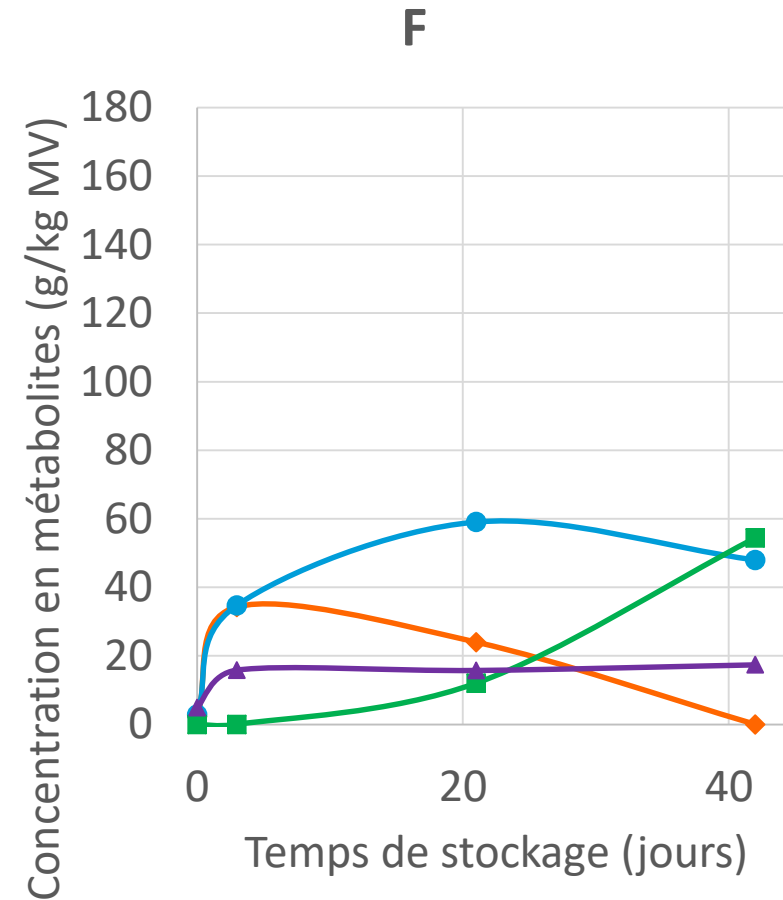
Évolution de la concentration des métabolites dans les coproduits



◆ Lactate ● Acetate
■ Butyrate ▲ Autres



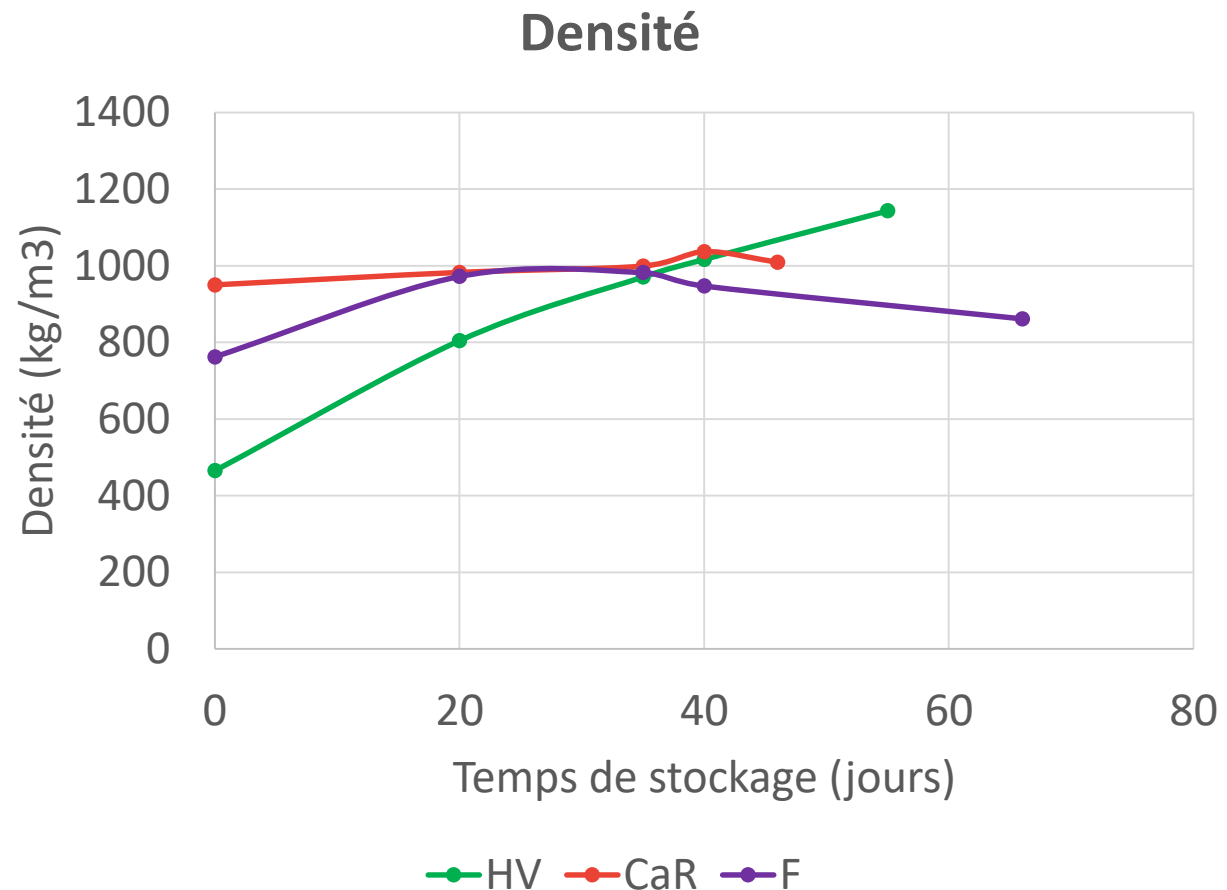
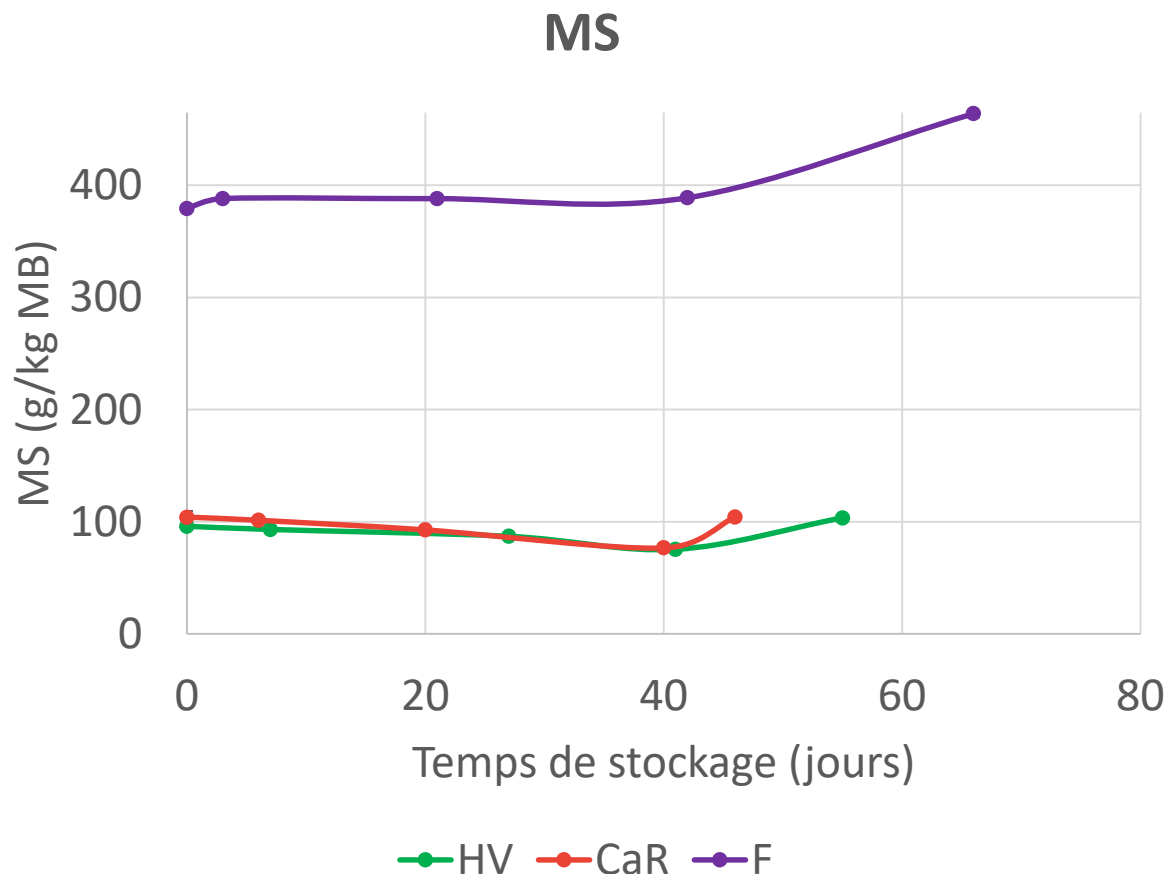
◆ Lactate ● Acetate
■ Butyrate ▲ Autres



◆ Lactate ● Acetate
■ Butyrate ▲ Autres

RESULTATS ET DISCUSSION

Évolution de la concentration en matière sèche et de la densité



RESULTATS ET DISCUSSION: Paramètre de performances stockage

Paramètres	HV	CP	CaR	F	S
Liquéfaction sur 40 jours de stockage (% MB i)	37,8	25,8	24,7	6,6	34,7
Solide restant sur 40 jours de stockage (% MB i)	47,1	53,7	67,7	77,1	59,0
Pertes gazeuses sur 40 jours de stockage (% MB i)	15,1	20,5	7,5	16,3	6,3
Taux de dégradation MV sur 40 jours de stockage (%)	37	38	20	5	24

RESULTATS ET DISCUSSION

Bilan sur le potentiel de production de méthane pour l'ensemble des pilotes testés

	HV	CP	CaR	F	S
Potentiel de production méthane J0 (m ³ CH ₄)	5,3	13,6	11,2	36,5	11,3
Potentiel de production méthane lixivié (m ³ CH ₄)	0,7	1,4	1,5	0,5	2,8
Potentiel de production méthane J40 (m ³ CH ₄)	2,2	6,0	8,2	30,9	6,7
Perte en potentiel sans récup lixivié	59%	56%	26%	15%	41%
Perte en potentiel avec récup lixivié	46%	45%	13%	14%	16%

Conclusion

Conclusion: Classification coproduits

	Groupe 1		Groupe 2	Groupe 3	
Coproduits	CaR	S	F	HV	CP
Acidification	+++	+++	+	+	+
Asséchage	+	+	+++	+	+
Liquéfaction	+++ (25%)	+++ (35%)	+ (6%)	+++ (38%)	+++ (26%)
Augmentation de la température / Activité microbienne	+	+	++	+++	+++
Taux de dégradation de la MV (%)	20	24	5	37	38
Perte potentiel méthanogène (%)	13	16	14	46	45

Suite : Amélioration du stockage en tenant compte du comportement ? Des caractéristiques MS, densité?

Focus sur le Groupe 3 : Tests pour améliorer leur stockage

Merci pour votre attention !

BRETAGNE[®]



Devenir des bactéries pathogènes dans cinq méthaniseurs : analyse croisée par culture, dPCR et métagénomique

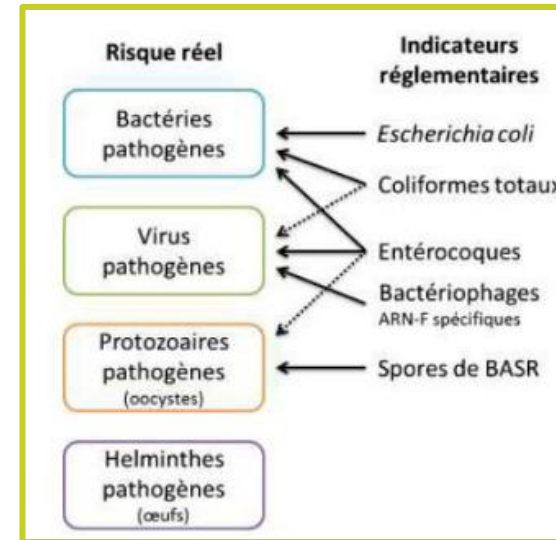
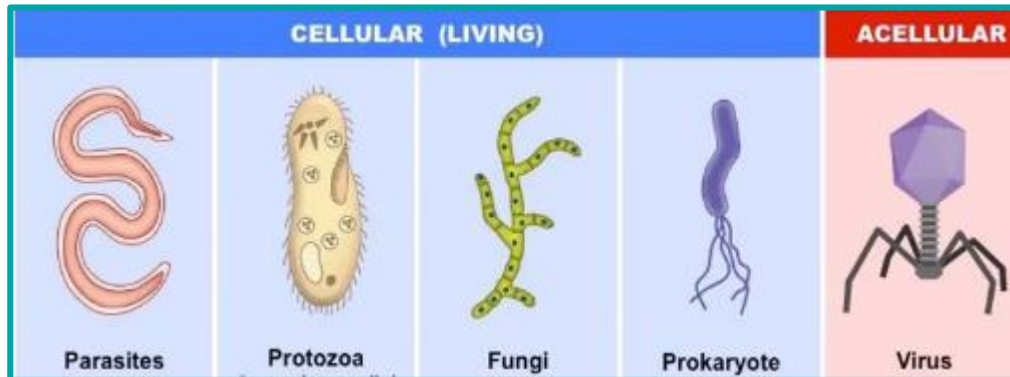


Nathalie Wéry, INRAE, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, Narbonne



Surveillance de la qualité microbiologique des digestats

- Utilisation d'indicateurs pour évaluer le devenir des pathogènes



Source : Erwan Carré (2017) : Qualité biologique des eaux usées traitées en vue de la réutilisation BASR : bactéries anaérobies sulfito-réductrices

Surveillance de la qualité microbiologique des digestats

- Principaux indicateurs utilisés sur la filière de méthanisation :



Coliformes fécaux ou *E. coli* (bactéries Gram-)



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



L'EUROPE S'ENGAGE
L'OCCITANIE AGIT

Projet cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional



UNION EUROPÉENNE



Occitanie



CARNOT



3BeAR



INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre



LBE
Laboratoire
Biotechnologie
de l'Environnement



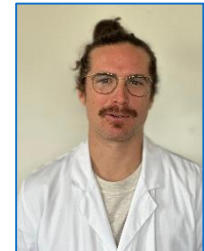
suez

Développement d'un indicateur biologique d'efficacité d'hygiénisation pour les filières de méthanisation

M. Sanglier¹, F. Guilayn², J. Hamelin^{1*}

1 INRAE, Univ Montpellier, LBE, 102 Avenue des Etangs, 11100 Narbonne, France
2 SUEZ, CIRSEE, 78230 Le Pecq, France
*Correspondance : jerome.hamelin@inrae.fr





Malo
Sanglier



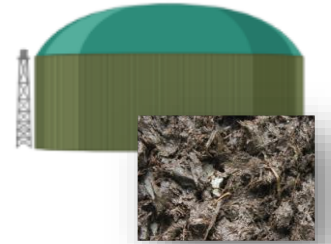
Mesurer les indicateurs ou suivre directement les pathogènes (*Salmonella*, helminthes)



Surveillance de la qualité microbiologique des digestats

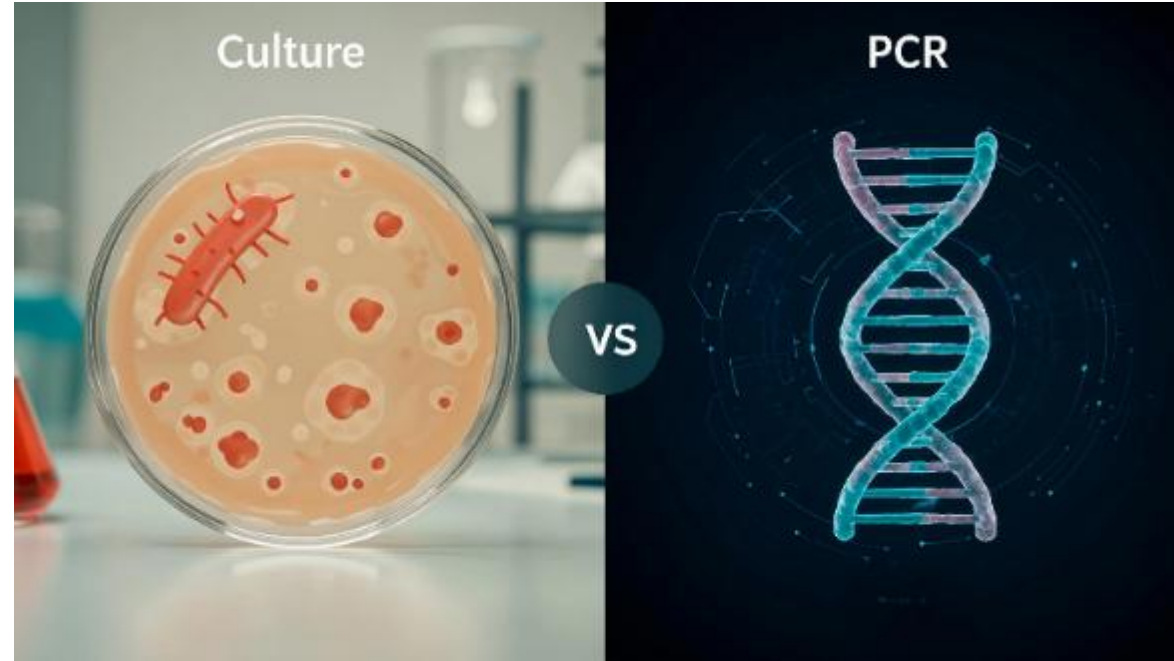
- Normes basées sur les techniques d'enrichissement sur milieux de culture

Bactérie	Norme	Titre
Entérocoques	NF EN ISO 7899-1 :1998	Qualité de l'eau - Recherche et dénombrement des entérocoques intestinaux - Partie 1: Méthode miniaturisée (nombre le plus probable) pour les eaux de surface et résiduaires
<i>E. coli</i>	NF EN ISO 9308-3	Qualité de l'eau - Recherche et dénombrement des Escherichia coli et des bactéries coliformes dans les eaux de surface et résiduaires - Partie 3 : méthode miniaturisée (nombre le plus probable) pour ensemencement en milieu liquide
<i>E. coli</i>	NF ISO 16649-2	Microbiologie des aliments - Méthode horizontale pour le dénombrement des Escherichia coli b-glucuronidase positive - Partie 2 : technique de comptage des colonies à 44 °C au moyen de 5-bromo-4-chloro-3-indolyl b-D-glucuronate
<i>C. perfringens</i>	NF EN ISO 7937	Microbiologie des aliments - Méthode horizontale pour le dénombrement de Clostridium perfringens - Technique par comptage des colonies
<i>Salmonella</i>	NF EN ISO 6579-1	Microbiologie de la chaîne alimentaire - Méthode horizontale pour la recherche, le dénombrement et le sérotypage des Salmonella - Partie 1 : recherche des Salmonella spp. -
<i>L. monocytogenes</i>	NF EN ISO 11290-1	Microbiologie de la chaîne alimentaire - Méthode horizontale pour la recherche et le dénombrement de Listeria monocytogenes et Listeria spp. - Partie 1 : méthode de recherche
<i>S. aureus</i>	NF EN ISO 6888-1/A1	Microbiologie des aliments - Méthode horizontale pour le dénombrement des staphylocoques à coagulase positive (Staphylococcus aureus et autres espèces) - Partie 1 : technique utilisant le milieu gélosé de Baird-Parker



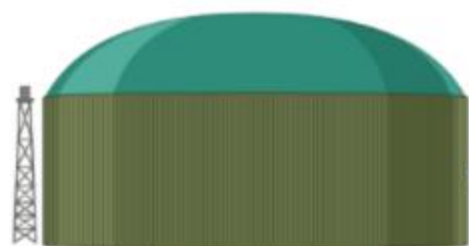
Analyses des bactéries recommandées par le guide sur les Matières Fertilisantes – Supports de Culture

Mesure des concentrations en microorganismes



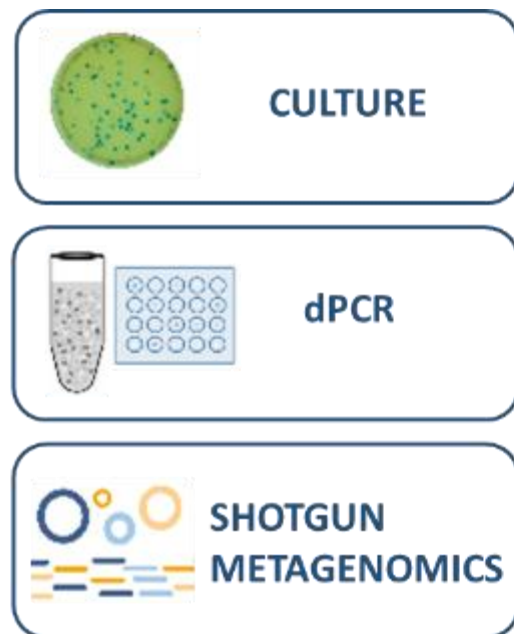
Le projet MethaSeq

accord cadre INRAE – GRDF



5 méthaniseurs

Echantillonnage



Apport de chaque technique

Devenir des contaminants



Le projet MethaSeq : matériel et méthodes

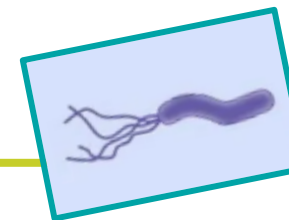


Méthaniseurs

- 4 méthaniseurs agricoles dont 1 thermophile
- 1 méthaniseur de biodéchets avec pré-étapes de pasteurisation et hydrolyse (pH4)
- 20 échantillons

Analyses physico-chimiques

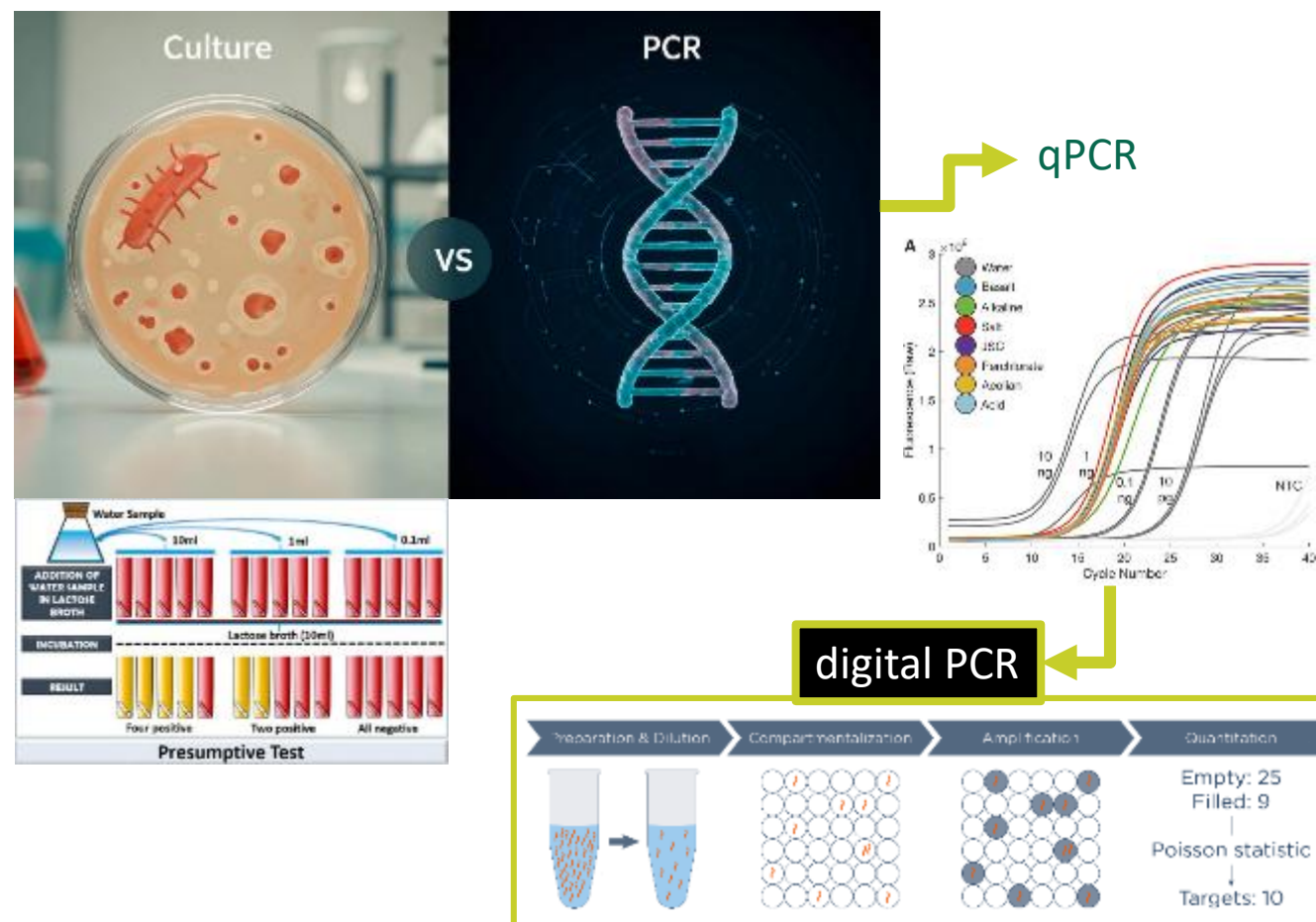
Humidité
Matière sèche
Matière Minérale
Matière organique
Carbone Organique Total
pH
Rapport MV/MS
Titre Alcalimétrique Complet (TAC)
Azote Total
Azote Ammoniacal
Phosphore Total
Potassium
Soufre total
Acides gras volatils (AGV)



Cibles microbiennes

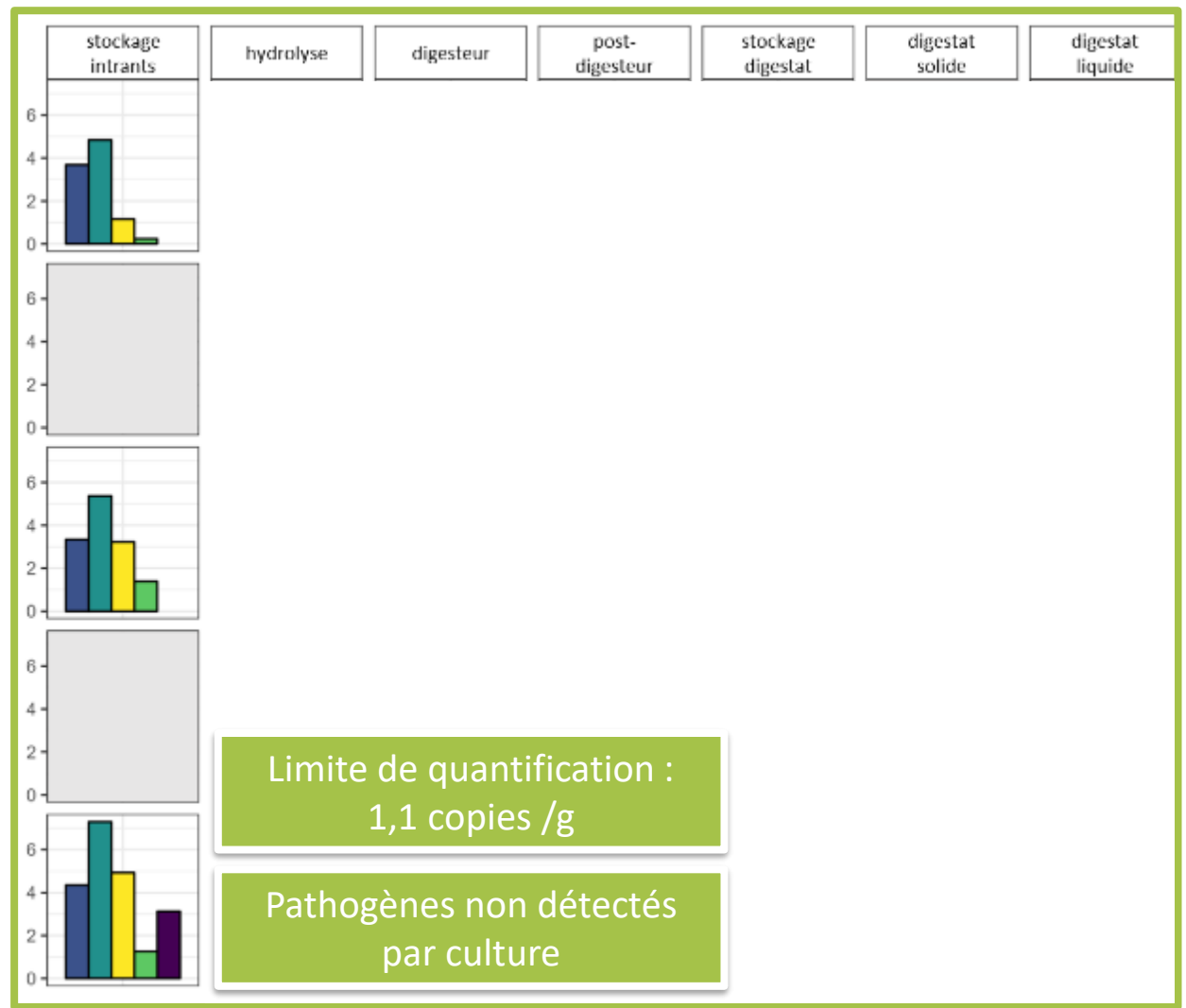
Indicateurs :	<i>Escherichia coli</i> <i>Enterococcus sp.</i> <i>Clostridium perfringens</i>
Pathogènes :	<i>Salmonella enterica</i> <i>Listeria monocytogenes</i> <i>Clostridium botulinum</i> <i>Staphylococcus aureus</i>

Le projet MethaSeq : matériel et méthodes



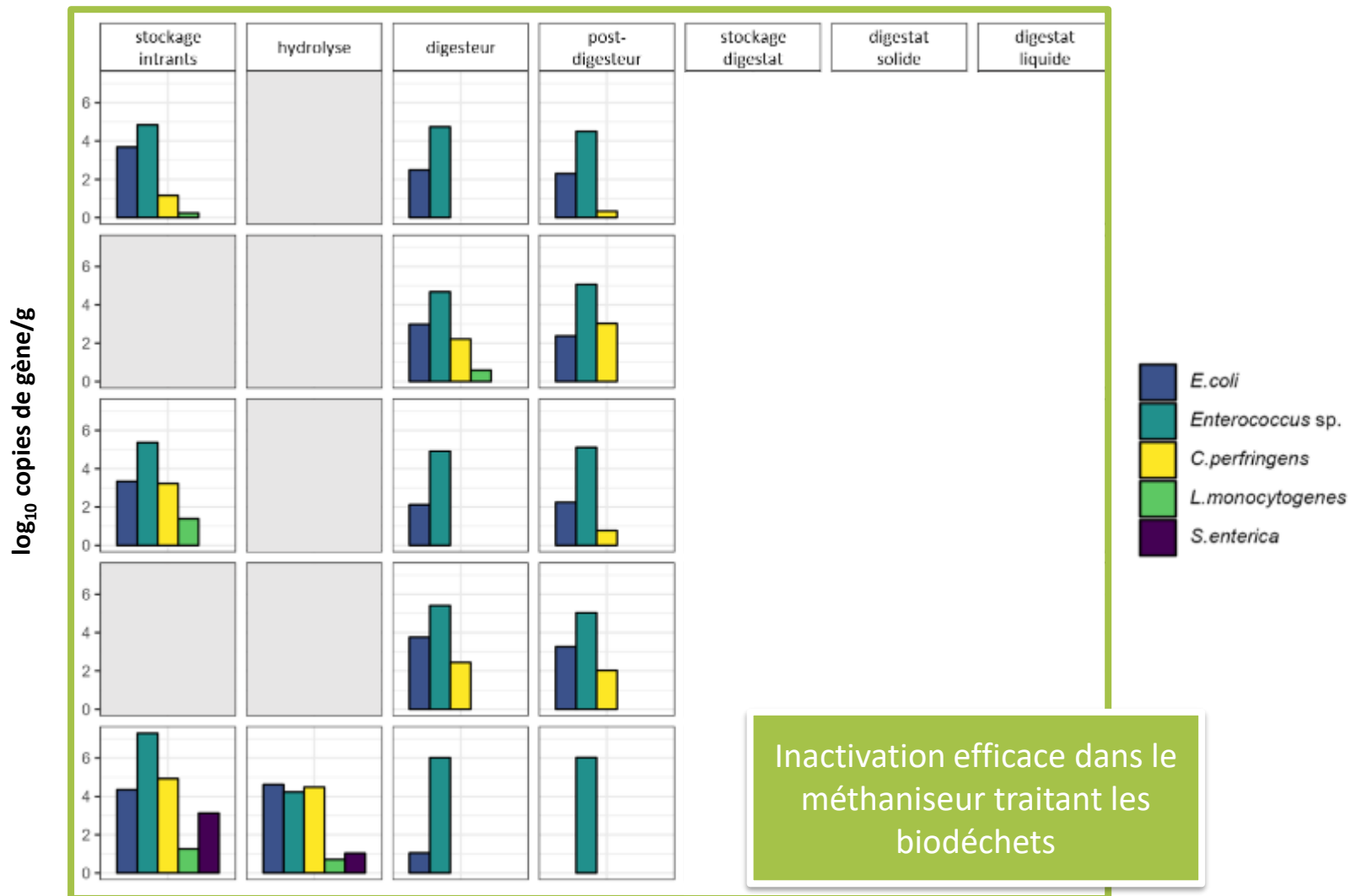
Concentrations dans 5 méthaniseurs - dPCR

- Méthaniseur 1 agricole thermophile
- Méthaniseur 2 agricole
- Méthaniseur 3 agricole
- Méthaniseur 4 agricole
- Méthaniseur 5 Biodéchets pasteurisation hydrolyse



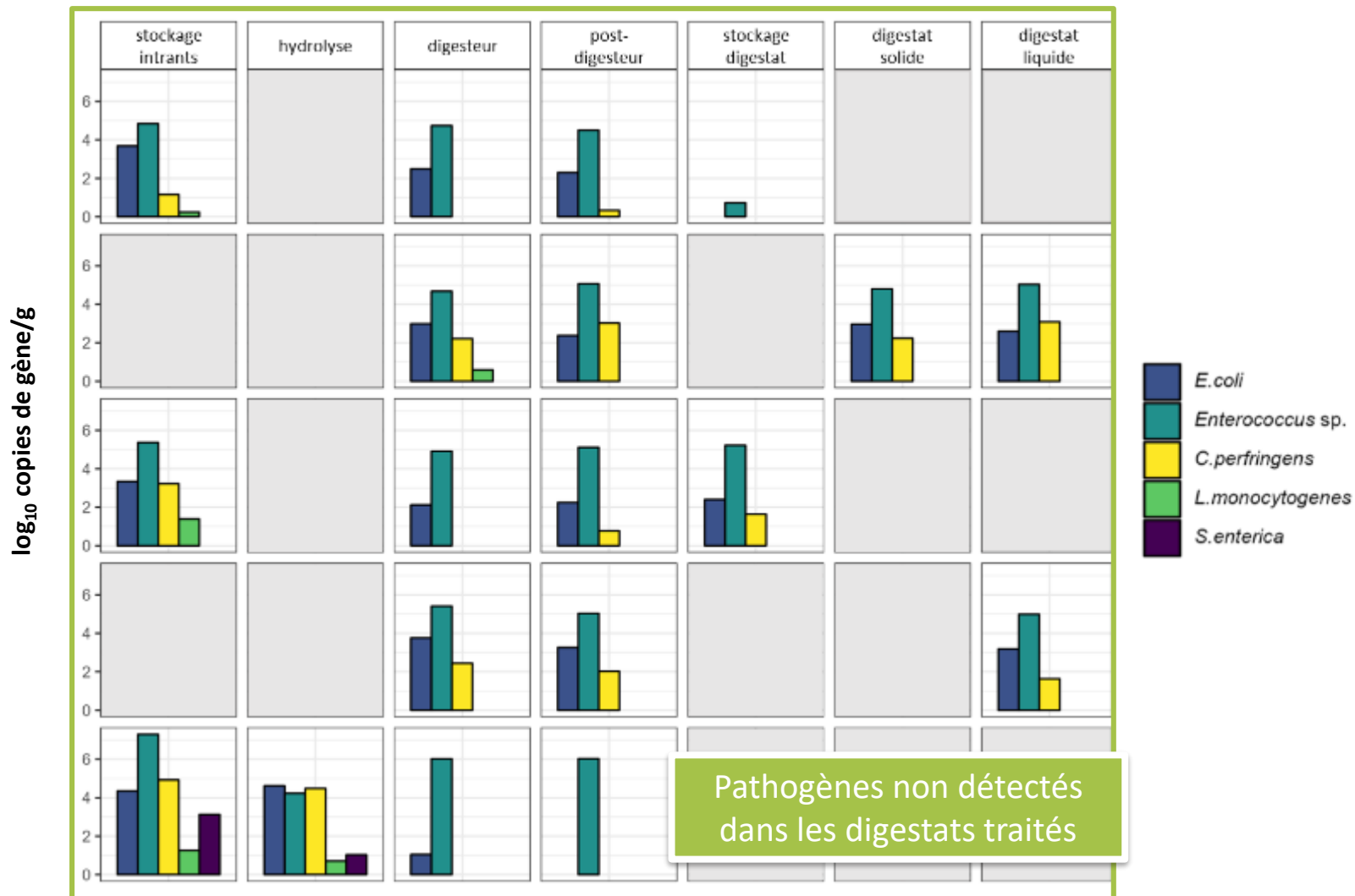
Concentrations dans 5 méthaniseurs - dPCR

- Méthaniseur 1 agricole thermophile
- Méthaniseur 2 agricole
- Méthaniseur 3 agricole
- Méthaniseur 4 agricole
- Méthaniseur 5 Biodéchets pasteurisation hydrolyse

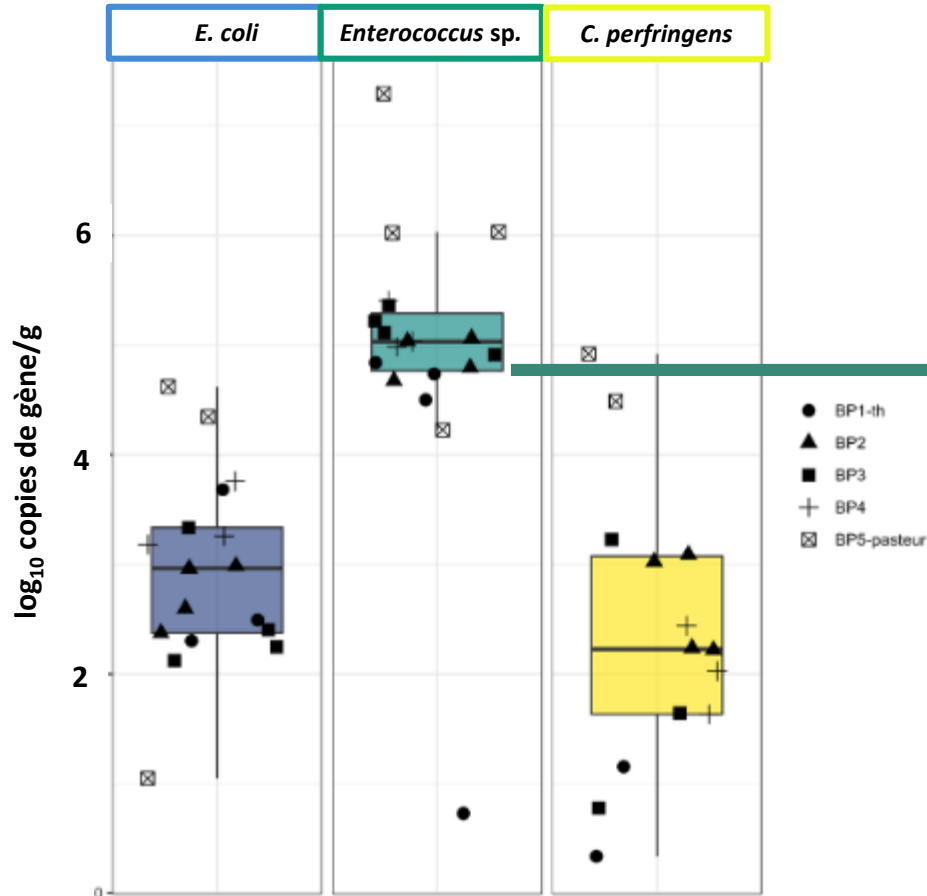


Concentrations dans 5 méthaniseurs - dPCR

- Méthaniseur 1 agricole thermophile
- Méthaniseur 2 agricole
- Méthaniseur 3 agricole
- Méthaniseur 4 agricole
- Méthaniseur 5 Biodéchets pasteurisation hydrolyse

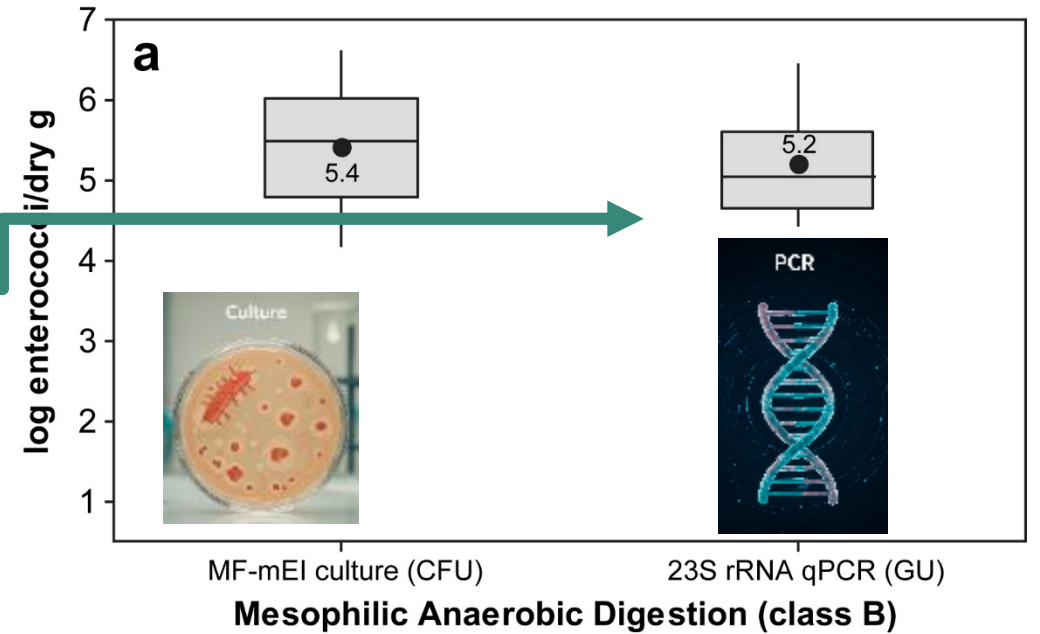


Devenir des indicateurs



Résistance des entérocoques au traitement

Comparaison avec des méthaniseurs aux USA (n=13)



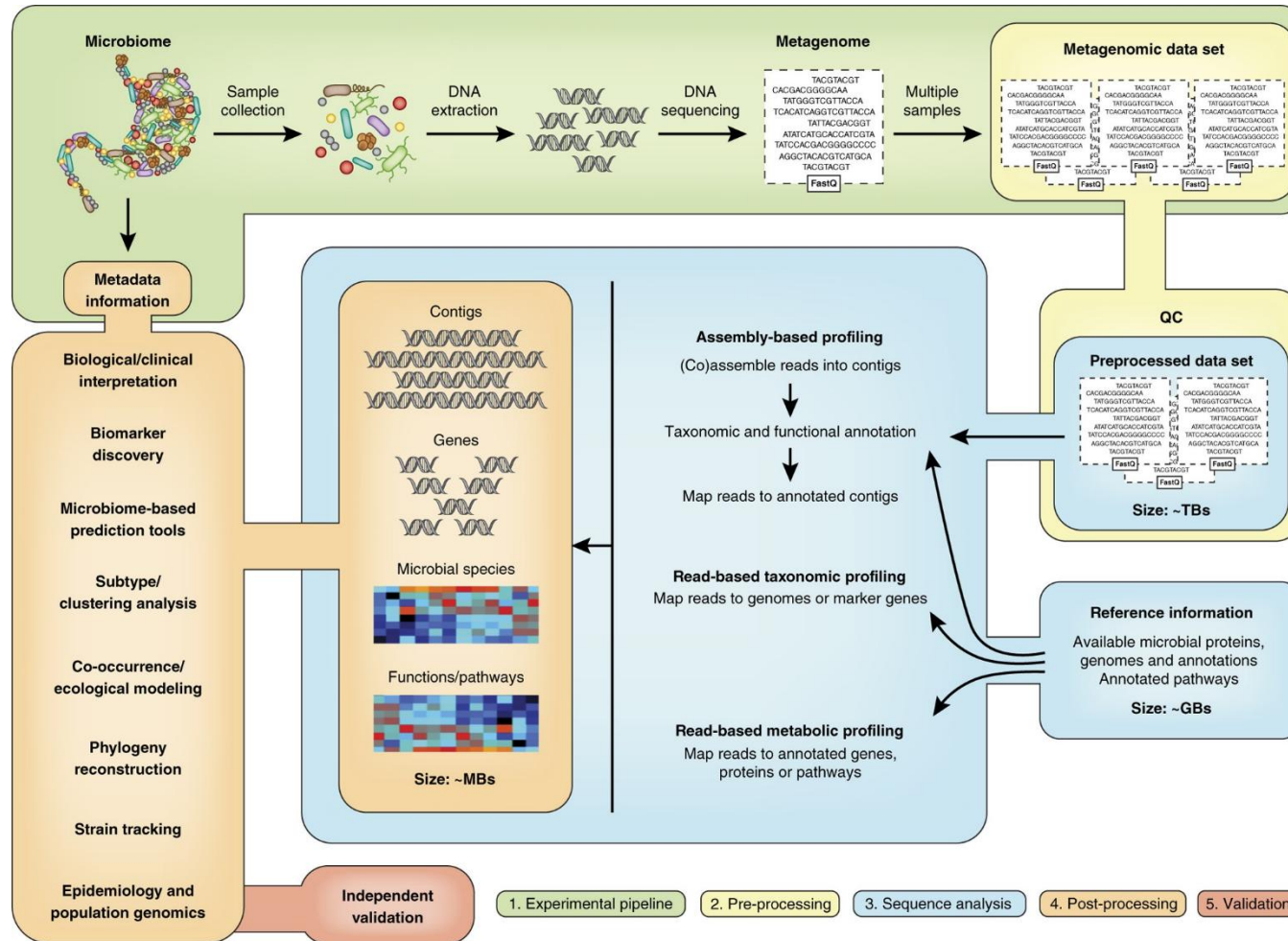
Water Research

Volume 43, Issue 19, November 2009, Pages 4878-4887



Evaluation of the enterococci indicator in biosolids using culture-based and quantitative PCR assays

Abondances relatives déterminées par métagénomique

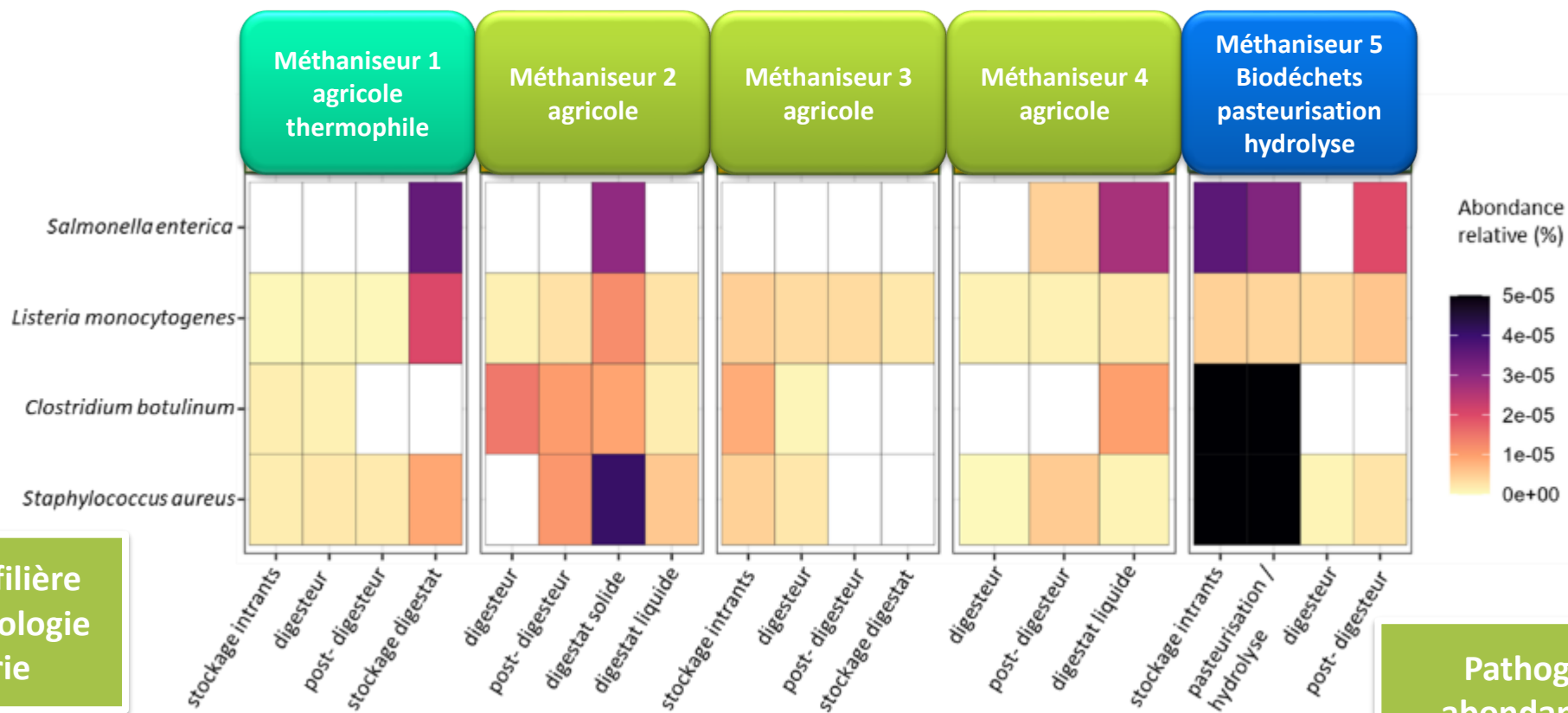


La métagénomique permet d'étudier en une seule analyse les bactéries pathogènes, virus, parasites, gènes d'antibiorésistance, de virulence etc.

affiliation par Kraken v2.1.2 (match k-mers de chaque read à la base de données NT NCBI), estimation de l'abondance par Bracken v2.7

Quince, C. et al. Shotgun metagenomics, from sampling to analysis. *Nat Biotechnol* 35, 833–844 (2017). <https://doi.org/10.1038/nbt.3935>

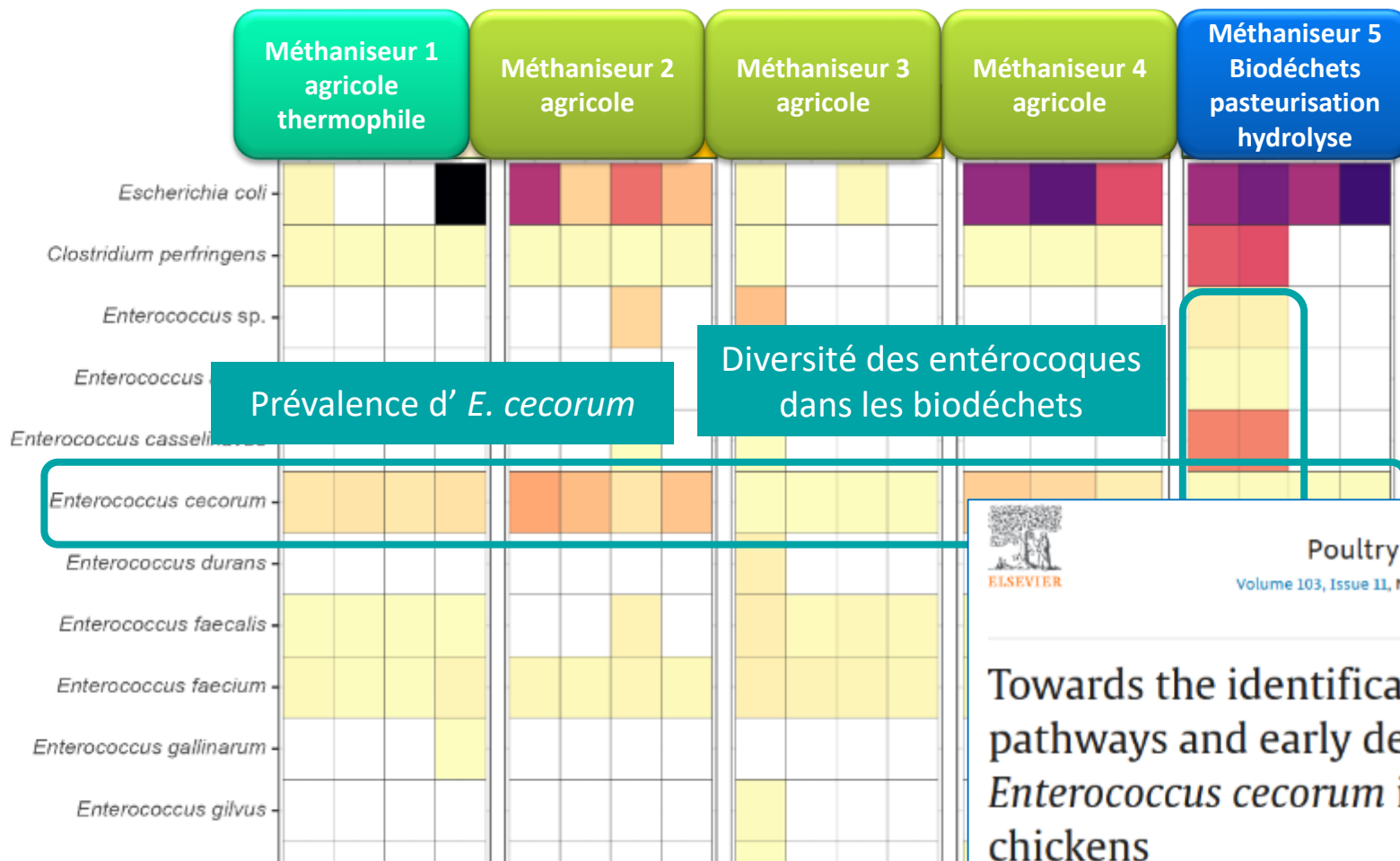
Abondances relatives des pathogènes dans 5 méthaniseurs - métagénomique -



Devenir sur la filière fonction de l'écologie de la bactérie


Pathogènes plus abondants dans les biodéchets, inactivation par le procédé

Abondances relatives des indicateurs dans 5 méthaniseurs - métagénomique -





Prévalence d' *E. cecorum*

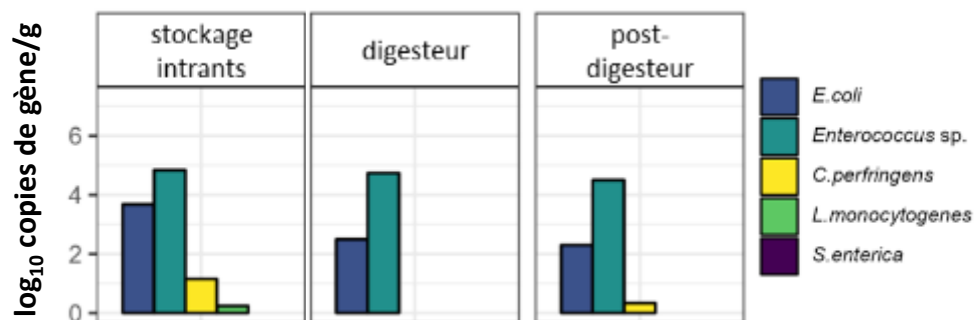
Diversité des entérocoques dans les biodéchets


Poultry Science
 Volume 103, Issue 11, November 2024, 104224

Towards the identification of transmission pathways and early detection of *Enterococcus cecorum* infection in broiler chickens

K. Watson *  , L. Arais †, S. Green †, P. O'Kane ‡, M. Kirchner †, T. Demmers † #, C. Commins ‡, R. Smith *, G. Cordonni †, I. Kyriazakis ‡, A. Schock †, M.F. Anjum †

Traitements thermophiles : viabilité et cultivabilité

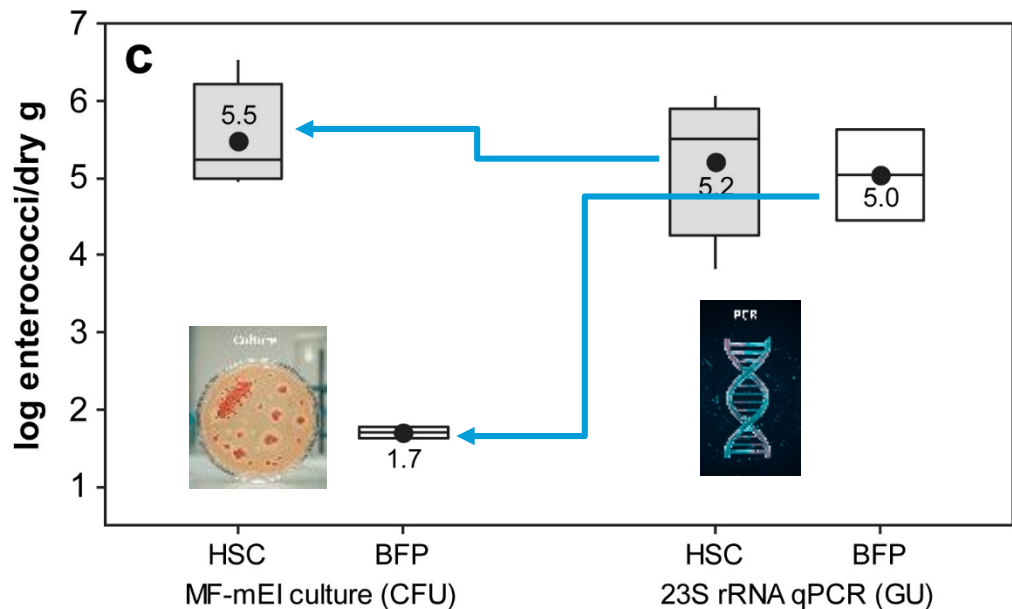


Inactivation par le méthaniseur thermophile

	<i>E. coli</i> (CFU g ⁻¹)	<i>Enterococcus</i> spp. (CFU g ⁻¹)	<i>C. perfringens</i> (CFU g ⁻¹)
Tank receiving waste	2.5x10 ⁴	1.2x10 ³	2.5x10 ²
Digester	<100	<100	3.5x10 ²
Post-digester	<100	<100	8.8x10 ²
Digestate tank	<100	<100	1.1x10 ³

Efficacité du traitement thermophile inférieure quand mesurée par PCR

Traitements thermophiles : viabilité et cultivabilité



Temperature-Phased Anaerobic Digestion (class A)

HSC = high-speed centrifuge dewatering, BFP = belt-filter press

- Salmonella spp.**
- cultivables (MPN, ▲)
 - viables (RT-qPCR, ○)
 - totales (qPCR assay, ■)

Journal of Applied Microbiology

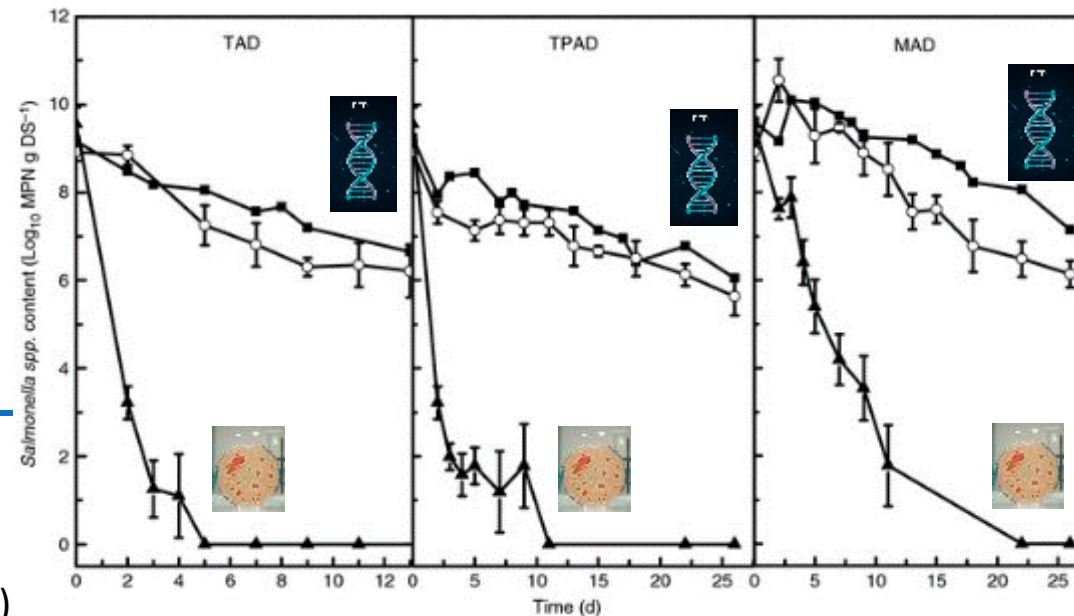


Journal of Applied Microbiology ISSN 1364-5072

ORIGINAL ARTICLE

Quantification of viable but nonculturable *Salmonella* spp. and *Shigella* spp. during sludge anaerobic digestion and their reactivation during cake storage

B. Fu^{1,2,*}, Q. Jiang^{1,2,*}, H.-B. Liu^{1,2} and H. Liu^{1,2}



Messages clefs

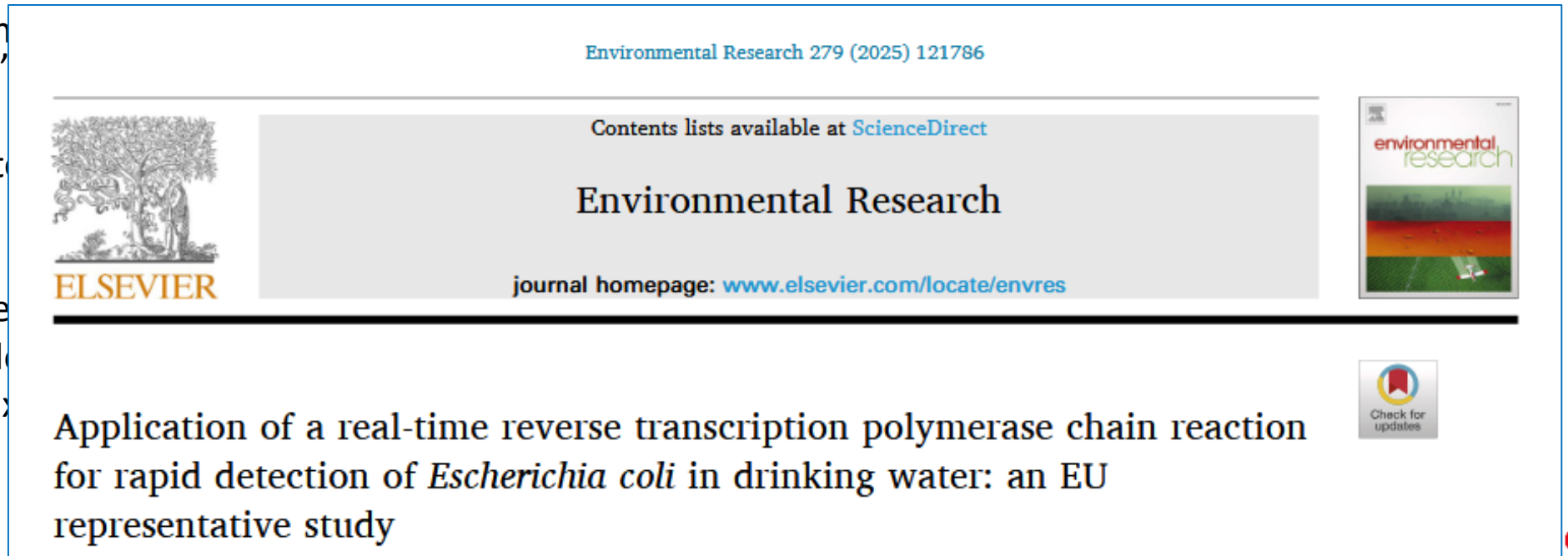
- Combiner la dPCR pour la quantification et la métagénomique pour la recherche multi-cibles permet d'avoir une vision élargie des contaminants microbiologiques, avec une grande sensibilité
- La dynamique des contaminants reflète leur écologie et leur résistance aux stress environnementaux.
- La métagénomique a permis de révéler la prévalence de *E. cecorum* sur la filière.

• La présence d'un danger n'est pas suffisante

• L'efficacité

Pour la filière

- Intégrer la
- Nouveaux



Environmental Research 279 (2025) 121786

Contents lists available at ScienceDirect

Environmental Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/envres

Check for updates

Application of a real-time reverse transcription polymerase chain reaction for rapid detection of *Escherichia coli* in drinking water: an EU representative study



Marina Moletta-Denat

Partenaires et valorisation du projet METHASEQ

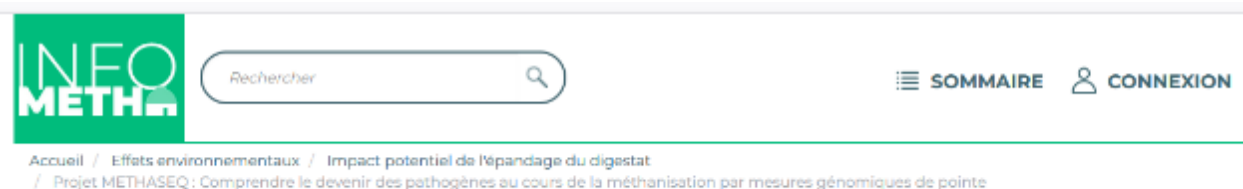
M. Moletta-Denat¹, O. Azam¹, A.-M. Pourcher², M. Manno³, B. Zennaro¹, E. Bonin³, A. Bonnafous⁴, P. Chenon⁵, A. Leboucher⁶, L. Alvarez-Fraga⁴, J.-J. Godon⁴, A. Haumont⁸, L. Aubeut-Chojnacki⁷, N. Wéry⁴

¹INRAE Transfert - Metys, 11110, Narbonne ; ²INRAE, OPAALE, CS 64427, 35044 Rennes

³INRAE Transfert - Metys- Service Génomique, Plateforme GeT-PlaGe, Castanet-Tolosan

⁴INRAE, Univ Montpellier, LBE, 102 Avenue des Étangs, 11110 Narbonne

⁵VoxGaia, 68400 Riedisheim ; ⁶Ministère de l'agriculture, Paris; ⁷GRDF -Direction biométhane, Saint-Denis ; ⁸Association AILE



PROJET METHASEQ : COMPRENDRE LE DEVENIR DES PATHOGÈNES AU COURS DE LA MÉTHANISATION PAR MESURES GÉNOMIQUES DE POINTE



Farah Doumit





ETUDE DE L'IMPACT DES ALTERNATIVES AUX BACHES PLASTIQUE CONVENTIONNELLES POUR LA COUVERTURE DES SILOS D'ENSILAGE EN METHANISATION

C. VAN VLIERBERGHE¹, M. DUBROUS^{1,2}, G. GUIZARD¹,
L. LE LEUNE², F. DUCHATEAU², R. ESCUDIE¹

¹INRAE, LBE, Avenue des étangs, F-11100, Narbonne

²GRDF, 9 rue Condorcet, F-75009, Paris

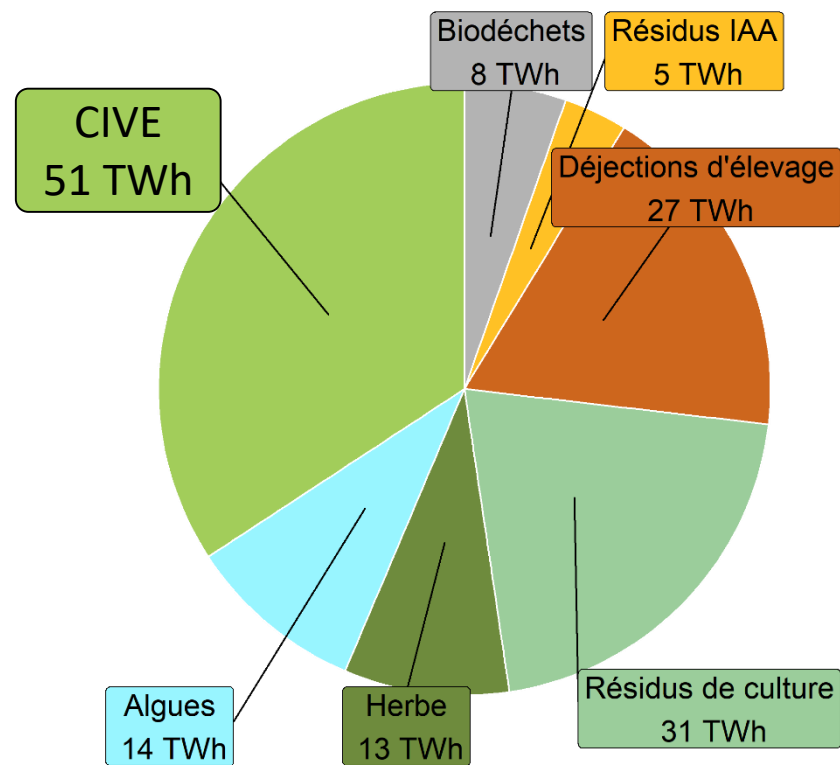
*Correspondance : clement.van-vlierberghe@inrae.fr



140 TWh/an issus de la méthanisation en 2050

Dont 51 TWh de CIVE

- CIVE : plus d'1/3 du gisement mobilisable à horizon 2050 pour la méthanisation
- Alimentation continue des méthaniseurs à partir d' 1 ou 2 récoltes annuelles
→ *Stockage de 1 an ou plus*
- Stockage des CIVE par ensilage



ADEME, 2018

Voies de dégradation de l'ensilage au cours du stockage

Dégradations biologiques aérobies

- Pertes de masse
- Pertes énergétiques par échauffement potentiellement importantes et non quantifiées
- Emissions potentielles de GES (CO_2 , N_2O , CH_4)

Aérobie – avec O_2
Anaérobie – sans O_2

O_2

Fermentations indésirables

- Pertes de masse
- Production d'hydrogène

Effluents de silo

- Emission d'effluents riches en matière organique
Potentiels polluants des eaux de surface
- Sources d'odeurs
- Pertes énergétiques potentielles

Thèse Cifre 2018 > 2022

Stockage et prétraitement des cultures multi-services environnementaux (CIMSE) avant leur méthanisation

anrt
ASSOCIATION NATIONALE
RECHERCHE TECHNOLOGIE

Cifre
COMMERCE

INRAE

GRDF
GAS RÉSEAU
DISTRIBUTION FRANCE

atee
ASSOCIATION TECHNIQUE
ÉNERGIE ENVIRONNEMENT

UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

ENS
NANCY
AIA

ctbm

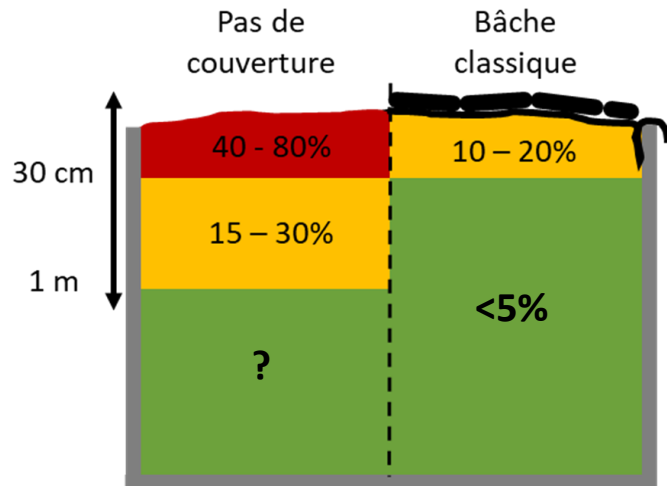
GRDF
GAS RÉSEAU
DISTRIBUTION FRANCE

natran
R&I

ENGIE

métropole
GrandNancy

Enjeux liés à la couverture des silos



Estimations des pertes potentielles

Après une semaine d'exposition à l'oxygène, la réduction du potentiel méthanogène peut atteindre 40%

Zhang et al. (2018)

Référence : couverture bâche PE

- + Préservation optimale
- + Ruissellement des précipitations
- Coût des bâches (achat, main d'œuvre, recyclage)
- Pose pénible, dépose dangereuse lors de l'ouverture (risque de chutes)
- Production de déchets (plastique)

A l'échelle d'une exploitation : 100 – 300 k€ de CA

A l'échelle de la filière française en 2050 : 5 à 15 TWh de « manque à produire » avec des pratiques de stockage inappropriées

Alternatives aux bâches PE : état de l'art

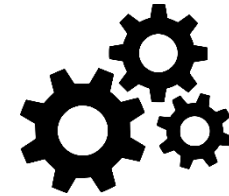


- Des tests ont été réalisés de façon isolée par des agriculteurs méthaniseurs
- Quelques essais publiés dans le cadre de l'alimentation animale
- Ils ne permettent pas d'établir de conclusions directes pour le secteur de la méthanisation mais donnent un retour d'expériences et des pistes à explorer très intéressantes
- Les émissions liées aux nouvelles pratiques (GES, effluents) n'ont pas été étudiées

*SILCOGREEN : Réduction de la consommation de plastiques en agriculture :
Couverture végétale des silos d'ensilage de maïs, 2019*

Objectifs

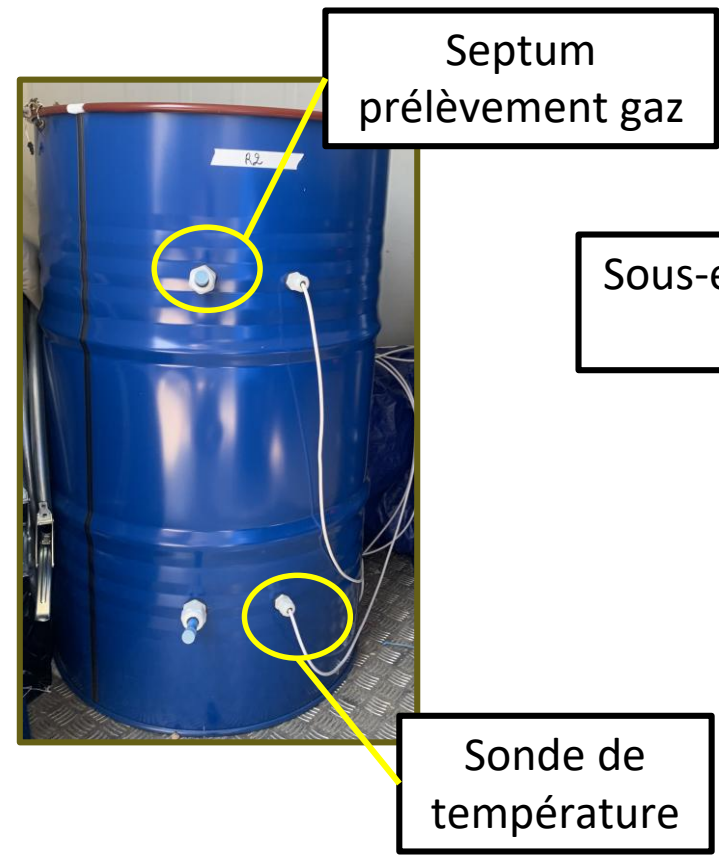
1. Développer un protocole d'essai d'ensilage à échelle pilote (200L) représentatif des conditions réelles



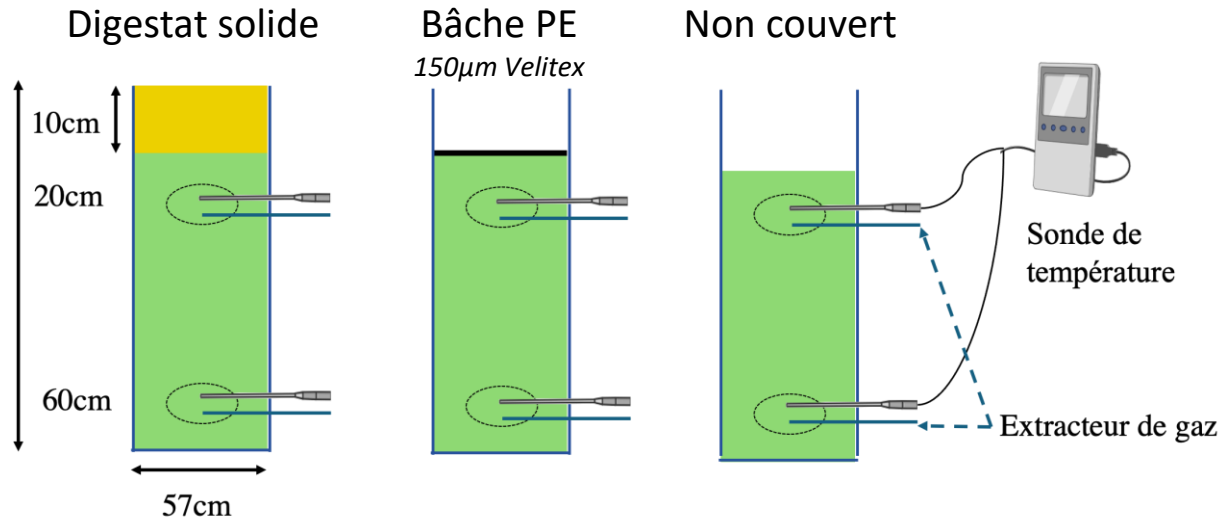
2. Quantifier les performances de stockage en fonction de trois pratiques (couvert, non couvert et substrat alternatif)



Matériel et méthodes



Matériel et méthodes



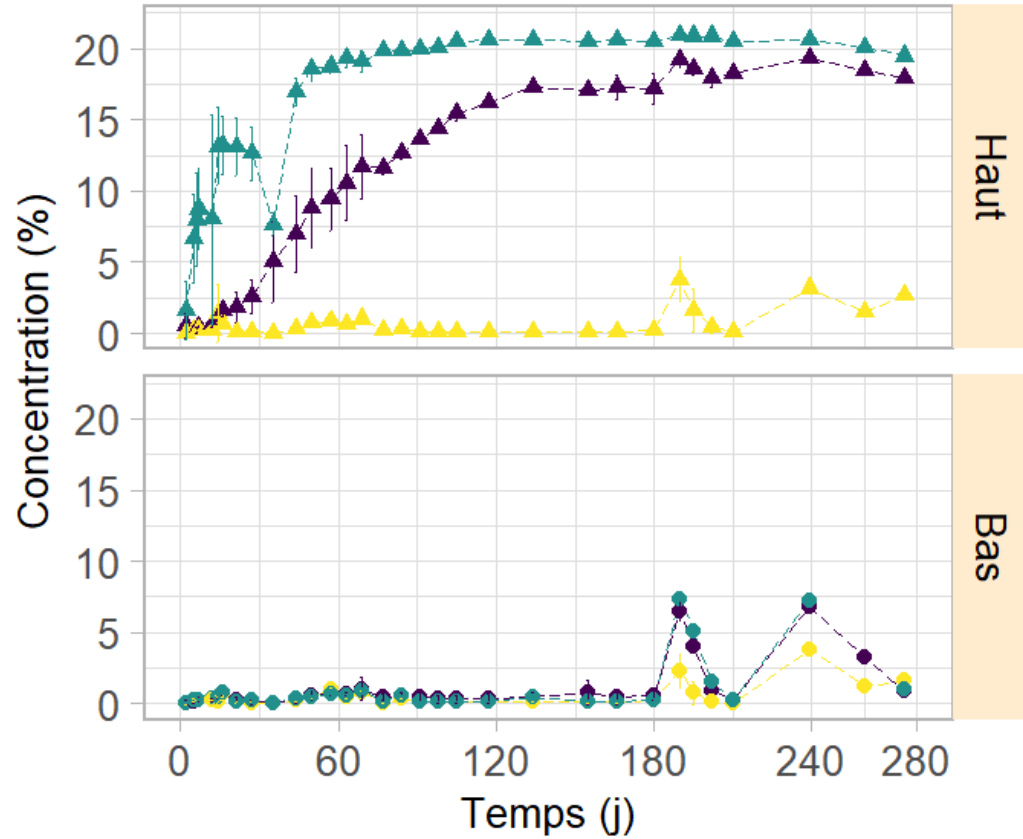
- Seigle 30% MS
- Tassement 650 kg/m³
- 130 kg de CIVE par fut

- Température
- Composition du gaz

- Echantillonnage haut et bas (filet) :
- Masse brute, MS, MV
 - Métabolites
 - BMP
 - Communautés microbiennes

Composition gazeuse

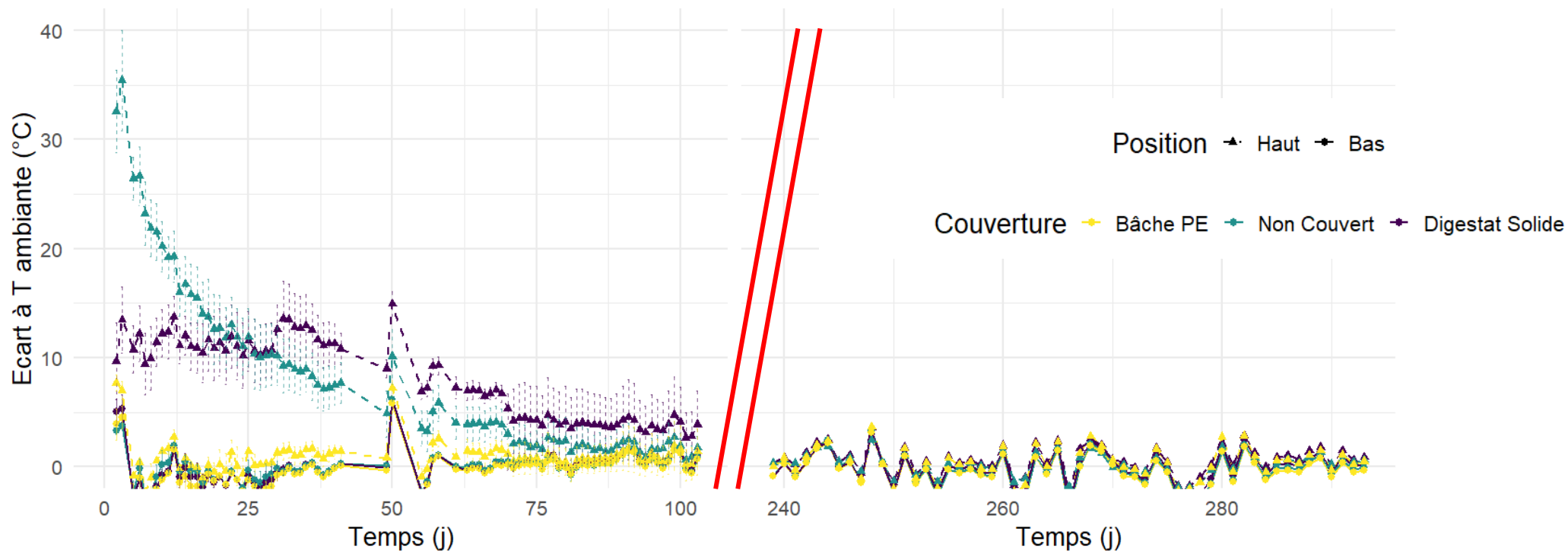
Evolution de la teneur en oxygène à l'intérieur des silos



- ▲ Haut
- Bas
- ◆ Bâche PE
- ◆ Non Couvert
- ◆ Digestat Solide

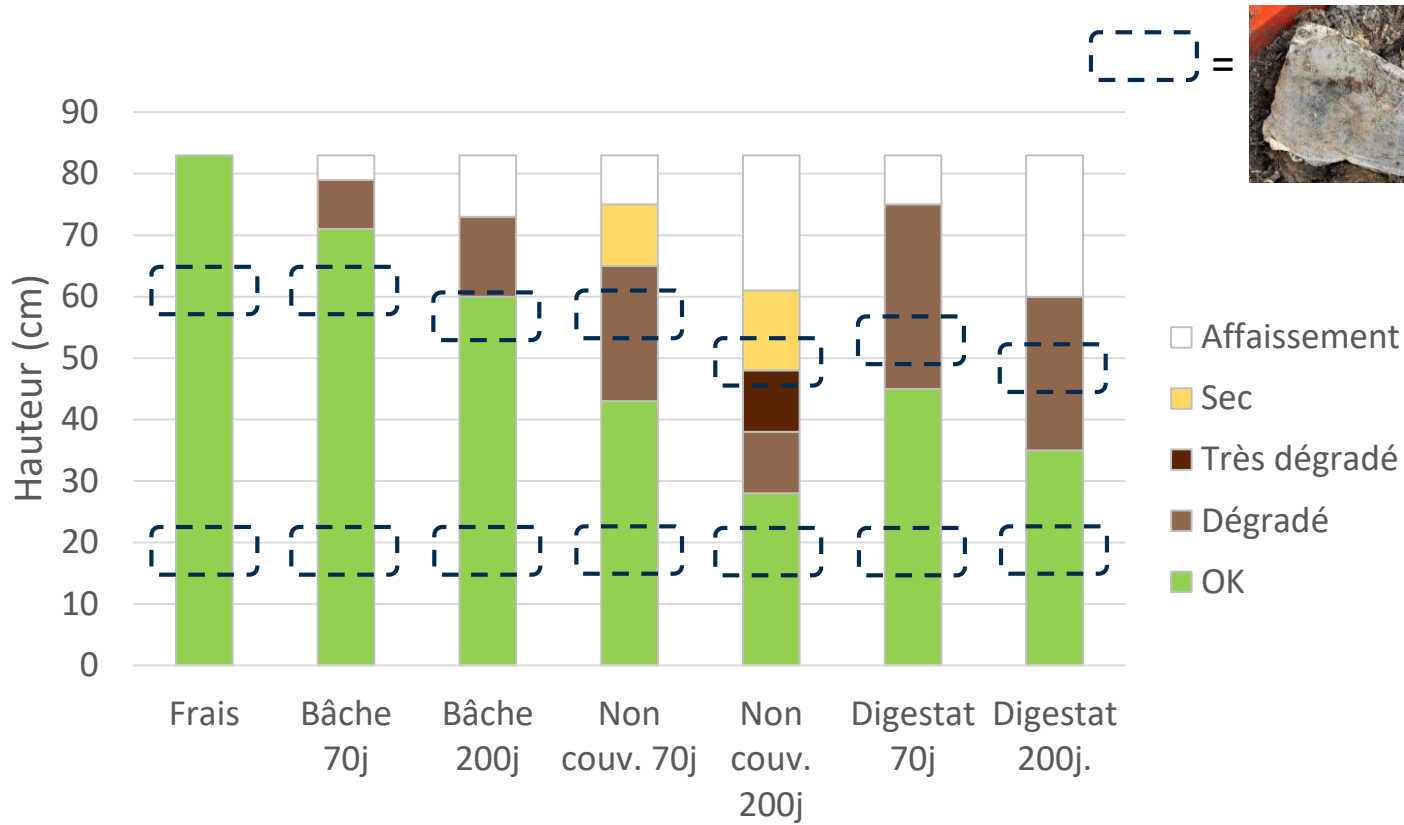
- Haut de silo: augmentation rapide de la teneur en O₂ pour les conditions « non couvert » et « digestat »
- Bas de silo : O₂ faible pour toutes les conditions
 - O₂ ne pénètre pas... ou consommé en continu

Evolution de la température



- Haut de silo: échauffement en surface (jusqu'à 60°C) pour les conditions « non couvert » et « digestat »
- Bas de silo: pas d'échauffement pour toutes conditions

Ouverture des silos : observations qualitatives et variation de masse



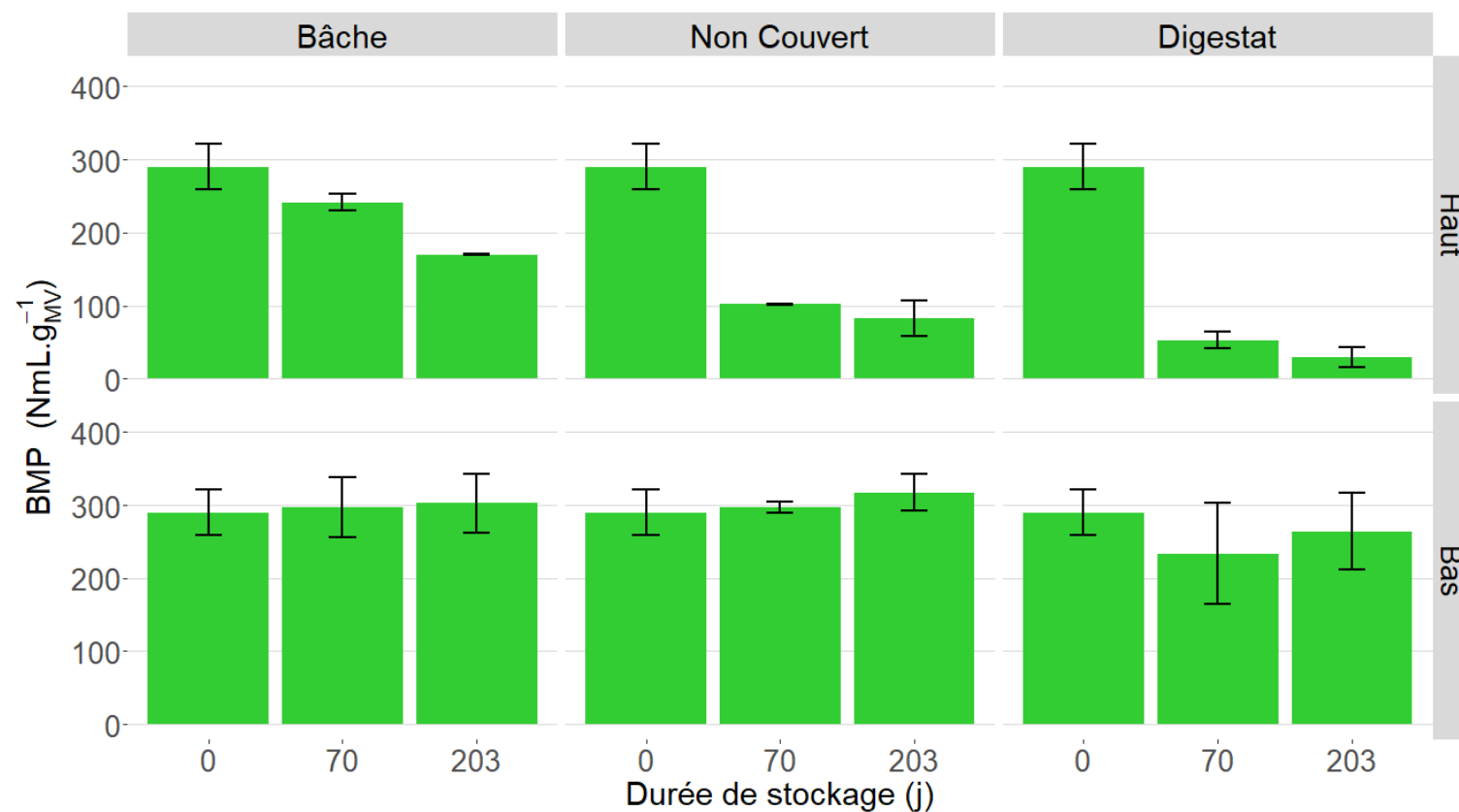
- 10 à 30 cm d'ensilage visuellement dégradé selon les conditions
- Affaissement de 25% de la hauteur initiale après 200j pour Non couvert et Digestat

Evolution de la masse (MV) au cours du stockage

	70j	200j
Bâche Haut	-22%	-29%
Bâche Bas	3%	-8%
Non couvert Haut	-40%	-37%
Non couvert Bas	-5%	-5%
Digestat Haut	-55%	-68%
Digestat Bas	-18%	-17%

Variation du potentiel méthanogène

Valeurs de BMP ramenées à la masse initiale (prise en compte des pertes)



- Pertes de 40 à 90% de BMP en surface
- Bâche et NC à 60cm: BMP préservé
- Digestat à 60 cm: Diminution du BMP de 10 à 20%, *non significatif*

pH et profil métabolique

200j de stockage

Ensilage « frais »					
	Frais				
pH	4,3 ± 0				
Lactate	31,3 ± 4,7				
Acétate	7,3 ± 0,8				
Butyrate	0,2 ± 0,2				
		Haut	Bâche	Non Couvert	Digestat
		pH	7,8 ± 0	8,7 ± 0	7,6 ± 0,2
		Lactate	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		Acétate	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		Butyrate	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		Bas			
		pH	4,4 ± 0	4,4 ± 0	5 ± 0
		Lactate	30,7 ± 3,6	24,9 ± 1	0 ± 0
		Acétate	54,7 ± 6,4	57,6 ± 2,1	40,1 ± 2,1
		Butyrate	0 ± 0	0 ± 0	33,4 ± 1,8

- Profil métabolique impacté par la méthode de couverture à – 60 cm

➤ Perturbations liées à la pénétration d'air avec cinétique très lente ?

Conclusions et perspectives

- Pilote échelle 200L : suffisant pour observer les phénomènes d'échauffement
- Avec un tassement optimal, les dégradations à 60 cm et + après 200j d'ensilage semblent limitées
- Ces résultats sont à confirmer/valider à échelle réelle (impact des précipitations, du vent)
- L'impact de la méthode de couverture sur les émissions de GES (CO_2 , CH_4 , N_2O) au cours du stockage est à quantifier pour évaluer l'impact environnemental global des solutions alternatives.

Merci pour votre attention

Remerciements



Aurélien et Bérenger Carrier
Biomethagri34



PROCÉDÉS ET VALORISATION

BIOMÉTHANATION IN SITU, ROBUSTESSE ET CHANGEMENT D'ÉCHELLE

Animateur

Pierre Fontanille

1 **Christine Peyrelasse, APESA**

METHASCALE : reproductibilité et transférabilité des résultats au cours des changements d'échelle en méthanisation

2 **Lucia Braga Nan, LBE INRAE**

Evaluation de la robustesse de la biométhanation in situ face aux surcharges organiques et d'hydrogène

3 **Tatiana Segura, INRAE, Université de Montpellier, LBE, ENGIE Lab CRIGEN**

Modélisation de la biométhanation in situ

4 **Anne-Laure Borg, ENGIE**

De la digestion anaérobie à l'électrométhanogénèse : rôle des biofilms électroactifs pour maximiser la conversion de substrats complexes réels en biométhane



METHASCALE

*Changement d'échelle de la méthanisation : étude comparative
du pilote de laboratoire à l'unité préindustrielle*

C. Peyrelasse¹, A. Battimelli³, H. Carrere³, M. Heredia⁴, A. Lallement¹, F. Monlau², S. Marsac⁴,
C. Sambusiti², C. Van Vlierberghe³

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

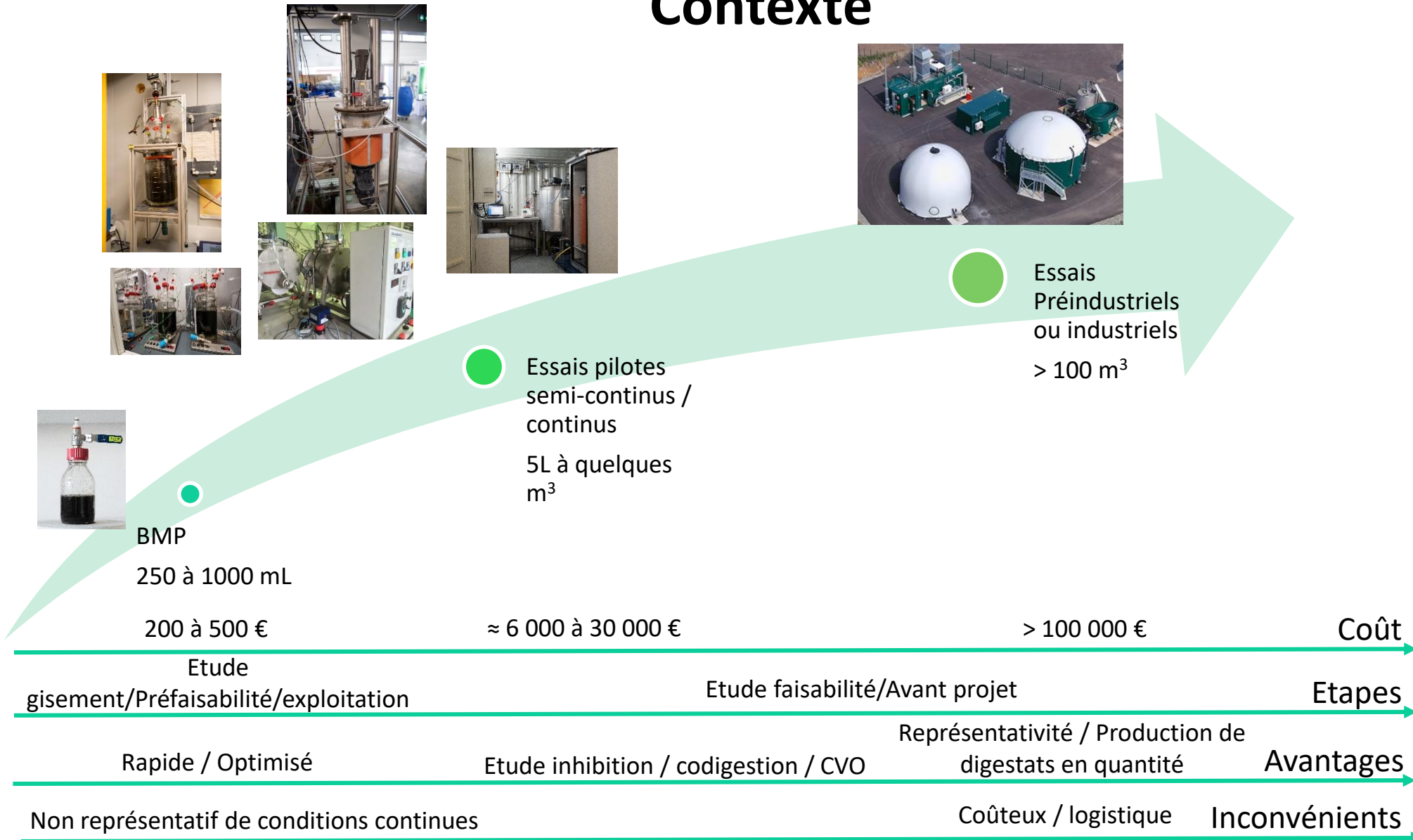
2 TotalEnergies - Pôle d'études et de Recherche de Lacq (PERL), 64170 Lacq, France.

3 INRAE – Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, 102 Av. des Étangs, 11100 NARBONNE, France.

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



Contexte



Projet



WP 1 COORDINATION



WP 2 Essai inter-laboratoires

- 2.1. Calibrage des méthodes d'analyses (FOS/TAC, ammonium, AGVs, analyse biogaz, BMP...)
- 2.2. Comparaison des performances entre les trois laboratoires sur des pilotes de 4L



WP 3 Reproductibilité et transférabilité

- 3.1 Mise en place des essais
- 3.2 Comparaison des paramètres de performances et biologiques
- 3.3 Comparaison des paramètres agronomiques

WP 4 COMMUNICATION

Organisation d'un workshop sur les essais pilote
Synthèse et rédaction d'un guide de bonne pratique
Rédaction articles scientifiques et communication
Organisation d'un webinaire de fin de projet



Reproductibilité et transférabilité : les réacteurs



150 m³



20 L



12 L



5 L

Reproductibilité et transférabilité : les réacteurs

	150 m ³	Pilote 20 L	Pilote 12 L	Pilote 5 L
Tamissage inoculum	non	non	non	Oui 5 mm
Préparation intrants solides	Broyeur à couteaux Börger (16,5 mm) RR6000	-	Découpage grossier au ciseau	Séchage à 38°C puis broyage
Fréquence d'alimentation	4 x / jour 7 j / sem	1 x / jour 5 j / sem	1 x / jour 5 j / sem	1 x / jour 5 j / sem
Volume utile (L) réacteur	150 000	20	12	5
Pesage réacteur	Non	oui	oui	oui
Type d'agitation	Mécanique	Mécanique	Mécanique	Mécanique
Compteur de gaz	Endress +Hauser Prosonic Flow 200 <i>Ultrasons</i>	TG05 Ritter® <i>Volumique</i>	MGC 1 v 3 Ritter® <i>Volumique</i>	MGC 1 v 3.3 Ritter® <i>Volumique</i>
Fréquence d'analyse de gaz	6 x / jour	1 x / jour	1 x / jour	1 x / jour
Analyse de gaz	SEWERIN Multitec 54x (Infra-Rouge)	Micro GC Agilent 990	Clarus 480 GC, Perkin Elmer	Micro GC Agilent 990
Normalisation des analyses de gaz T°C/P	oui	oui	oui	oui
Pesage digestat extrait	non	oui	oui	oui

Reproductibilité et transférabilité : le suivi



Paramètres opératoires

- Température
- CVO (kg MV / m³ /j) et TSH (j)
- Intrants (ton/j, MS/MV, BMP)



Paramètres de performances

- Teneur en méthane et autres gaz (CO₂, H₂S)
- Débit de gaz produit



Paramètres biologiques

- pH/Redox
- Ammonium
- FOS / TAC
- AGV
- Communautés microbiennes (ADN)

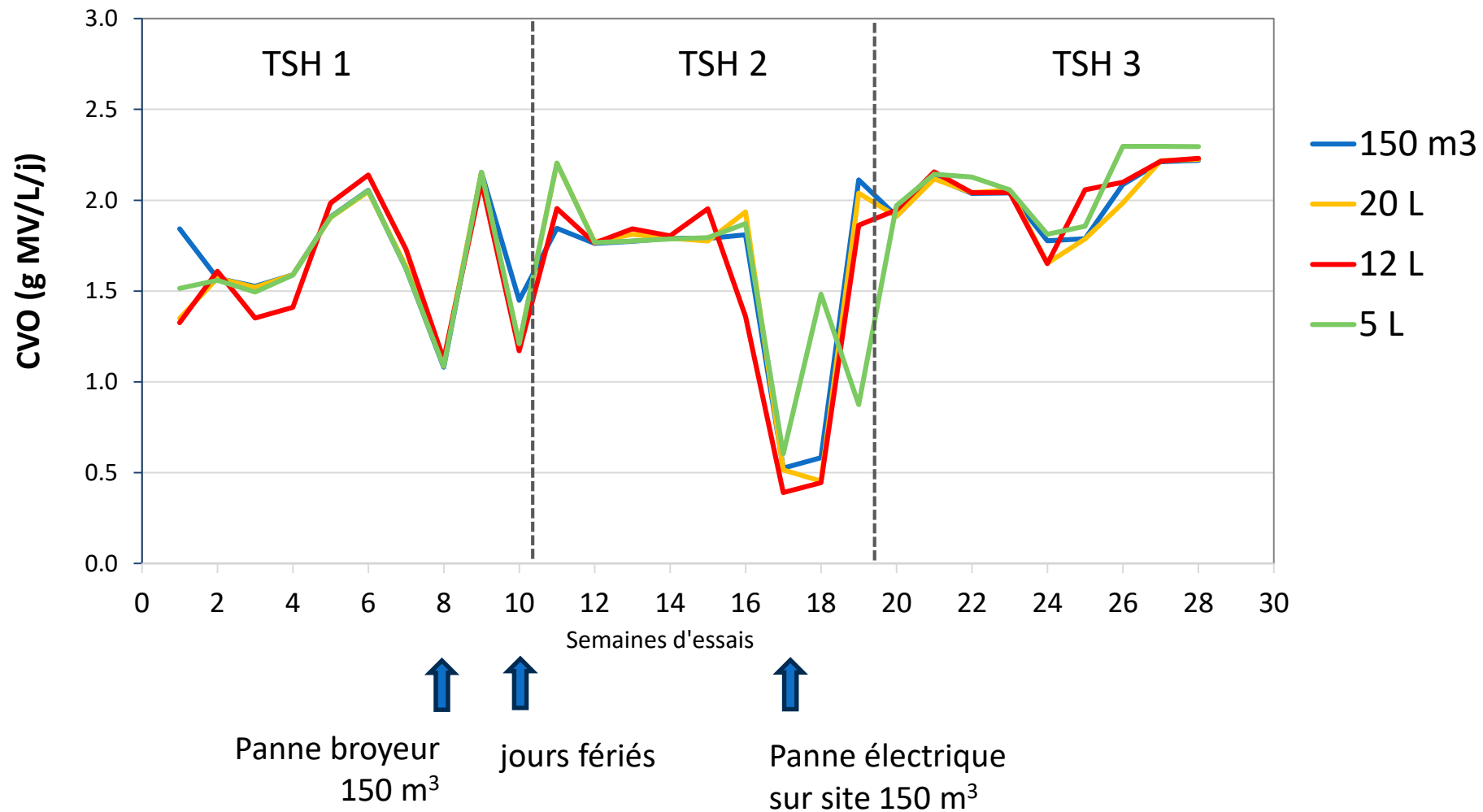


Qualité du digestat

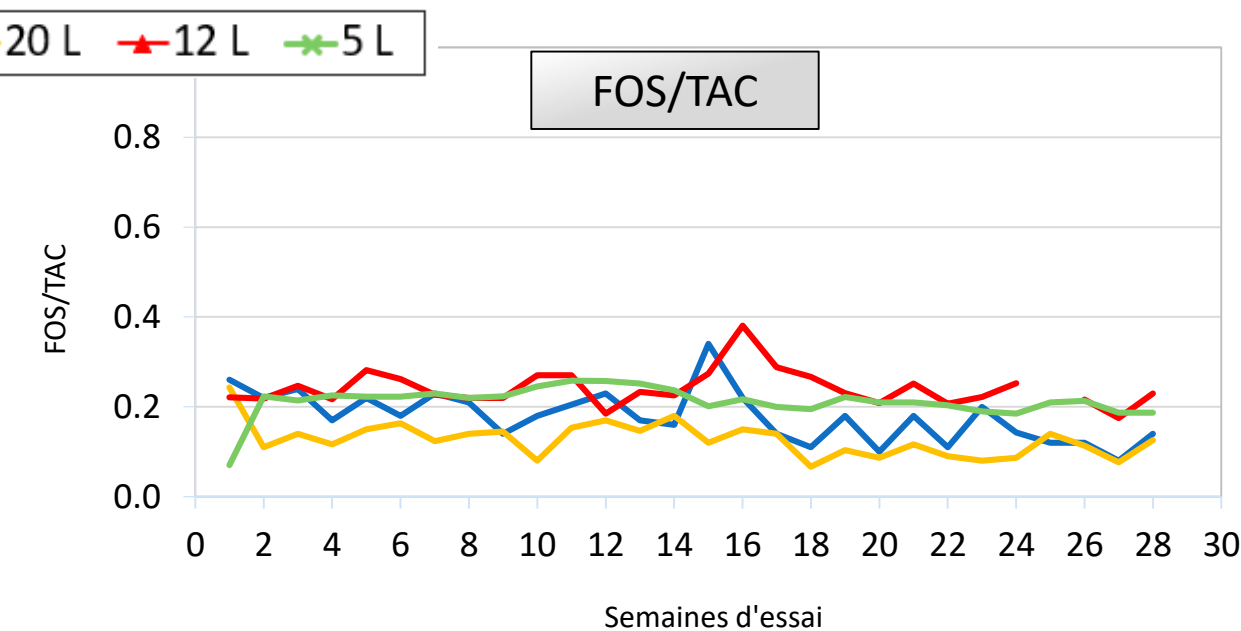
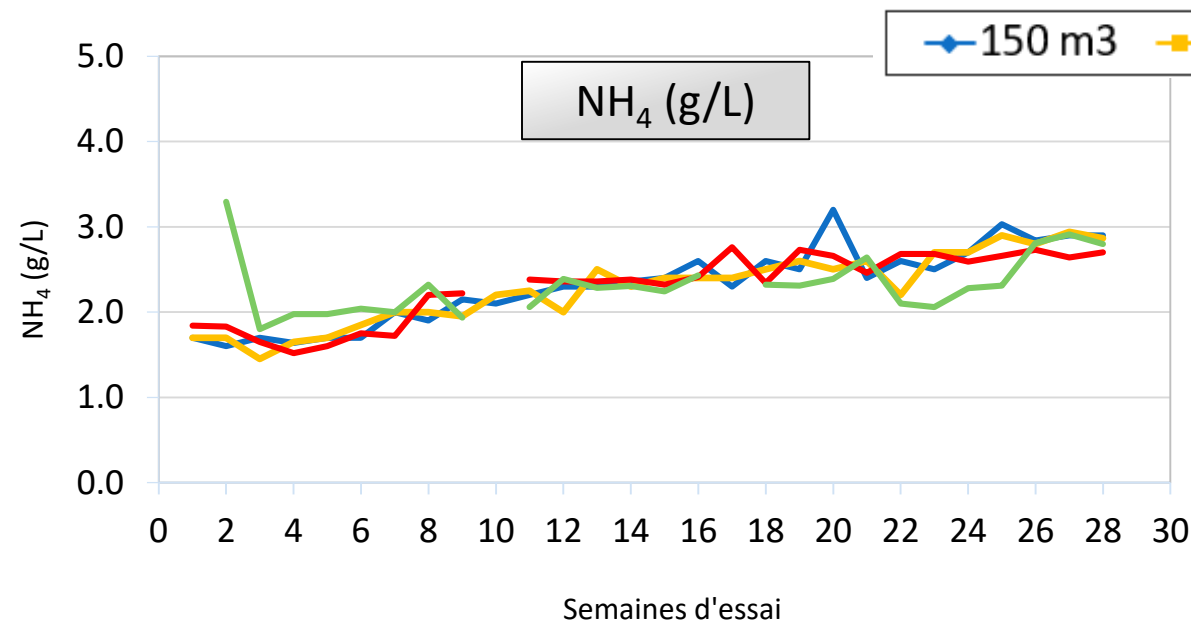
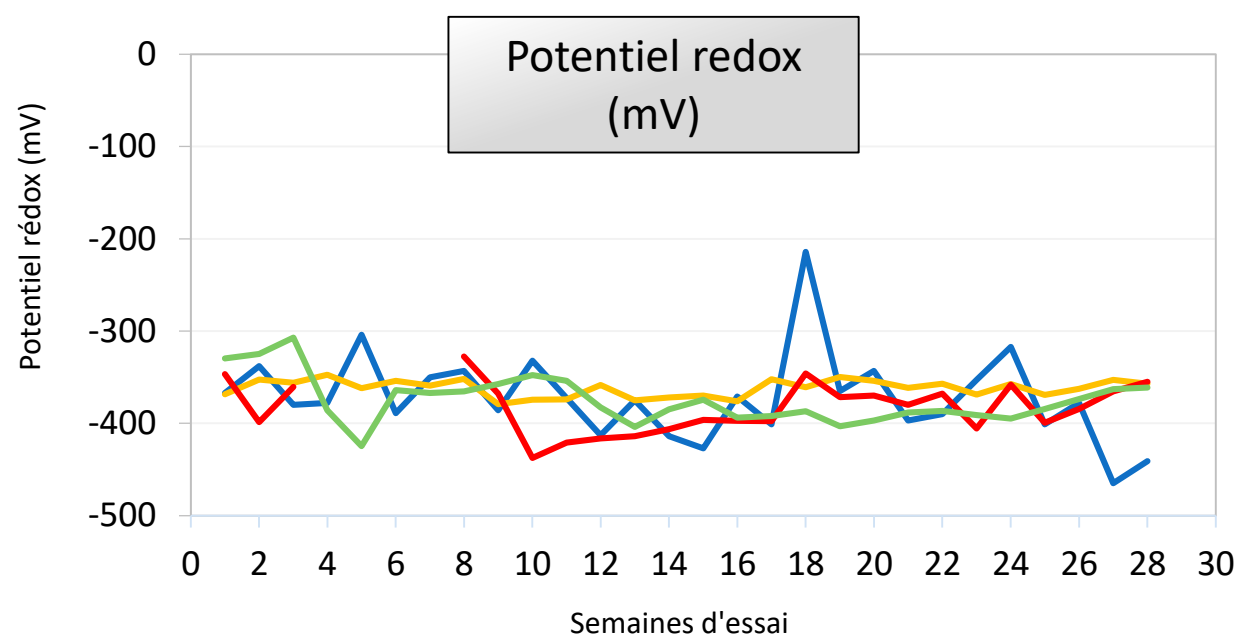
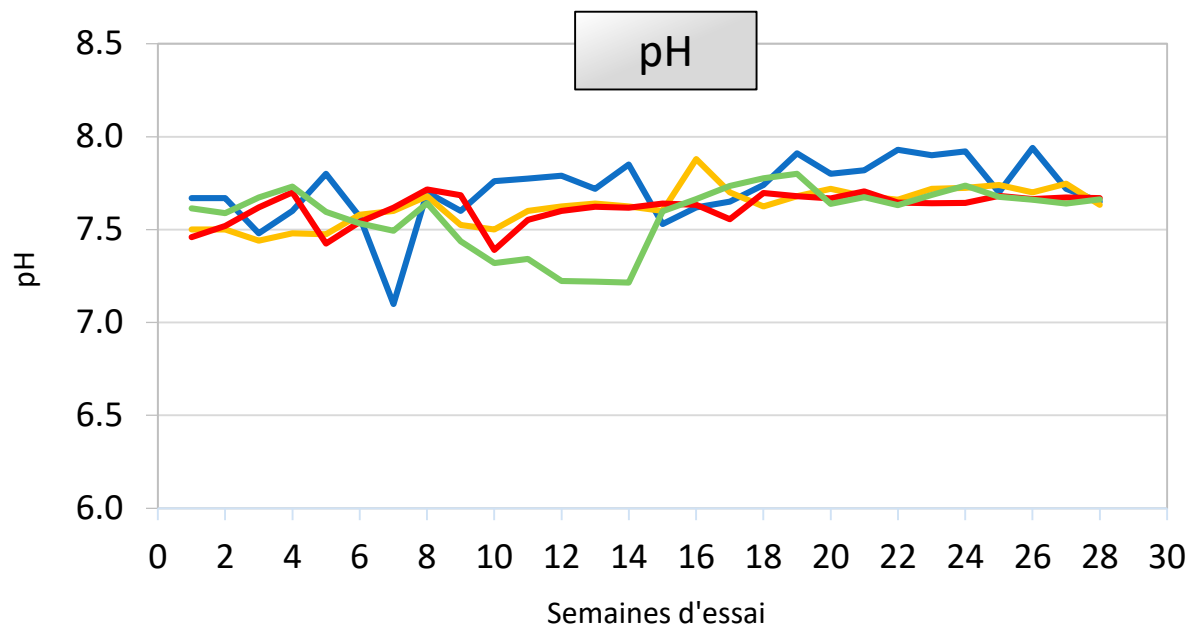
- Teneur en MS / MV
- Nutriments (N, P, K, S, Mg Ca)
- ETM et CTO
- Pathogène (*E. Coli*, Salmonelle)
- Viscosité

Reproductibilité et transférabilité : charges appliquées

Charge cible de 2,2 g MV/L/j



Reproductibilité et transférabilité : suivi biologique



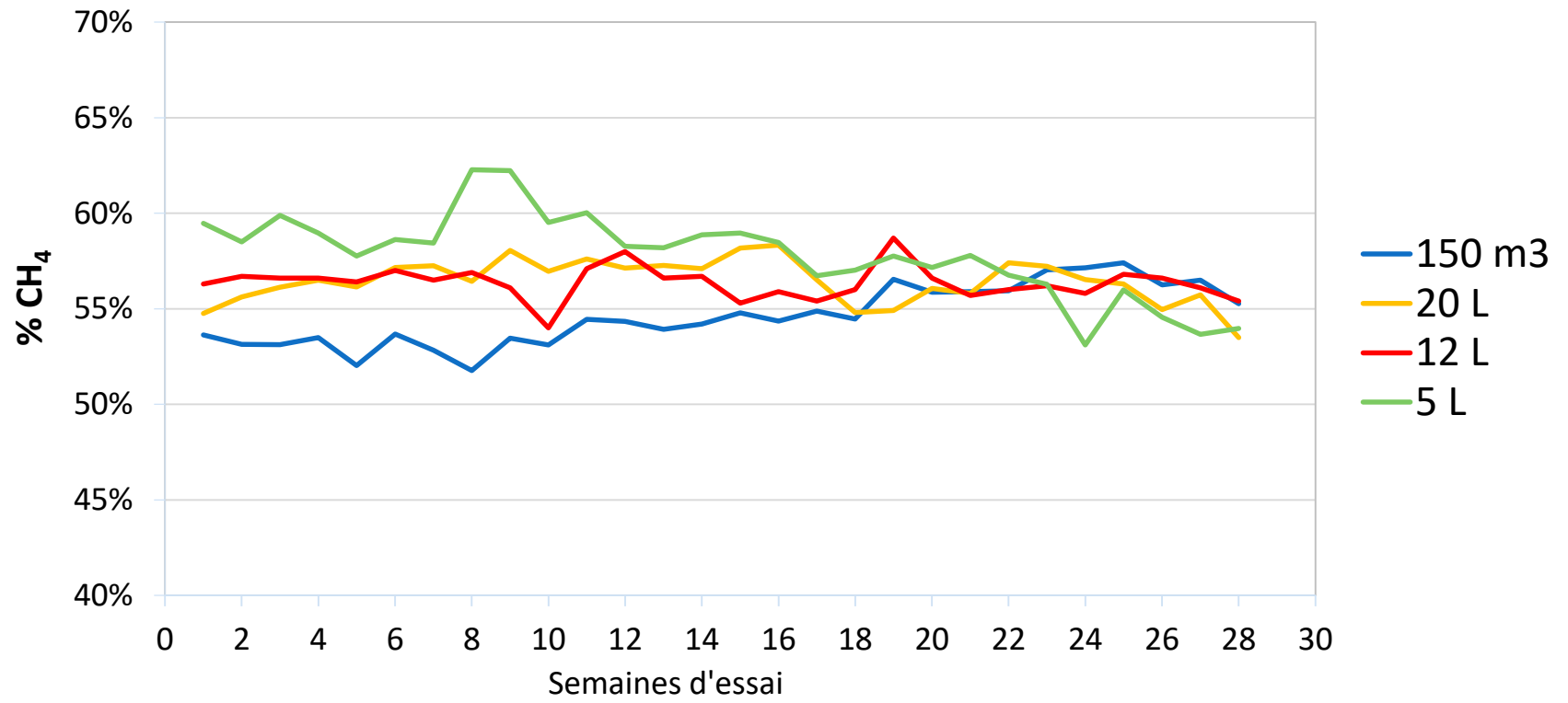
Reproductibilité et transférabilité : suivi biologique

	pH				Potentiel rédox (mV)			
	150 m ³	20 L	12 L	5 L	150 m ³	20 L	12 L	5 L
TSH 1	7,6 ± 0,2	7,5 ± 0,1	7,6 ± 0,1	7,6 ± 0,1	-357 ± 28	-360 ± 10	-373 ± 39	-357 ± 33
TSH 2	7,7 ± 0,1	7,7 ± 0,1	7,6 ± 0,1	7,5 ± 0,3	-373 ± 64	-365 ± 10	-394 ± 24	-386 ± 15
TSH 3	7,8 ± 0,1	7,7 ± 0,1	7,7 ± 0,1	7,7 ± 0,1	-387 ± 47	-360 ± 6	-376 ± 18	-382 ± 13

	NH ₄ ⁺ (g/L)				FOS/TAC			
	150 m ³	20 L	12 L	5 L	150 m ³	20 L	12 L	5 L
TSH 1	1,8 ± 0,2	1,8 ± 0,2	1,8 ± 0,2	2,2 ± 0,5	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1
TSH 2	2,4 ± 0,1	2,4 ± 0,2	2,4 ± 0,2	2,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1
TSH 3	2,8 ± 0,3	2,7 ± 0,2	2,6 ± 0,1	2,5 ± 0,3	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1

Différences significatives : pH (TSH 3), Potentiel redox (TSH 2) et FOS/TAC

Reproductibilité et transférabilité : biogaz

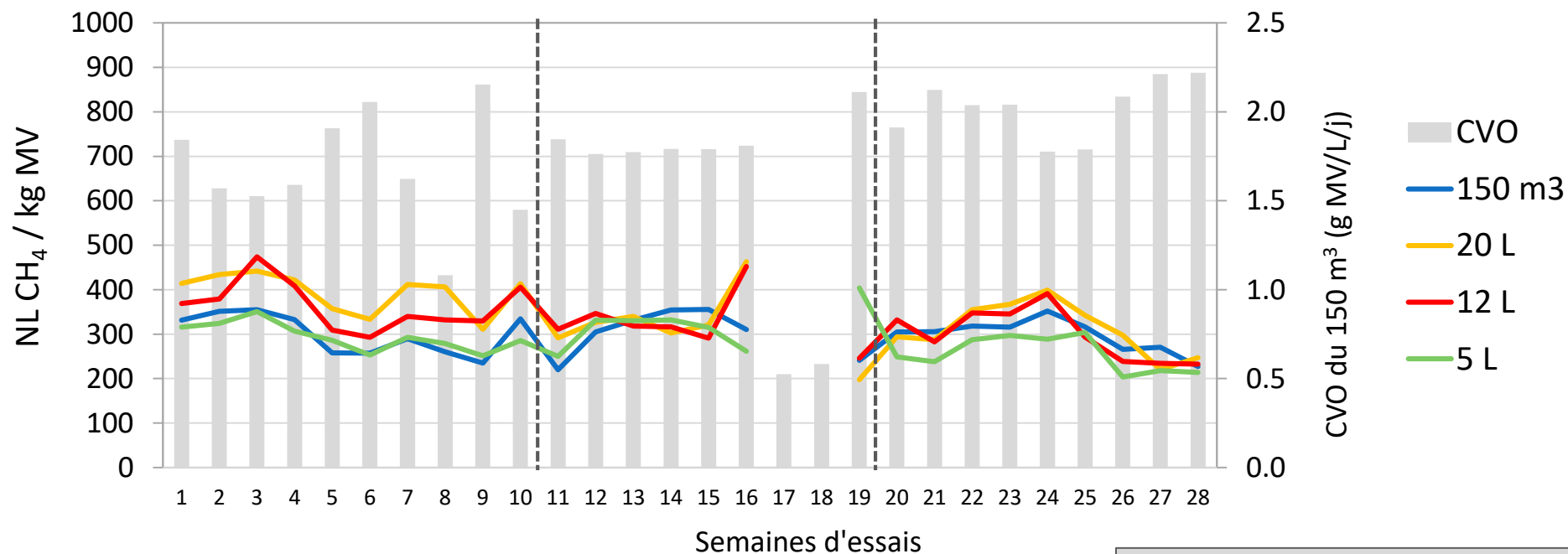


- Différences statistiques entre les échelles au TSH 1 et 2
- Aucune différence au TSH 3

% CH ₄	150 m ³ Moyenne jour	150 m ³ Analyse avant 1 ^{er} nourrissage	20 L	12 L	5 L
TSH 1	53,8 ± 0,6	53,0 ± 0,7	56,5 ± 0,9	56,3 ± 0,9	59,6 ± 1,5
TSH 2 (sem 20-25)	55,3 ± 0,8	54,7 ± 0,8	56,9 ± 1,3	56,6 ± 0,9	58,3 ± 1,0
TSH 3	57,1 ± 0,8	56,4 ± 0,7	55,9 ± 1,2	56,1 ± 0,5	55,5 ± 1,7

Reproductibilité et transférabilité : productions

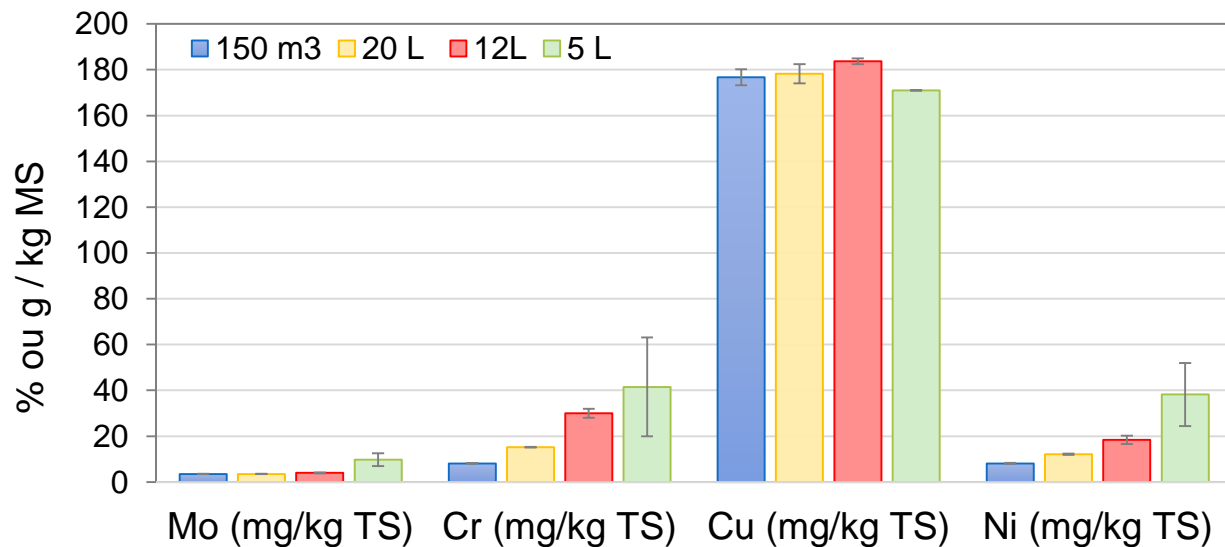
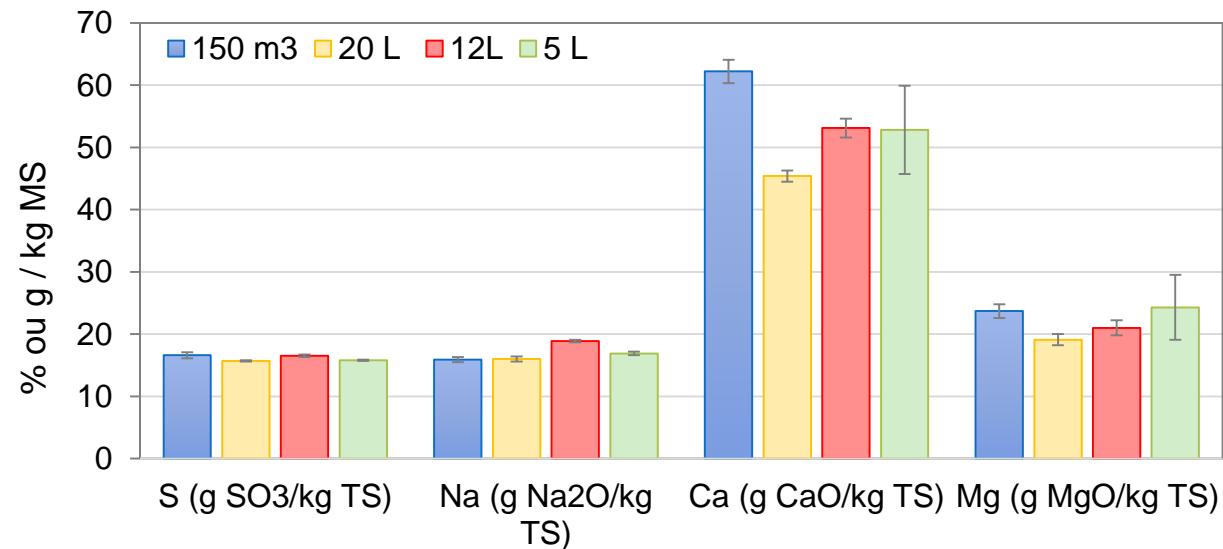
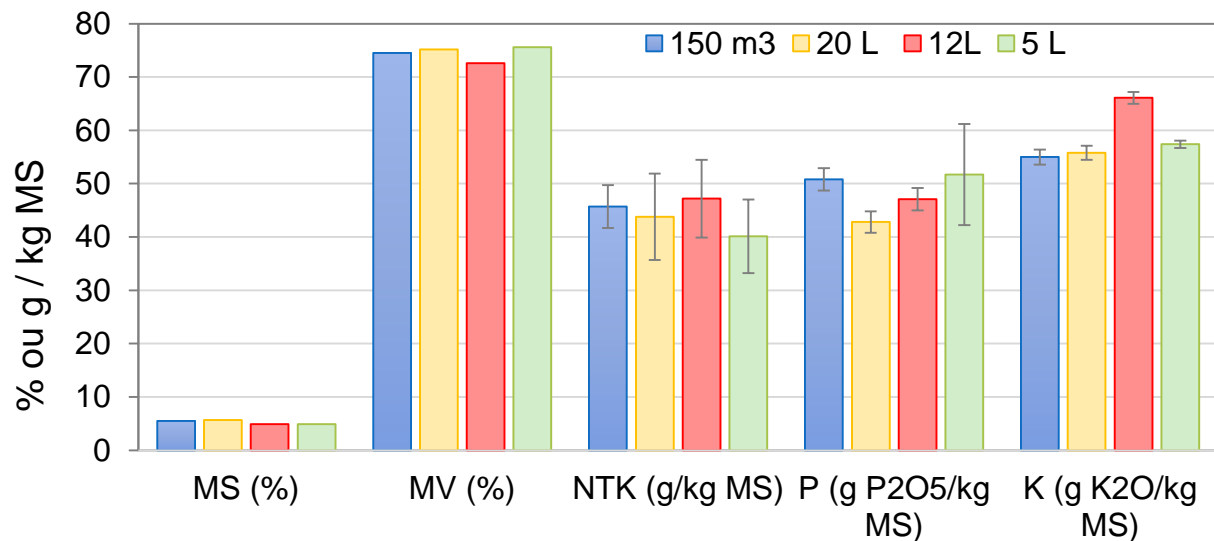
Production de méthane



NL CH ₄ / kg MV	150 m ³	20 L	12 L	5 L
TSH 1	301 ± 45	394 ± 44	364 ± 55	295 ± 31
TSH 2 (sem 11-16)	313 ± 50	341 ± 62	339 ± 58	303 ± 38
TSH 3	297 ± 37	312 ± 58	300 ± 58	255 ± 39

- Différences statistiques entre les échelles au TSH 1 - Absence de différence aux TSH 2 et 3
- Perte de 10% du BMP ration liée au séchage/broyage du maïs (pilote 5L)

Reproductibilité et transférabilité : qualité digestats



Différences significatives observées :

- Paramètres agronomiques: P, K, Mg
- Métaux: Ni, Cr (acier inoxydable), Zn

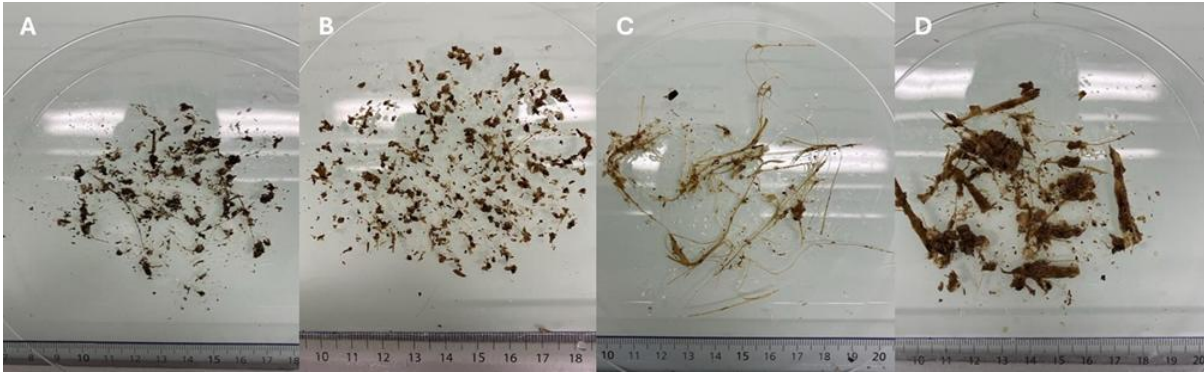
Reproductibilité et transférabilité : qualité digestats

150 m³

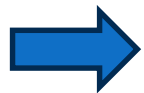
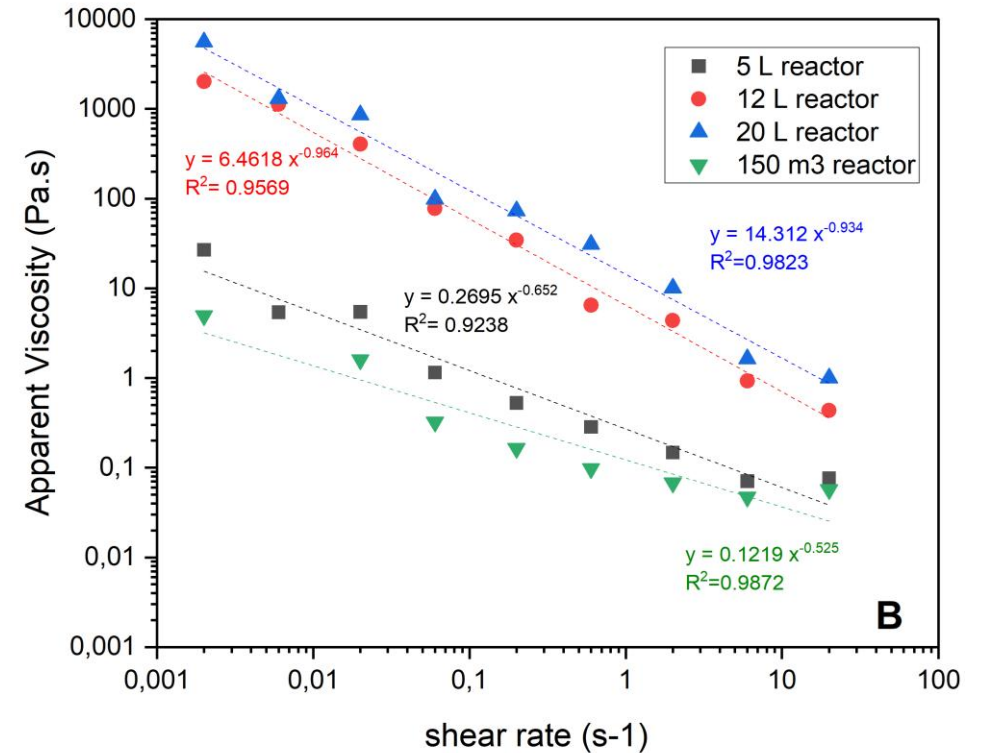
5 L

12 L

20 L



Résidus obtenus après filtration sur une grille de 2 mm des digestats bruts des pilotes/unités



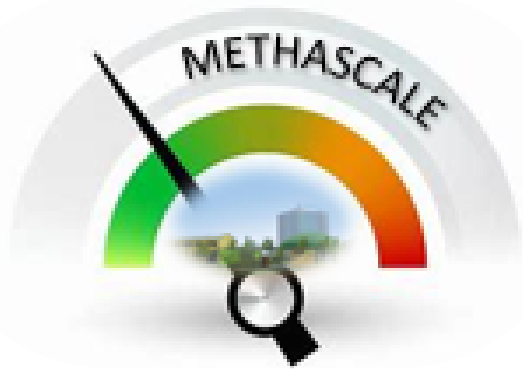
Profils de rhéologie similaires selon la préparation de la matière

Conclusion

Bonne représentativité de l'échelle pilote : suivi biologique / performances / qualité du digestat

Points d'attention

- ✓ Matériaux si relargage métaux par exemple
- ✓ Préparation de la matière au plus près de l'unité à simuler / intégrer les différences
- ✓ Pesage des réacteurs pour le contrôle précis du volume utile (ou mesure niveau)
- ✓ Contrôle de la justesse des débitmètres en début et fin d'essais



MERCI de votre attention



Webinaire

25 juin – 9h30

Changement d'échelle de la méthanisation :
du laboratoire à l'unité industrielle
(Méthascale)



Guide sur la conduite des essais pilote

Rédaction d'un guide en cours suite à un
workshop d'échange avec les acteurs publics
/ privés Nationaux travaillant sur la
méthanisation

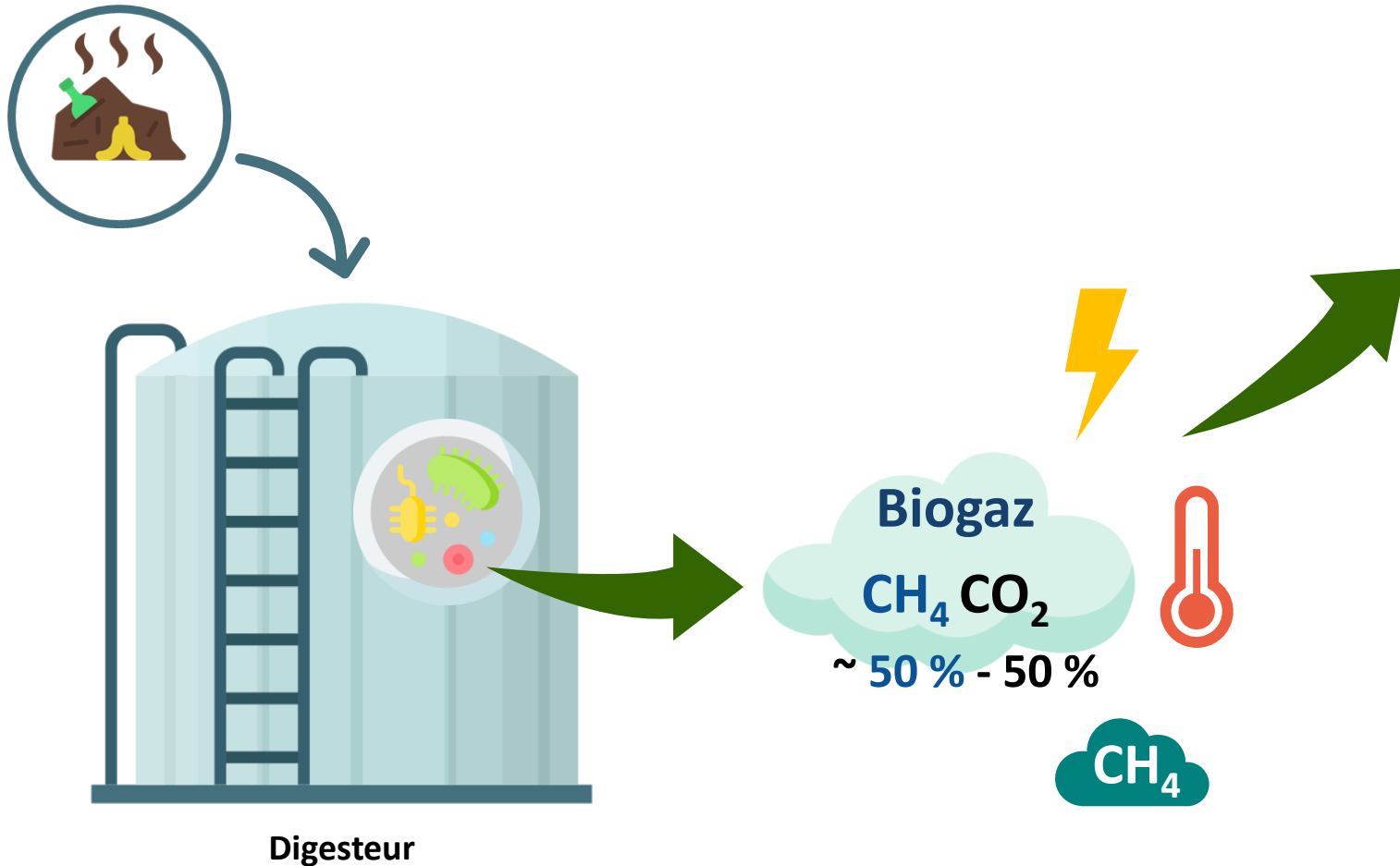


Évaluation de la robustesse de la biométhanation *in situ* face aux surcharges organiques et d'hydrogène

L. Braga-Nan, M. Mahieux, Q. Aemig, C. Richard, J-P. Delgenès, M. Juge, C. Peyrelasse, M. Zbair, E. Trably, R. Escudié

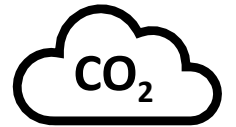


Production de biométhane par digestion anaérobie



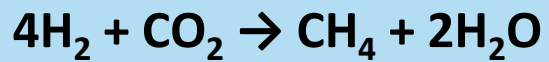
Coût de l'épuration du biogaz :

- 14 à 23 % du coût de la production du bioCH_4
- Principal moyen : séparation par membrane ou water scrubbing

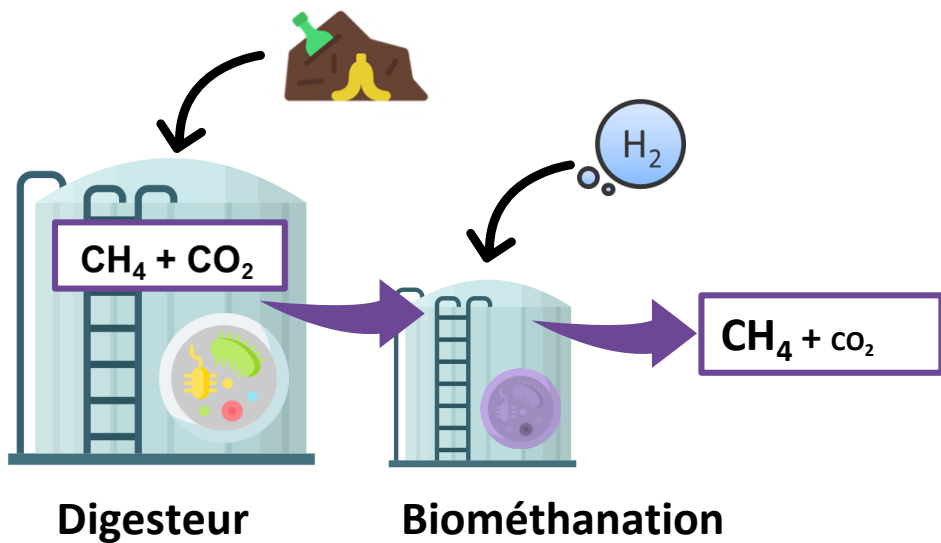


Autres solutions ?

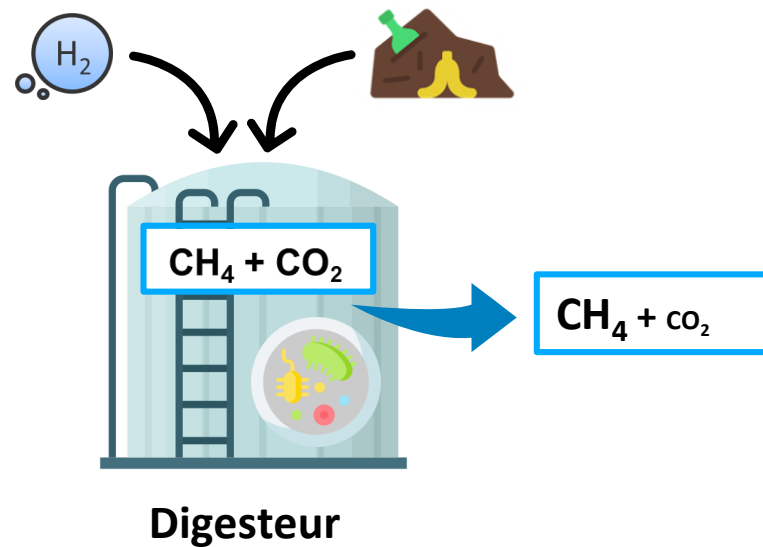
Enrichissement biologique du biogaz



Biométhanation *Ex situ*



Biométhanation *In situ*

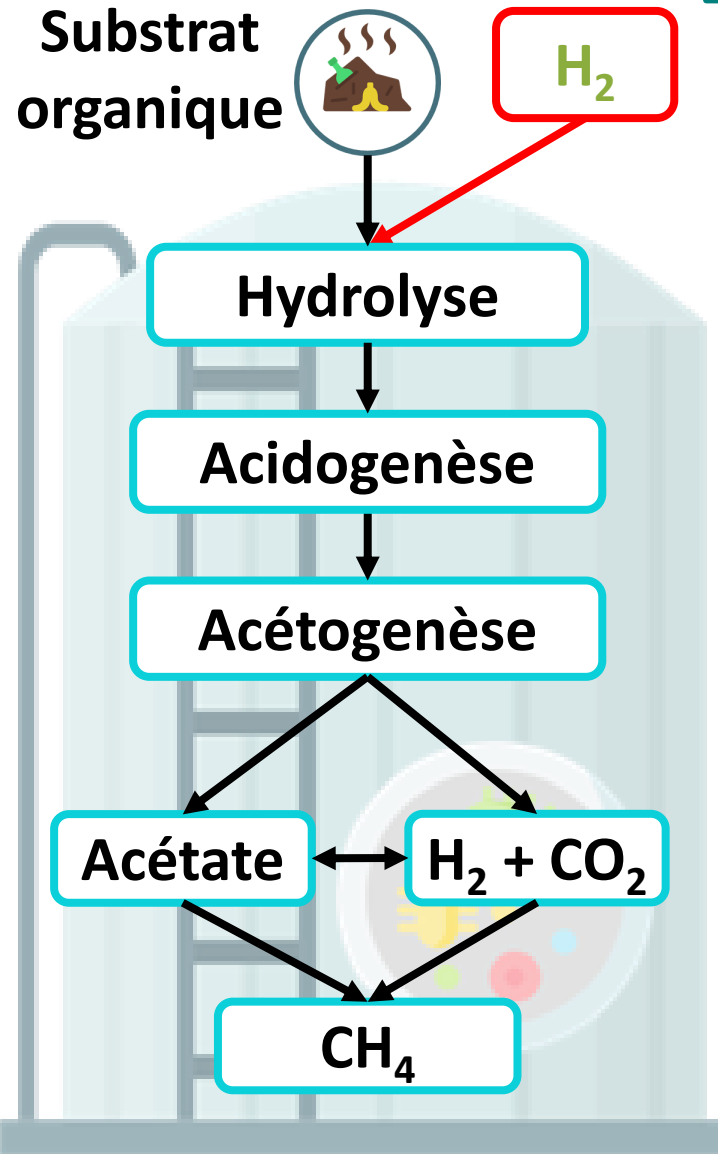


Opportunités

- Amélioration de la teneur en CH₄
- Utilisation des infrastructures déjà existantes



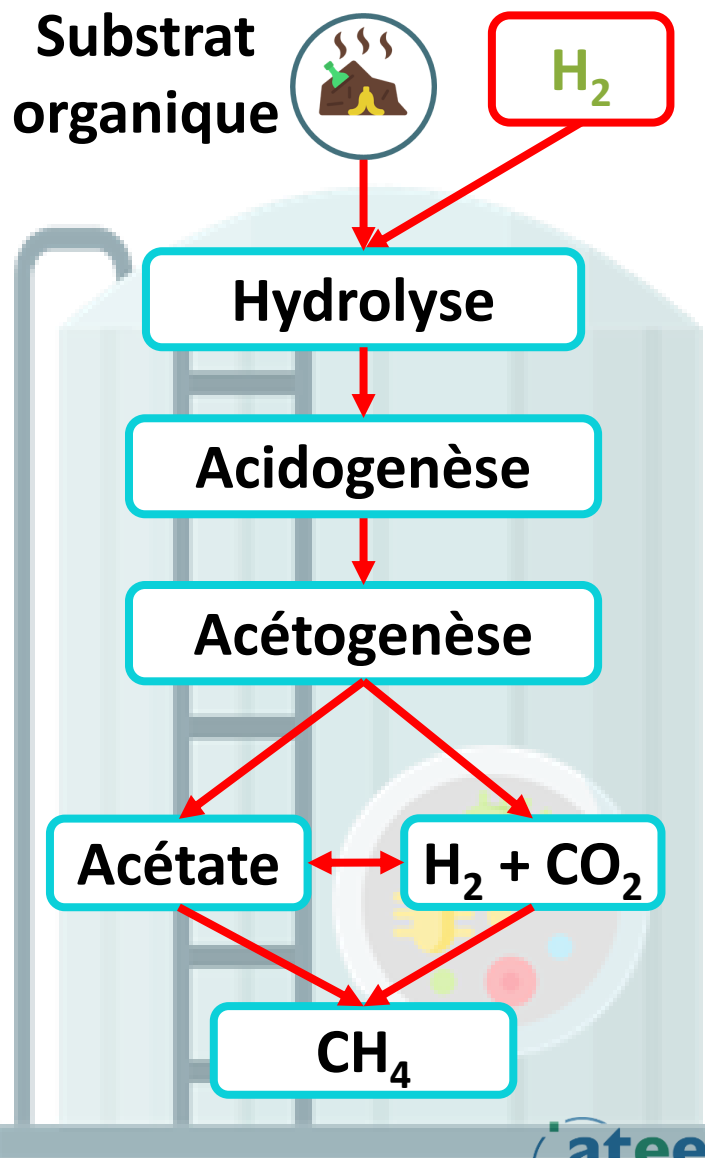
Biométhanation *in situ*



Dans la littérature :

- Inhibition de microorganismes syntrophes
- Inhibition des méthanogènes acétoclastiques
- Accumulation d'acides gras volatils
- Instabilité liée au pH

Biométhanation *in situ*: démarrage du procédé



Dans la littérature :

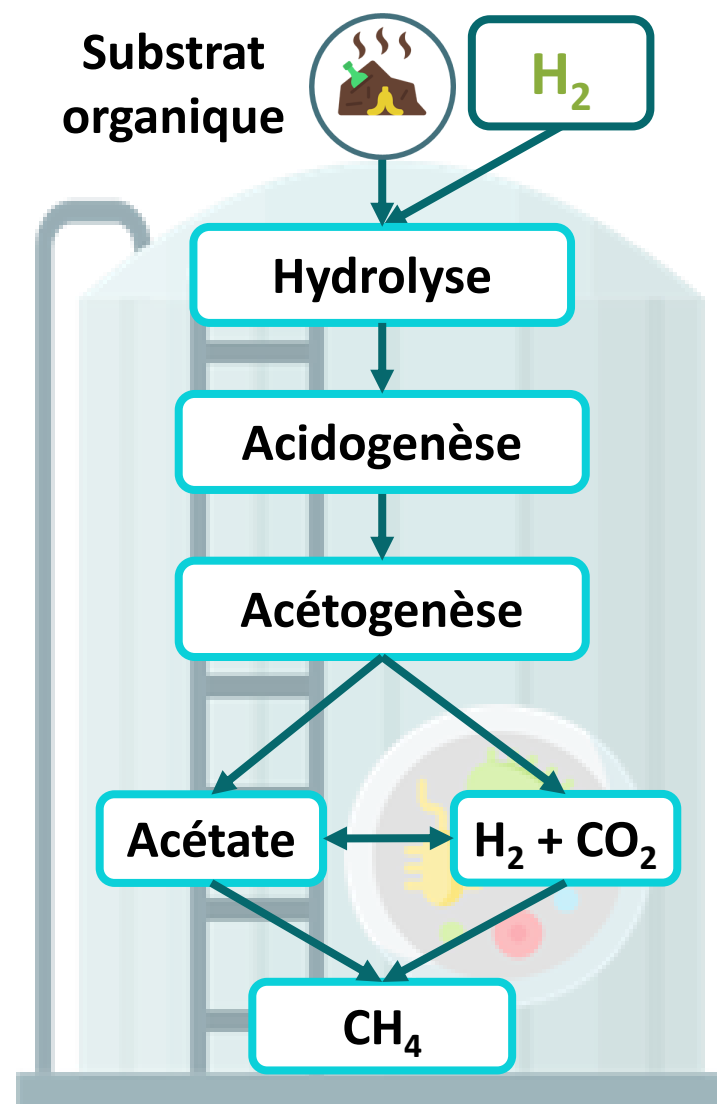
- Inhibition de l'hydrolyse
- Inhibition des méthanogènes acétoclastiques
- Accumulation d'acides gras volatils
- Instabilité liée au pH

Caractéristique de l'inoculum :

- Importance de la proportion des archées
- Présence de *Methanosarcina* sp.
- Importance de la diversité microbienne



Qu'est-ce qu'on sait de l'adaptation de la communauté microbienne à l'ajout d'H₂ ?

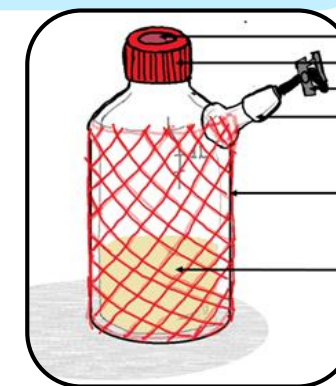


Adaptation de la communauté microbienne à l'ajout d'H₂

- Promotion de l'activité hydrogénotrophe vs acétoclastique
- Croissance des méthanogènes hydrogénotrophes
- Méthanogènes versatiles vs acétoclastiques

Impact sur le processus de digestion anaérobie

- Promotion des interactions syntrophiques
- Amélioration de la consommation des acides gras volatils
- Amélioration de la dégradation de la matière organique (MO)



Agneessens *et al.* (2017); (2018)

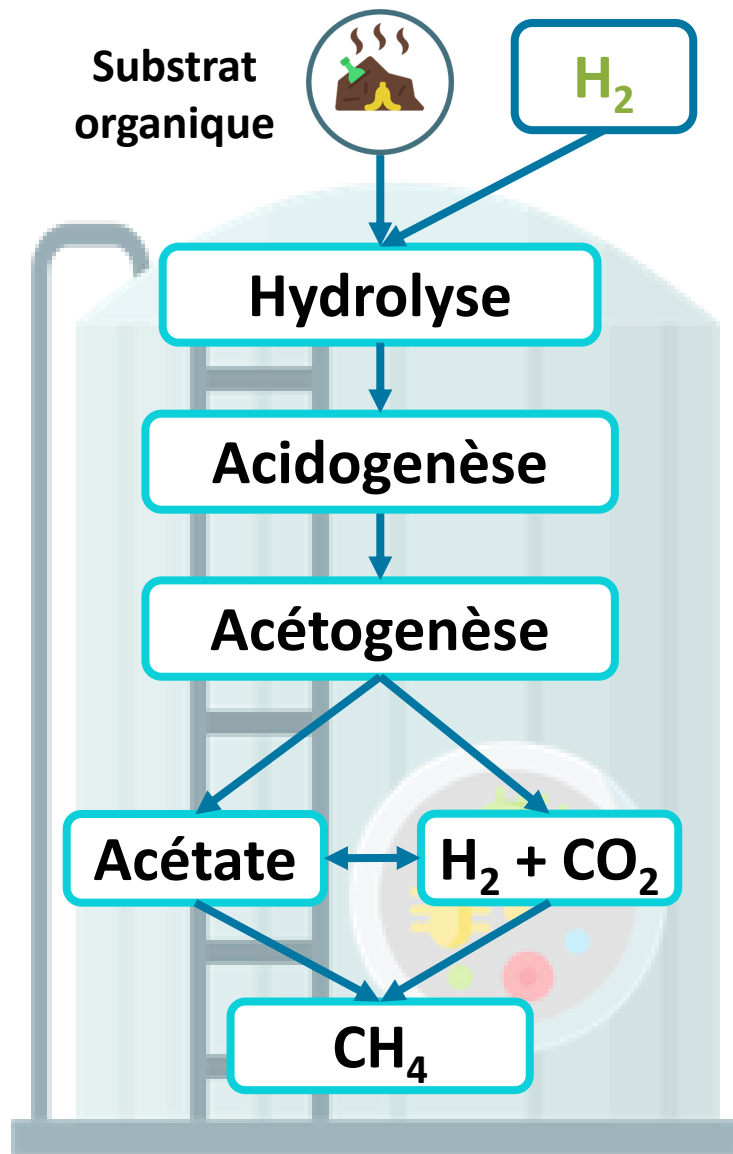
Braga Nan *et al.* (2022); (2025)

Basile *et al.* (2020)

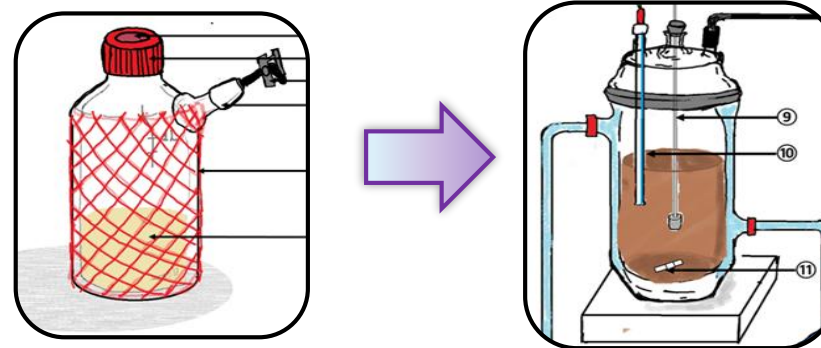
Mahieux *et al.* (2024a); (2025)

Adapté soutenance thèse Margot Mahieux 18/02/2025

Qu'est-ce qu'on sait de l'adaptation de la communauté microbienne à l'ajout d'H₂ ?



Montée en échelle du procédé



Dans la littérature

- Ajout trop important d'H₂ (ratio H₂:CO₂ > 3:1) peut enclencher l'accumulation des Acides Gras Volatils (AGV)
- Surcharge organique peut être mieux tolérée en conditions de biométhanation *in situ*

Qu'est-ce qu'on sait de l'adaptation de la communauté microbienne à l'ajout d'H₂ ?

Substrat organique



H₂

Montée en échelle du procédé

Quel est l'effet de l'adaptation microbienne à l'ajout d'H₂ sur les performances de biométhanation *in situ* lorsqu'elle est confrontée à une surcharge organique ?

Acétate

H₂ + CO₂

CH₄

- Ajout trop important d'H₂ (ratio H₂:CO₂ > 5:1) peut entraîner l'accumulation des Acides Gras Volatils (AGV)
- Surcharge organique peut être mieux tolérée en conditions de biométhanation *in situ*

Matériels et Méthodes : Plan d'expérience

CVA 2,5

4 Semaines (~1TSH)

CVA 3,0

2 Semaines

CVA 3,5

1 Semaine

CVA 4,5

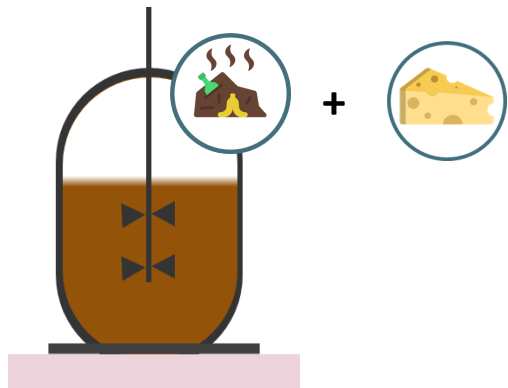
1 Semaine

CVA 6,0

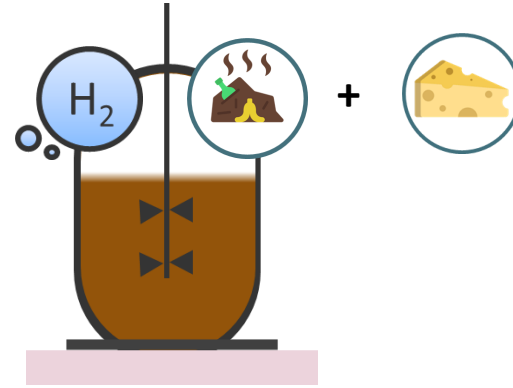
1 Semaine

*CVA – Charge Volumétrique Appliquée ($\text{gMV.L}^{-1}.\text{j}^{-1}$)

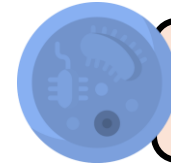
*TSH – Temps de Séjour Hydraulique (j)



Contrôle de
digestion anaérobie



Biométhanation
in situ



Inoculum : Communauté microbienne déjà exposée à l' H_2



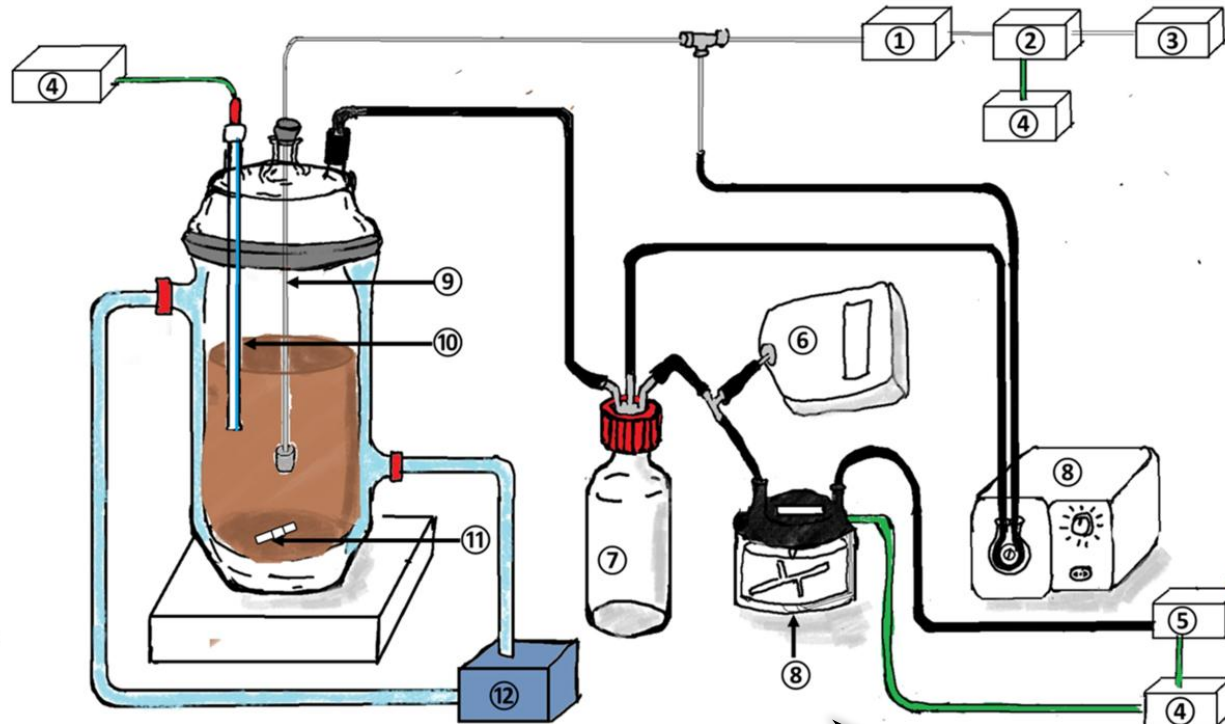
Composition du substrat organique (%MV)

- Lisier bovin (35 %)
- CIVE séchées et broyées (30 %)
- Soupe de biodéchets (11 %)
- Lactosérum lyophilisé (25 %)

Matériels et Méthodes : configuration et opération des réacteurs

- ① Solenoïde valve
- ② H₂ Mass flowmeter
- ③ H₂ generator
- ④ Data acquisition
- ⑤ Micro GC
- ⑥ Biogas bag
- ⑦ Safety bottle
- ⑧ Gas meter
- ⑨ Peristaltic pump
- ⑩ pH meter
- ⑪ Magnetic stirrer
- ⑫ Water bath

- Hot water
- Data acquisition
- Biogas flow
- Pure H₂ flow

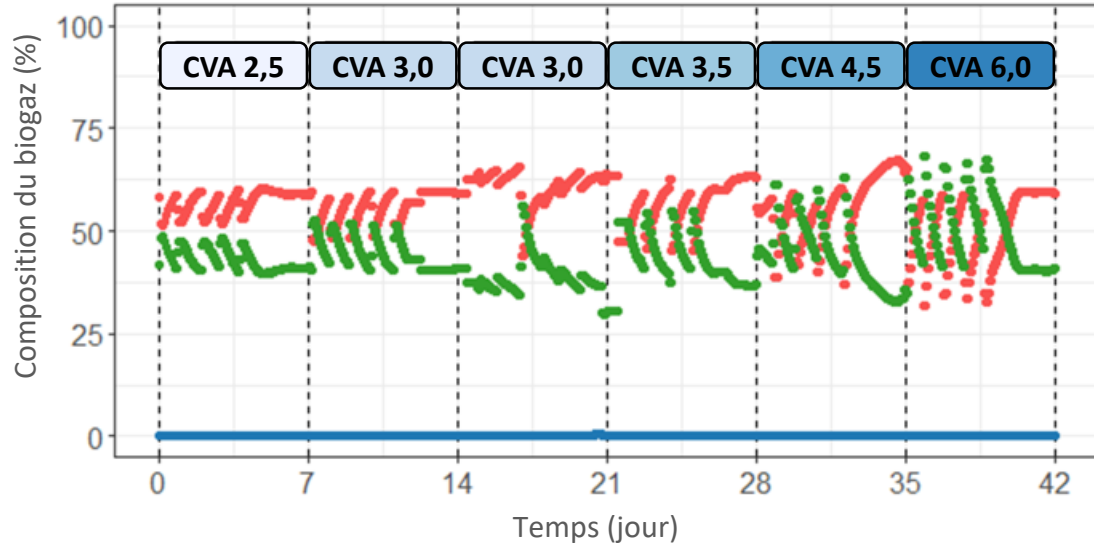


Paramètres	Valeurs
CVA (gMV.L ⁻¹ .j ⁻¹)	2,5 à 6
TSH (jour)	29
Volume utile (L)	2,5
Recirculation du biogaz (mL.min ⁻¹)	35
Injection d'H ₂ (mL.min ⁻¹)	2
Ratio H ₂ :CO ₂ (V:V)	2:1 → 0.7:1

Type de mesure	Intervalle (temps)
Température et pH du réacteur	3 min
Débit production/injection de gaz	3 min
Composition de gaz	4 h
Données hors ligne (alimentation, AGV, NH ₃ -NH ₄ ⁺ , communauté microbienne)	24 h

Résultats : composition de biogaz pour chaque CVA

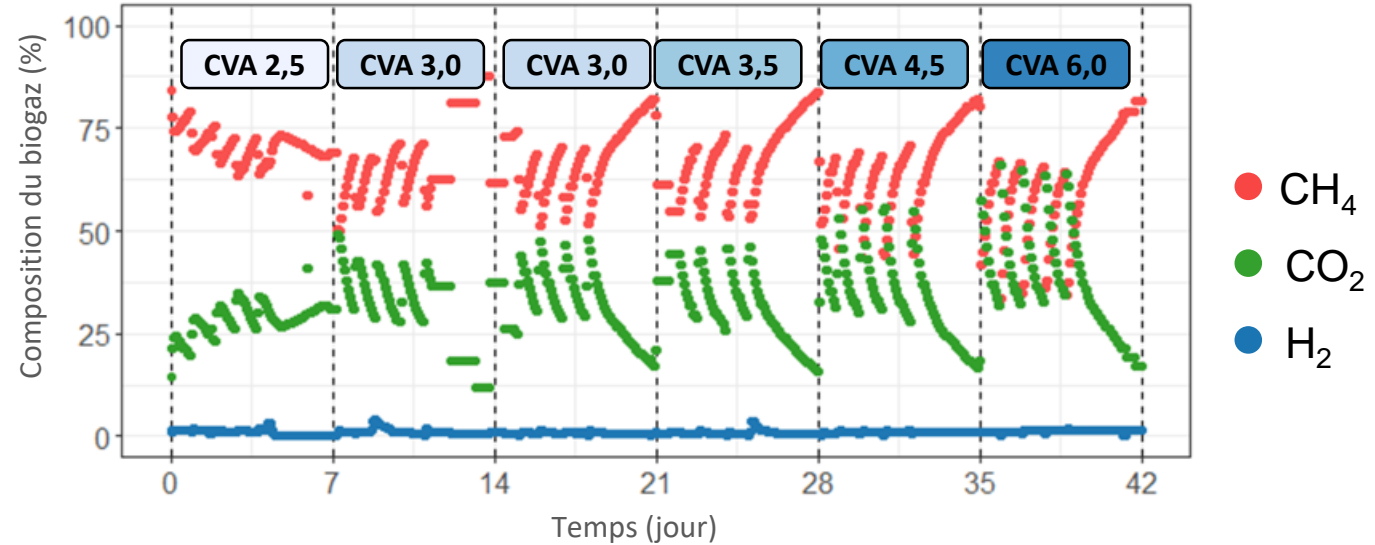
Contrôle Digestion Anaérobie



Pour les CVA les plus faibles

- Composition du biogaz n'a pas été impactée
- Alimentation en H₂ le weekend a modifié la composition du biogaz

Biométhanation *in situ*

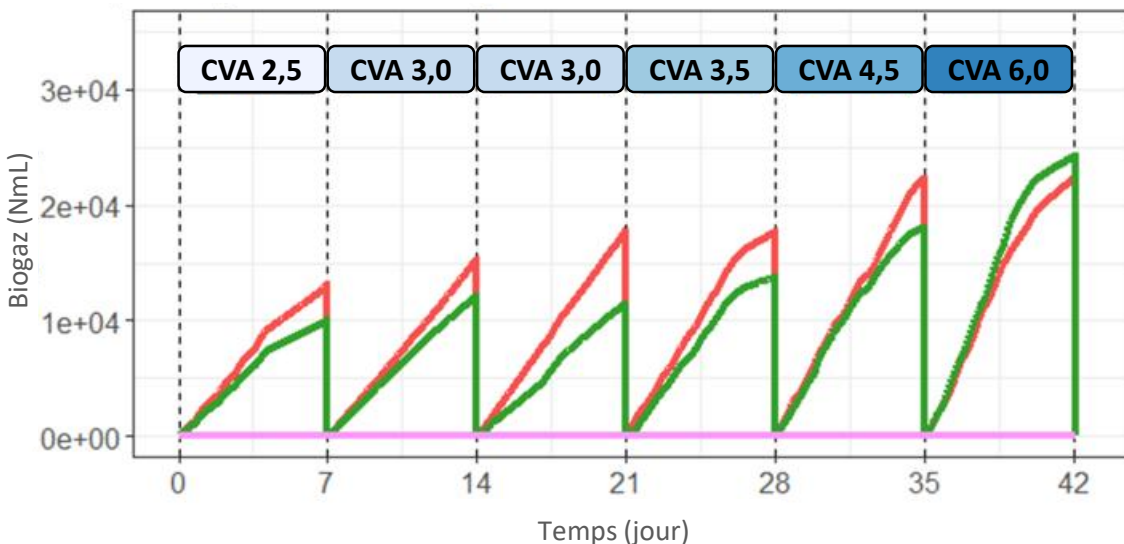


Pour les CVA plus importantes

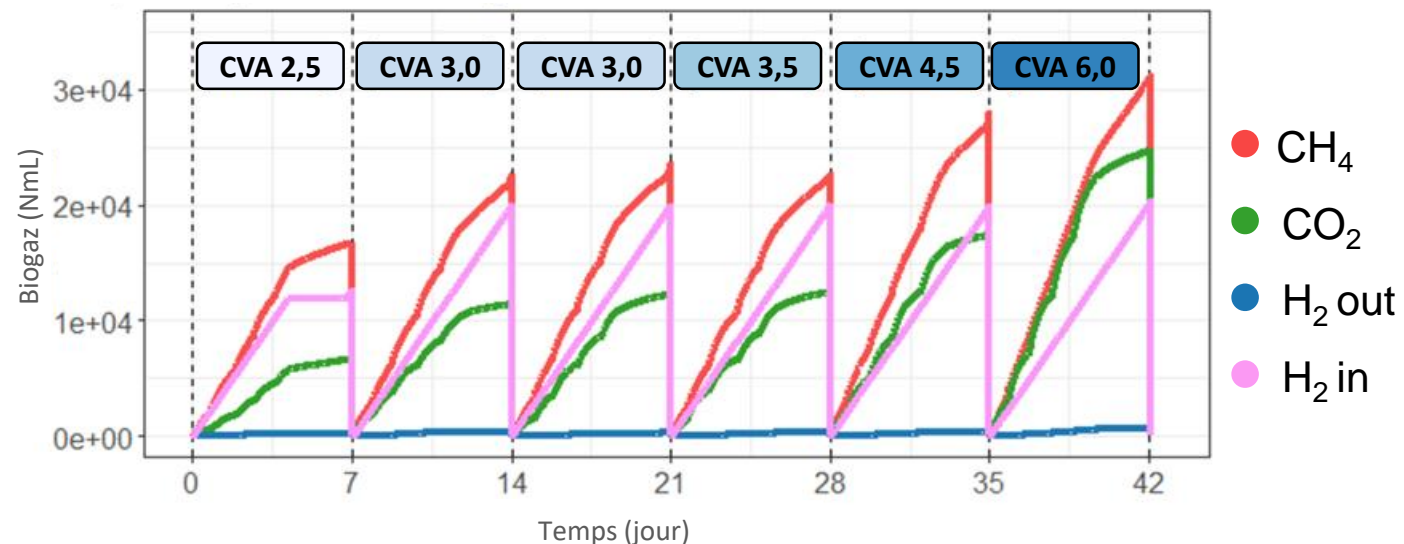
- Proportion en biogaz : \nearrow CO₂ \searrow CH₄ = instabilité réacteurs contrôle à CVA 3,5
- Injection d'H₂ injection a limité l'augmentation de la proportion de CO₂ dans les réacteurs de biométhanation *in situ*

Résultats : production de biogaz pour chaque CVA

Contrôle Digestion Anaérobie (DA)



Biométhanation *in situ*



Pour les CVA les plus faibles

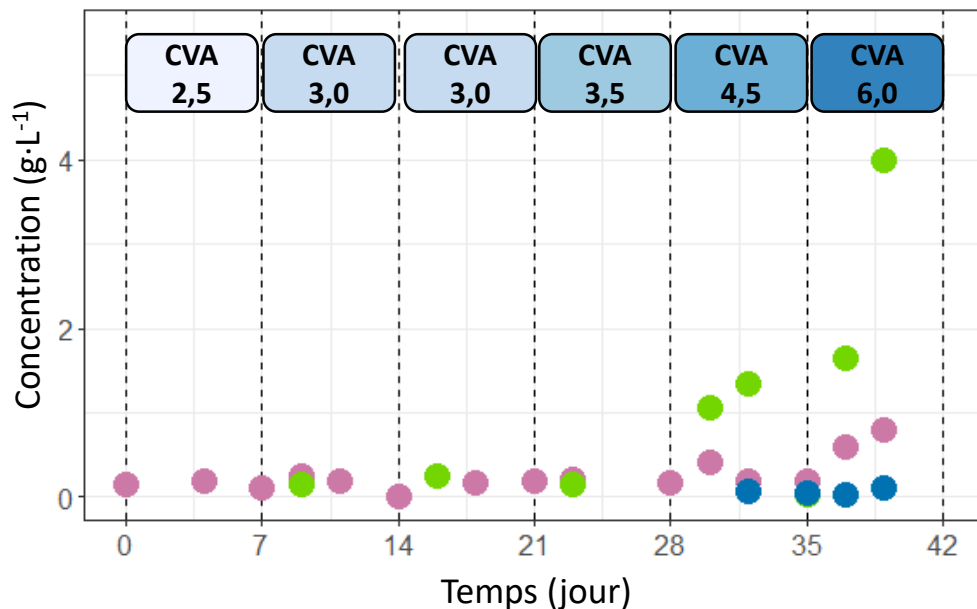
- Production de CH₄ stable dans contrôle et biométhanation *in situ*
- Injection d'H₂ n'a pas causé d'instabilité du procédé

Pour les CVA plus élevées

- Production de CO₂ > Production de CH₄ dans le réacteur contrôle de DA
- Augmentation de la production du CH₄ : 25 % vs 42 % DA vs biométhanation *in situ*

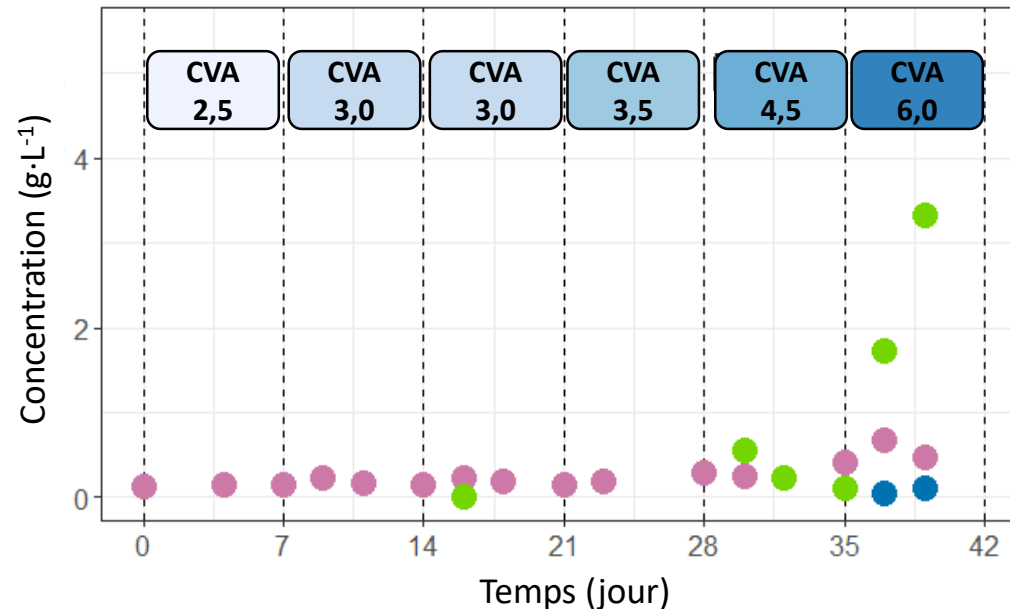
Résultats : production des acides gras volatils

Contrôle Digestion Anaérobie



- Accumulation des AGV a commencé plus tôt en condition de DA par rapport à la biométhanation *in situ*

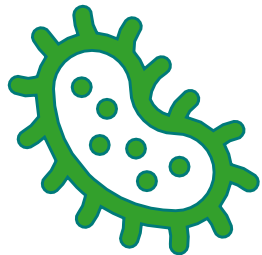
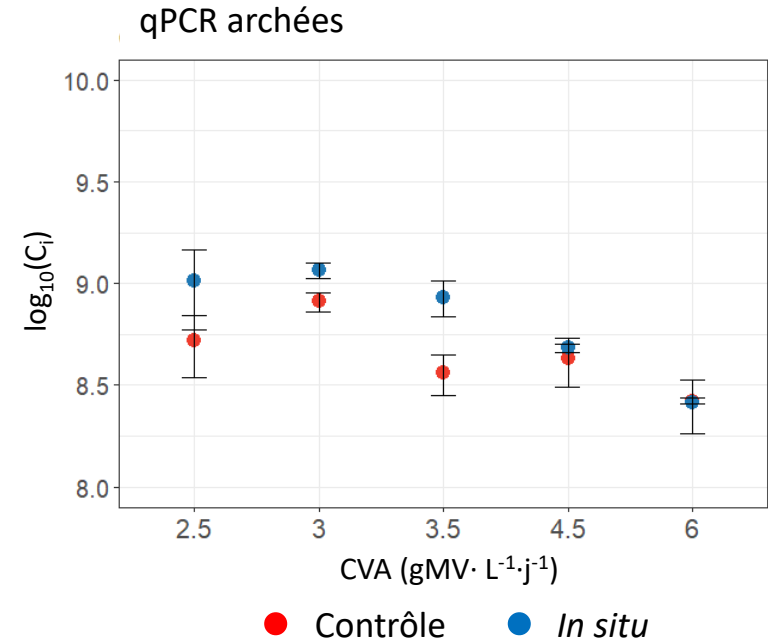
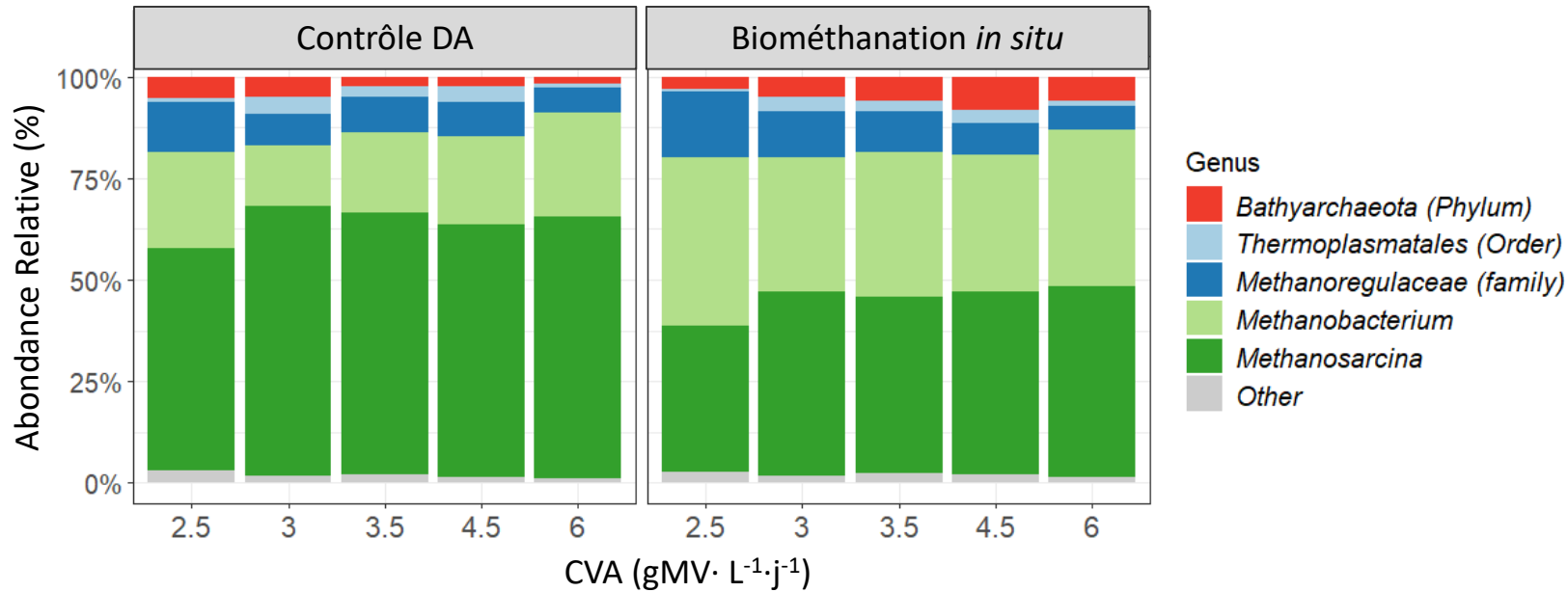
Biométhanation *in situ*



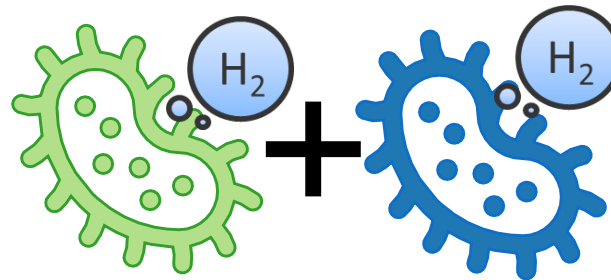
- Acétate
- Propionate
- Valérate

- Impact neutre ou limitation de l'accumulation des AGV lors de l'injection d'H₂

Résultats : communauté microbienne



Methanosarcina
Méthano­gènes versatiles



Methanobacterium + Methanoregulaceae (family)
Méthano­gènes hydrogénotrophiques

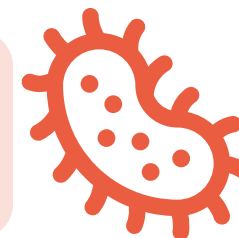
- Pas de croissance des archées
- Baisse en proportion des archées pour les CVA plus élevées

Conclusions et Perspectives

- Efficacité de la conversion d' H_2 > 99 %
- **Production CH_4** : Biométhanation *in situ* > Contrôle DA
- Accumulation de CO_2 a été limitée lors de l'injection continue d' H_2



- **Injection d' H_2 + Adaptation de la communauté microbienne ont promu la stabilité du procédé de biométhanation *in situ* face à des surcharges organiques**



Perspectives

- Quel est l'impact de l'injection d' H_2 en conditions stabilisées ?
- Quel est le rapport optimal entre l' H_2 injecté et la charge organique appliquée ?

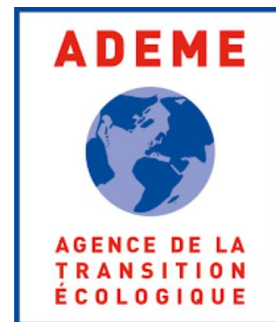


MERCI DE VOTRE ATTENTION



Bibliography

- Agneessens, L.M., Ottosen, L.D.M., Andersen, M., Berg Olesen, C., Feilberg, A., Kofoed, M.V.W., 2018. Parameters affecting acetate concentrations during in-situ biological hydrogen methanation. *Bioresource Technology* 258, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.102>
- Agneessens, L.M., Ottosen, L.D.M., Voigt, N.V., Nielsen, J.L., de Jonge, N., Fischer, C.H., Kofoed, M.V.W., 2017. In-situ biogas upgrading with pulse H₂ additions: The relevance of methanogen adaption and inorganic carbon level. *Bioresource Technology* 233, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.016>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., Kougias, P.G., 2018. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances* 36, 452–466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Braga Nan, L., Trably, E., Santa-Catalina, G., Bernet, N., Delgenès, J.-P., Escudie, R., 2020. Biomethanation processes: New insights on the effect of a high H₂ partial pressure on microbial communities. *Biotechnology for Biofuels* 13. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01776-y>
- Braga Nan, L., Trably, E., Santa-Catalina, G., Bernet, N., Delgenes, J.P., Escudie, R., 2022. Microbial community redundancy in biomethanation systems lead to faster recovery of methane production rates after starvation. *Science of the Total Environment* 804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150073>
- Braga-Nan, L., Trably, E., Santa-Catalina, G., Bernet, N., Delgènes, J.-P., Escudie, R., 2025. Microbial adaptation to H₂ improves the conversion of volatile fatty acids to methane during in situ biomethanation even in CO₂-depleted conditions. *Bioresource Technology* 429, 132494. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132494>
- Cazier, E.A., Trably, E., Steyer, J.-P., Escudie, R., 2019. Reversibility of hydrolysis inhibition at high hydrogen partial pressure in dry anaerobic digestion processes fed with wheat straw and inoculated with anaerobic granular sludge. *Waste Management* 85, 498–505. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.019>
- ENEA, Blaisonneau, L., El Fadili, S., Faure, M., Gondel, A., Julien, E., Rakotojaona, L., 2017. État des lieux du biométhane en France (Etude de cas). ENEA Consulting.
- Luo, G., Angelidaki, I., 2013. Co-digestion of manure and whey for in situ biogas upgrading by the addition of H₂: process performance and microbial insights. *Appl Microbiol Biotechnol* 97, 1373–1381. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4547-5>
- Mahieux, M., Aemig, Q., Richard, C., Delgenès, J.-P., Juge, M., Trably, E., Escudie, R., 2024a. Improved organic matter biodegradation through pulsed H₂ injections during in situ biomethanation. *Bioresource Technology* 407, 131101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131101>
- Mahieux, M., Braga-Nan, L., Desmond-Le Quémener, E., Aemig, Q., Richard, C., Delgenès, J.-P., Juge, M., Trably, E., Escudie, R., Capson-Tojo, G., 2025. Hydrogen addition can accelerate propionate degradation kinetics during in situ biomethanation. *Chemical Engineering Journal* 519, 165151. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165151>
- Mahieux, M., Richard, C., Aemig, Q., Delgenès, J.-P., Juge, M., Trably, E., Escudie, R., 2024b. Archaeal community composition as key driver of H₂ consumption rates at the start-up of the biomethanation process. *Science of The Total Environment* 931, 172922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172922>
- Mahieux, M. Thèse de doctorat: Biométhanation *in situ*, compréhension des mécanismes et optimisation opérationnelle. Soutenu le 18/02/2025
- Mulat, D.G., Mosbæk, F., Ward, A.J., Polag, D., Greule, M., Keppler, F., Nielsen, J.L., Feilberg, A., 2017. Exogenous addition of H₂ for an in situ biogas upgrading through biological reduction of carbon dioxide into methane. *Waste Management* 68, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.054>
- Tao, B., Alessi, A.M., Zhang, Y., Chong, J.P.J., Heaven, S., Banks, C.J., 2019. Simultaneous biomethanisation of endogenous and imported CO₂ in organically loaded anaerobic digesters. *Applied Energy* 247, 670–681. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.058>
- Wahid, R., Mulat, D.G., Gaby, J.C., Horn, S.J., 2019. Effects of H₂:CO₂ ratio and H₂ supply fluctuation on methane content and microbial community composition during in-situ biological biogas upgrading. *Biotechnology for Biofuels* 12, 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1443-6>

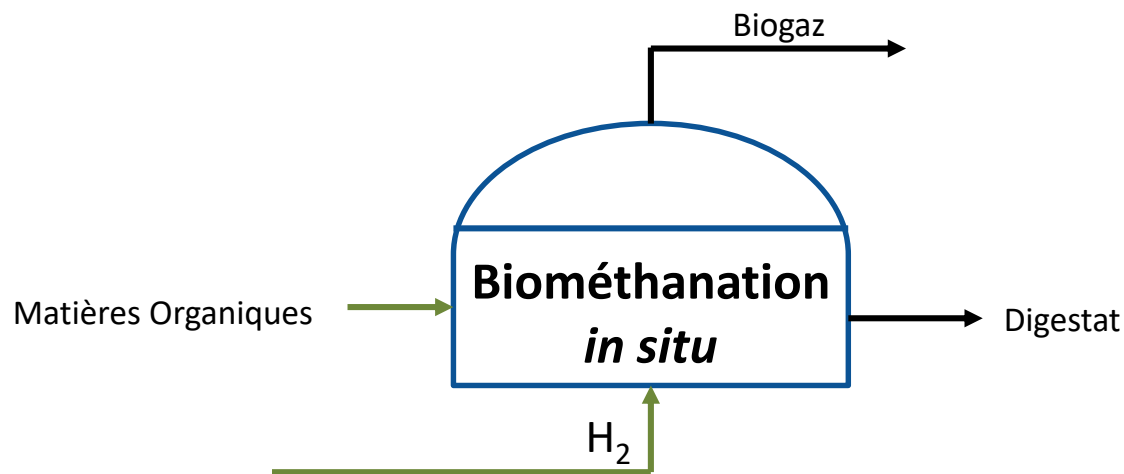


Modélisation de la biométhanation *in situ*

T. SEGURA, Q. AEMIG, M. MAHIEUX, L. BRAGA-NAN, L. SAUVADET, C. PEYRELASSE, C. RICHARD, R. ESCUDIE, J-P. STEYER



Pourquoi modéliser les processus de biométhanation *in situ* ?

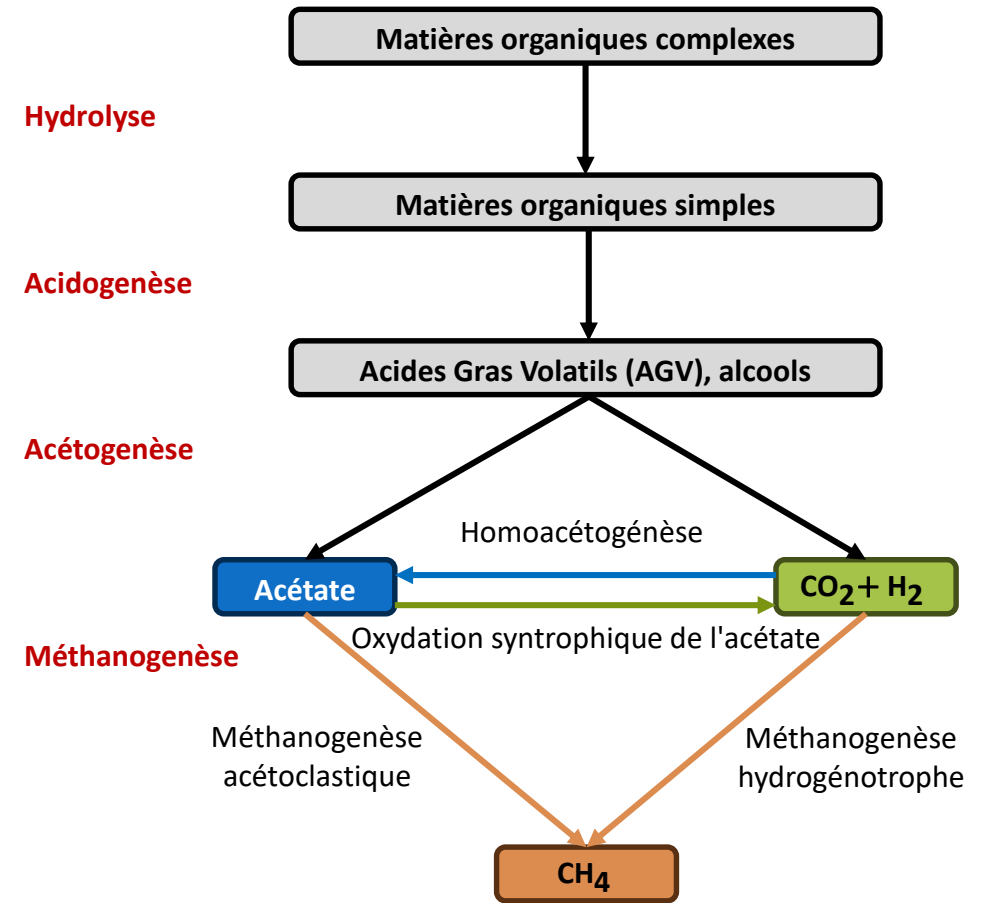


- Comprendre les processus lors de la biométhanation *in situ*.
- Anticiper le fonctionnement et les dysfonctionnements du procédé.
- Prédire la production de biométhane en fonction des paramètres de fonctionnement.
- Contribuer au développement des jumeaux numériques.

Spécificités de la modélisation mécanistique de la biométhanation *in situ*

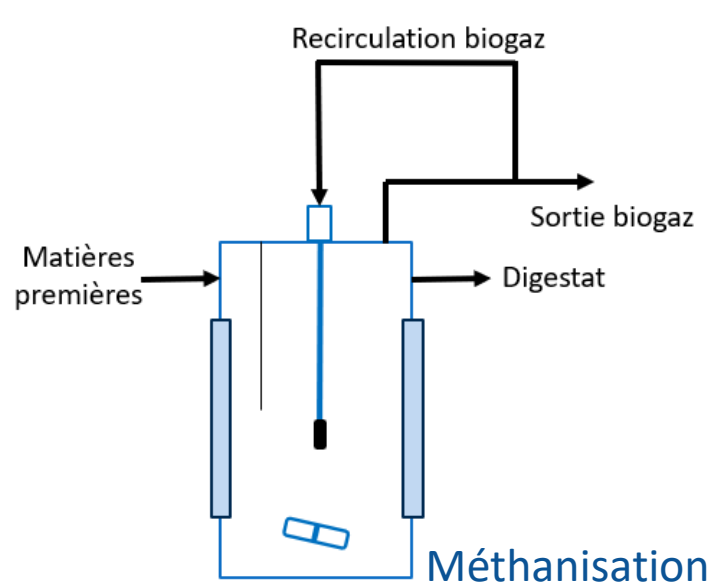
- Certaines voies métaboliques deviennent plus importantes
- Prise en compte de l'apport d'hydrogène (H₂) en phase gazeuse dans le bilan matière
- Transfert gaz-liquide : l'H₂ a une faible solubilité dans l'eau
 - Taux de transfert de masse volumique gaz-liquide :

$$r_{g-l} = k_L a (C_l^* - C_l)$$

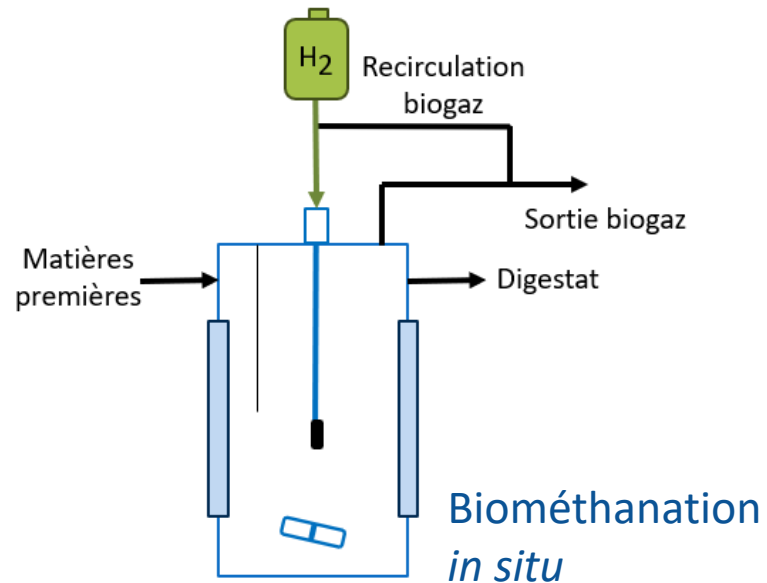


Méthodologie : procédés à modéliser

Echelle laboratoire : 2,5 L

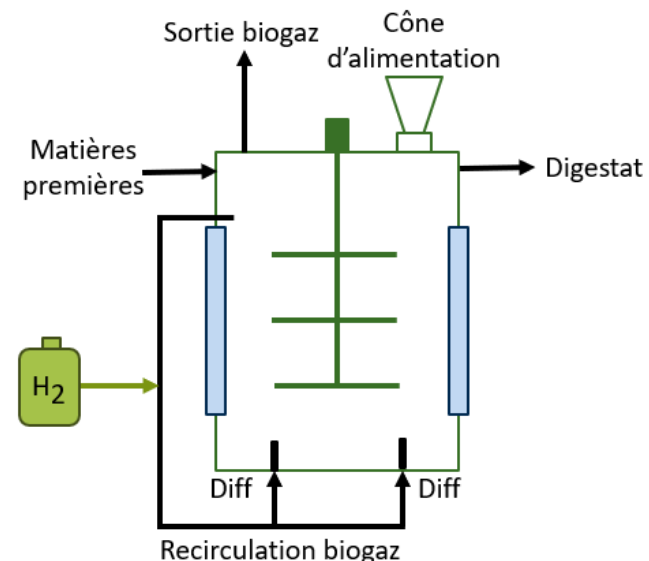


Température (°C)	37-38
CVA (kg MSV.m ⁻³ .j ⁻¹)	2,5 à 6,0
Injection d'H ₂ (mL.min ⁻¹)	2
$k_L a_{H_2}$ (j ⁻¹)	533
TSH (j)	29



Mix d'alimentation
CIVE
Lisier
Biodéchets
Perméat de lactosérum

Echelle pilote : 300 L



Température (°C)	37-38
CVA (kg MSV.m ⁻³ .j ⁻¹)	1,0 à 2,5
Injection d'H ₂ (mL.min ⁻¹)	Variable
$k_L a_{H_2}$ (j ⁻¹)	39
TSH (j)	27-28

*CVA : charge volumique appliquée

*TSH : temps de séjour hydraulique

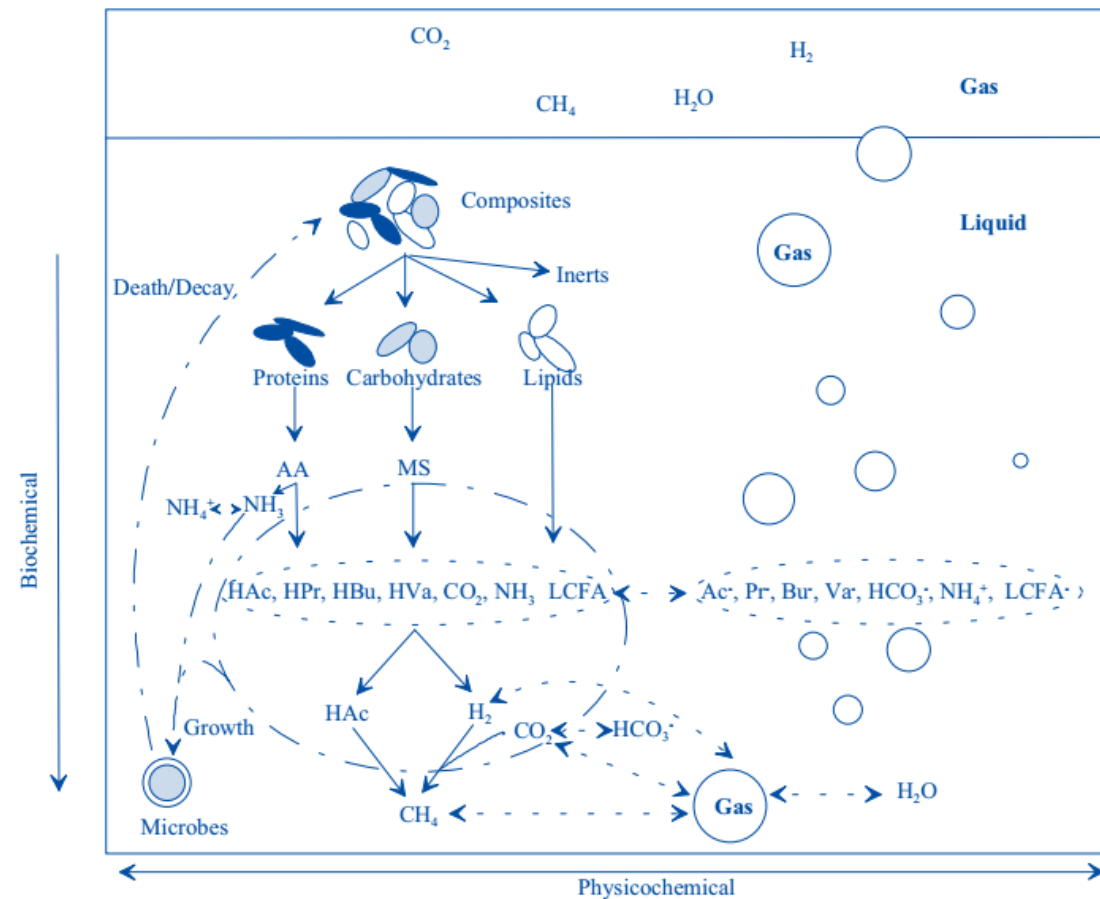
Méthodologie : modèle

- L'Anaerobic Digestion Model N°1 ou ADM1 (Batstone et al., 2002) comme modèle de base.

- Modification de l'équation différentielle de l'hydrogène gazeux pour inclure l'injection d'H₂ :

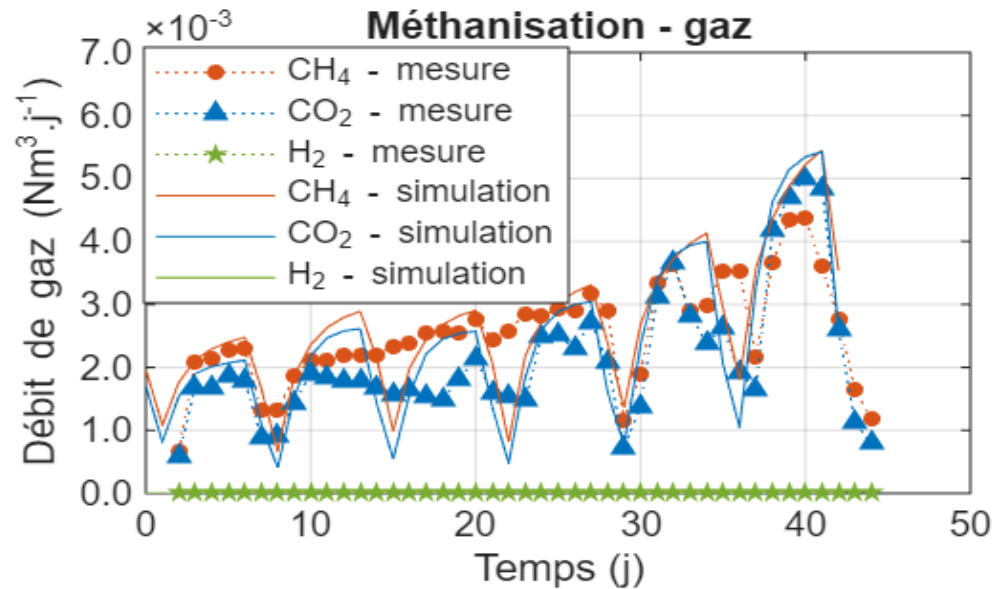
$$\frac{dS_{H_2}}{dt} = \frac{S_{H_2,entr\acute{e}e} q_{H_2,entr\acute{e}e}}{V_{gaz}} - \frac{S_{H_2} q_{gas}}{V_{gaz}} + \rho_{T,H_2} \frac{V_{liq}}{V_{gaz}}$$

- Utilisation des mêmes paramètres dans tous les systèmes simulés (Segura et al., 2025), à l'exception du $k_L a$



(Batstone et al., 2002)

Résultats : échelle de laboratoire

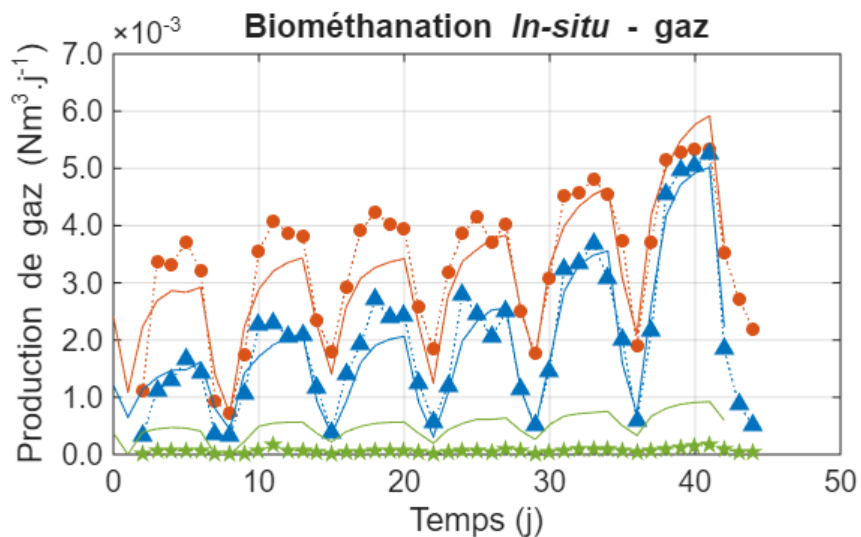


CVA
($\text{kg MSV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{j}^{-1}$)

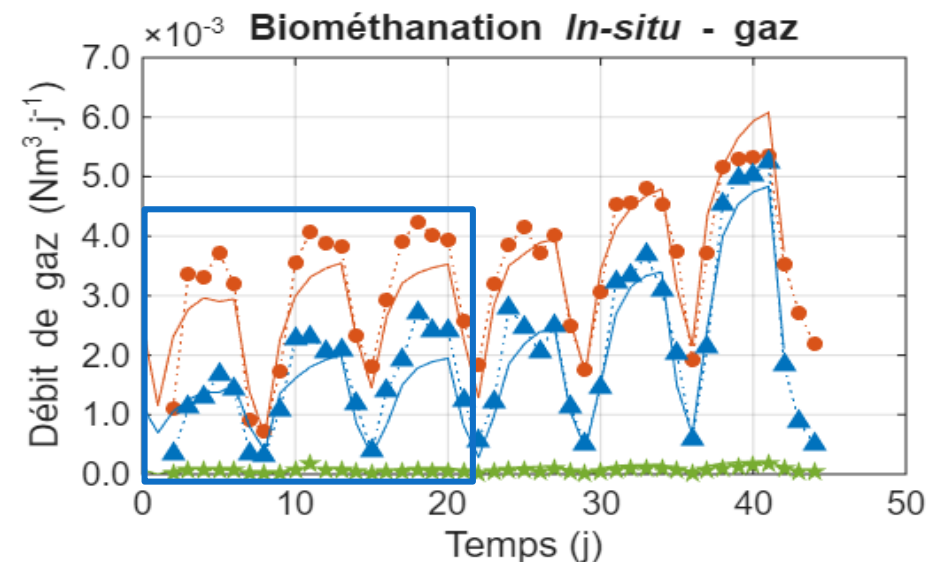
2,5	3,0	3,0	3,5	4,5	6,0
-----	-----	-----	-----	-----	-----

- Le modèle représente correctement les données expérimentales
- Accumulation d'H₂ sous forme gazeuse avec le modèle à partir de la valeur mesurée de $k_L a$

Résultats : focus sur le $k_L a$

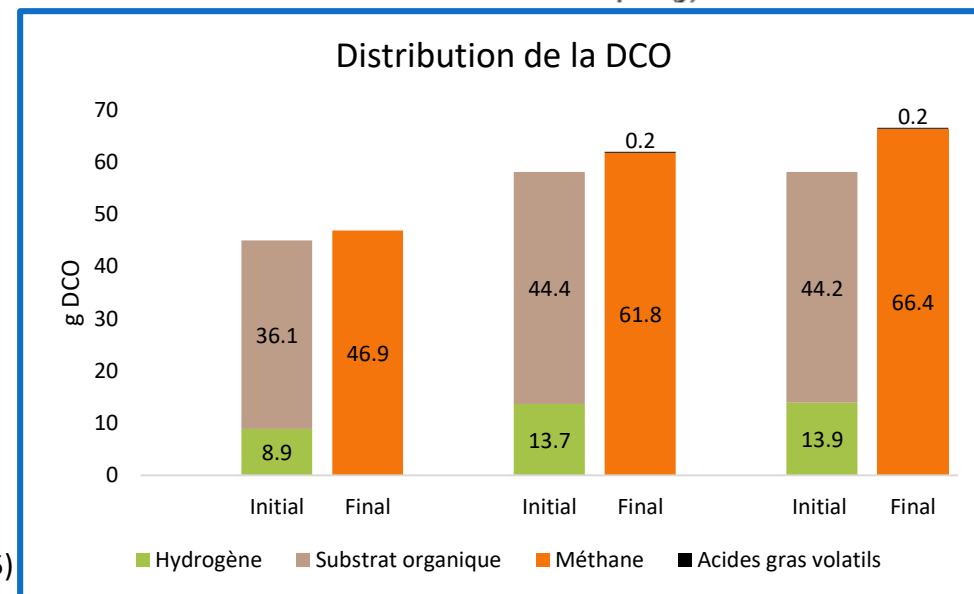


$k_L a$ de 533 j^{-1} à 3000 j^{-1}



Sous-estimation de la production de CH_4 au cours des 3 premières semaines avec le modèle

Hypothèse : l'ajout d' H_2 influence positivement la biodégradation du substrat

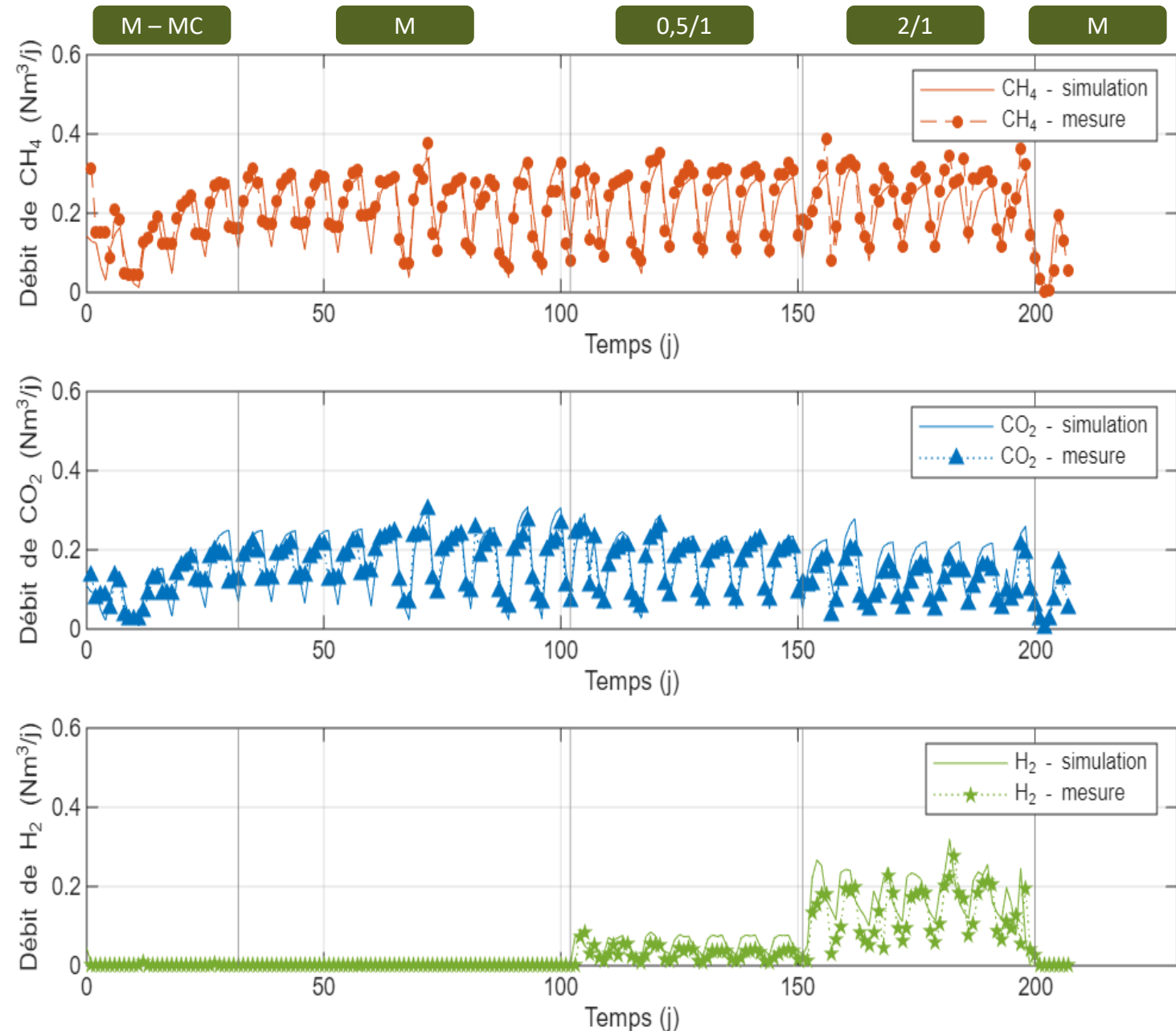


(Modifié de Mahieux, 2025)

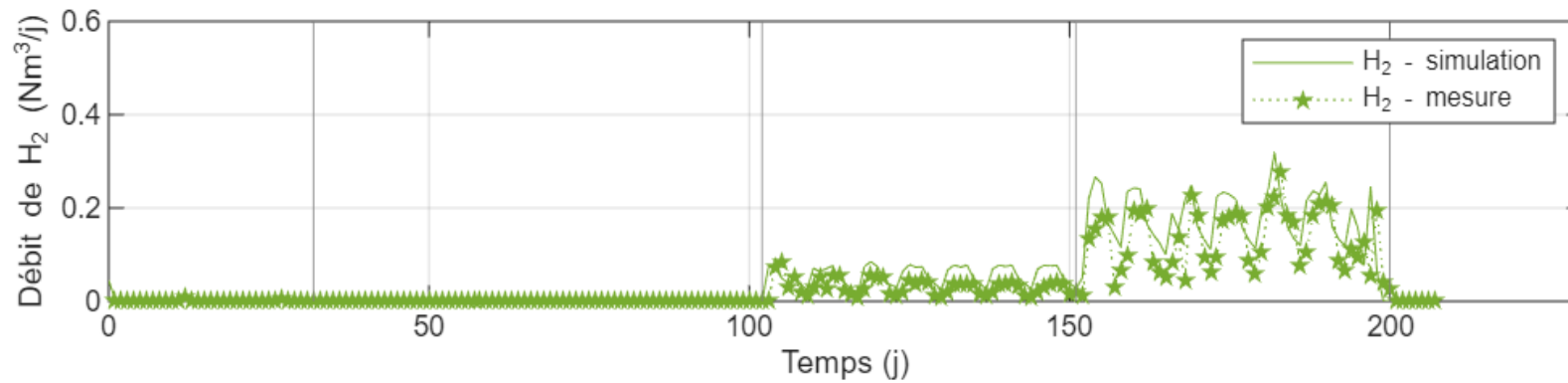
Résultats : échelle pilote

Condition	Abrév.	Jours
Méthanisation-Montée en charge	M – MC	0-31
Méthanisation	M	32-101
Biométhanation – 0,5H ₂ /1CO ₂	0,5/1	102-150
Biométhanation - 2H ₂ /1CO ₂	2/1	151-199
Méthanisation	M	200-206

- Bonne représentation des données expérimentales.
- Légère surestimation de l'H₂ en phase gazeuse avec le modèle utilisant la valeur mesurée de $k_L a$.



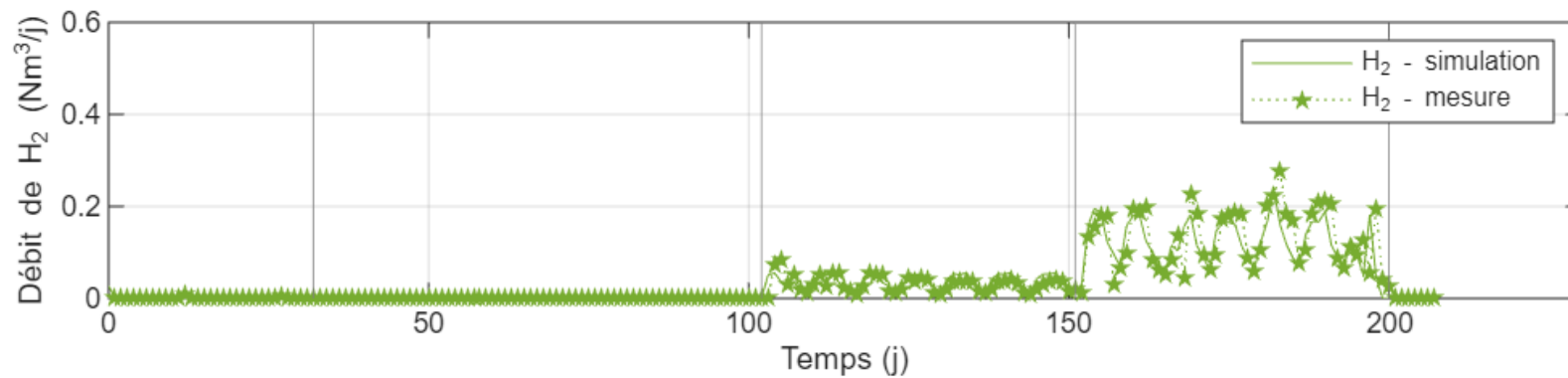
Résultats : focus sur le $k_L a$



Simulation du réacteur de biométhanisation *in situ* à l'échelle pilote avec le $k_L a$ calibré manuellement

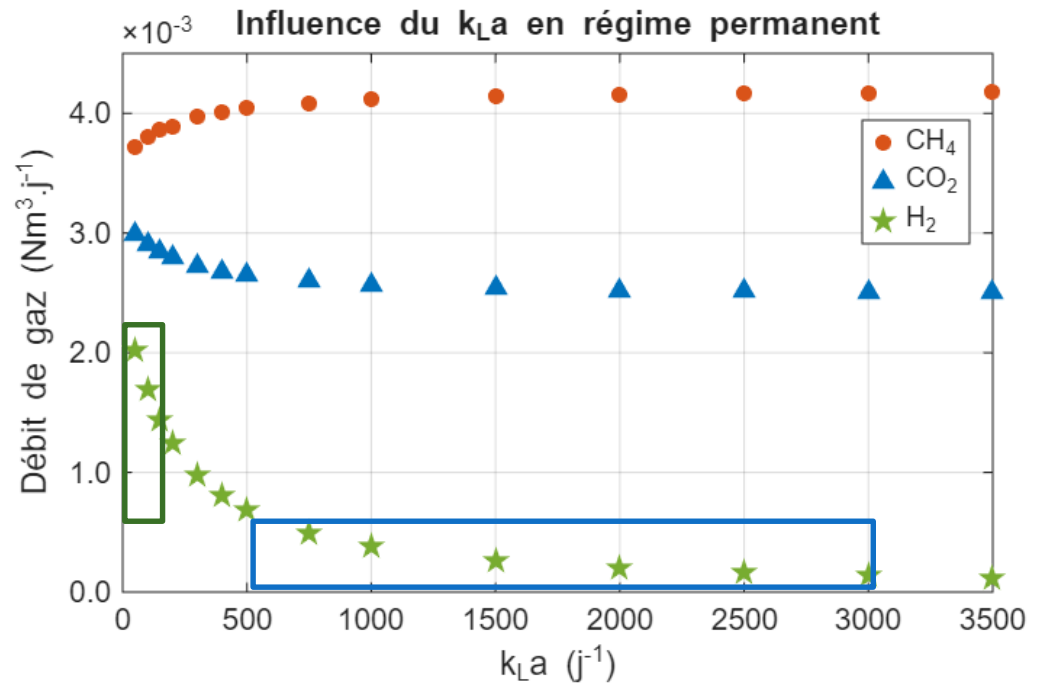
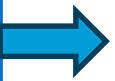


$k_L a$ de 39 j⁻¹ à 100 j⁻¹



Résultats : focus sur le $k_L a$

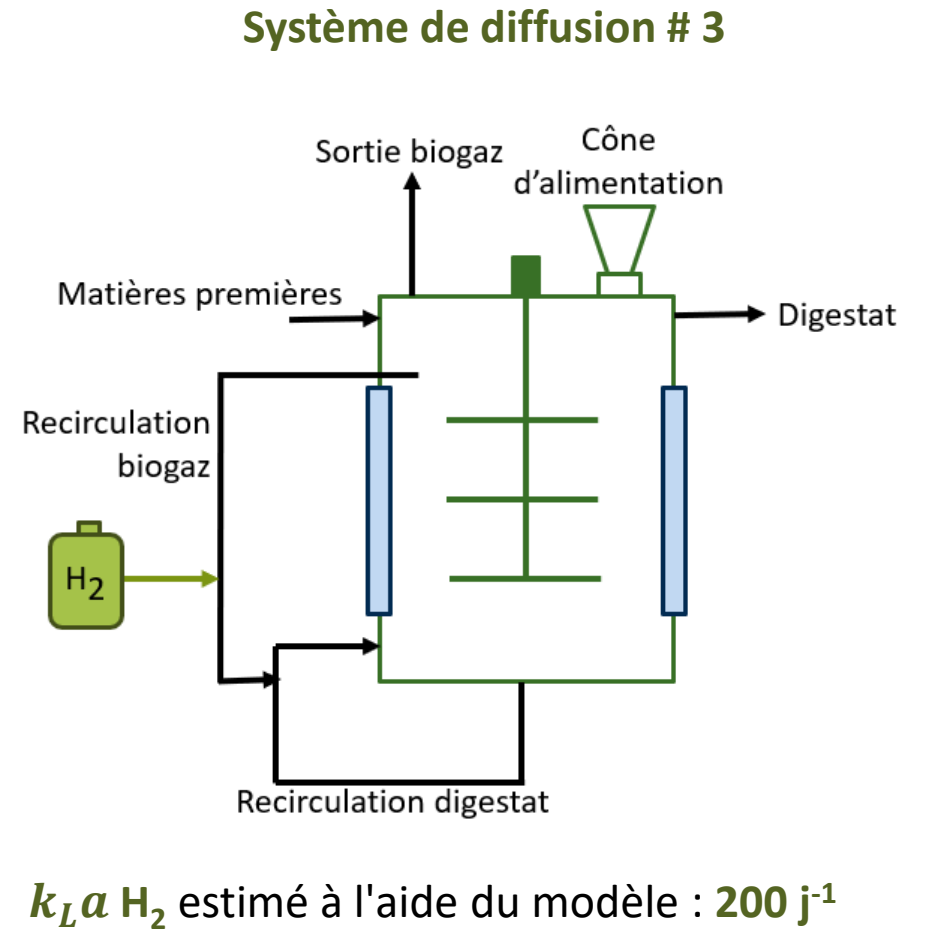
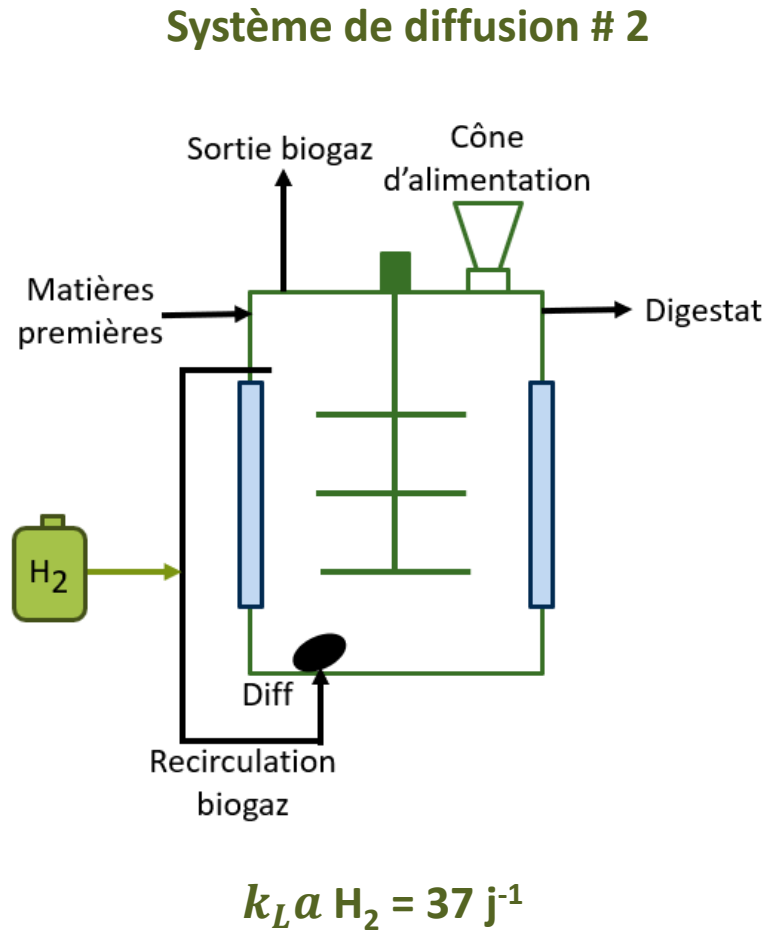
- Simulations en régime permanent à l'échelle du laboratoire
- CVA = 3,5 kg MSV.m⁻³.j⁻¹
- $k_L a$ analysé de 50 à 3500 j⁻¹



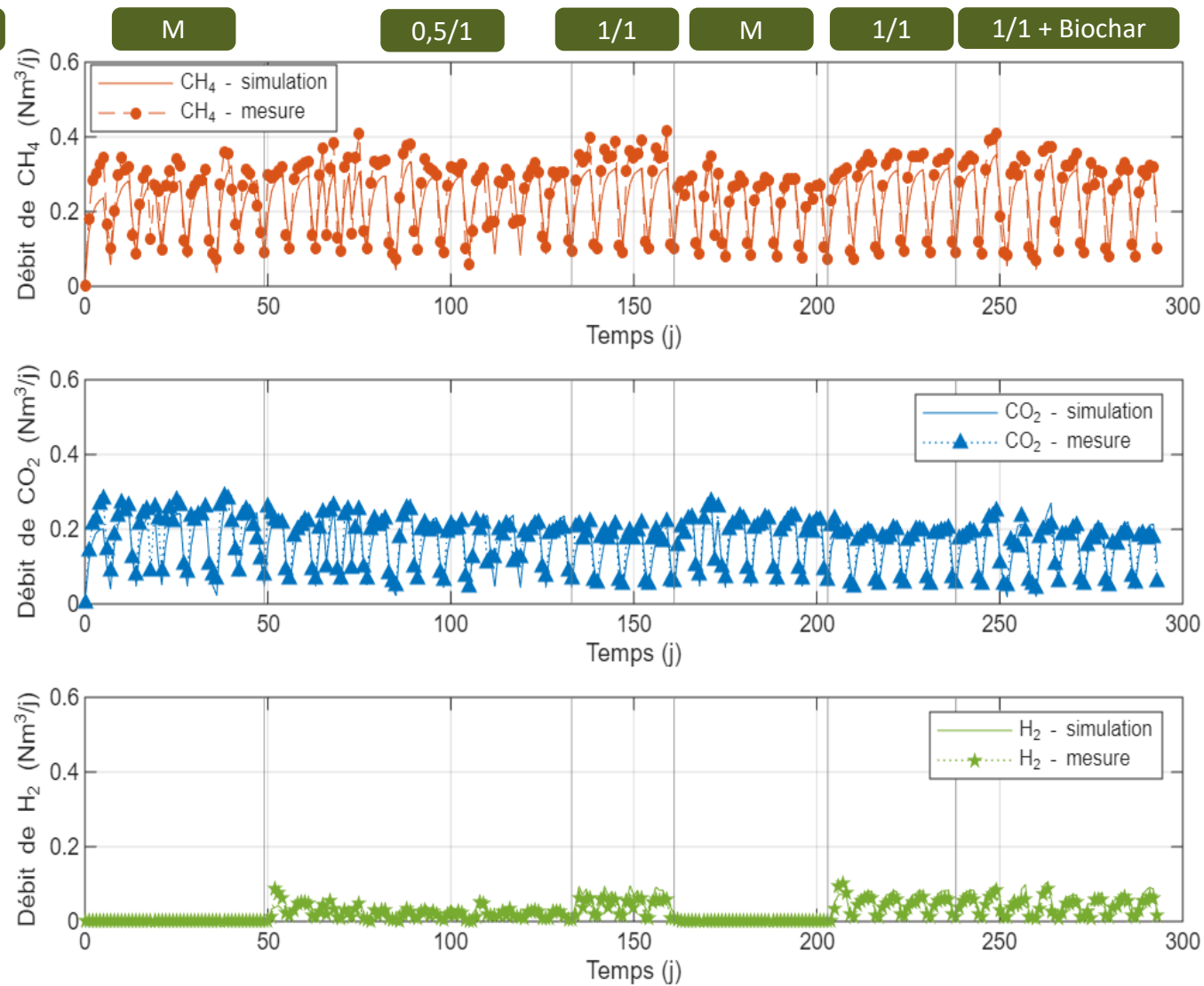
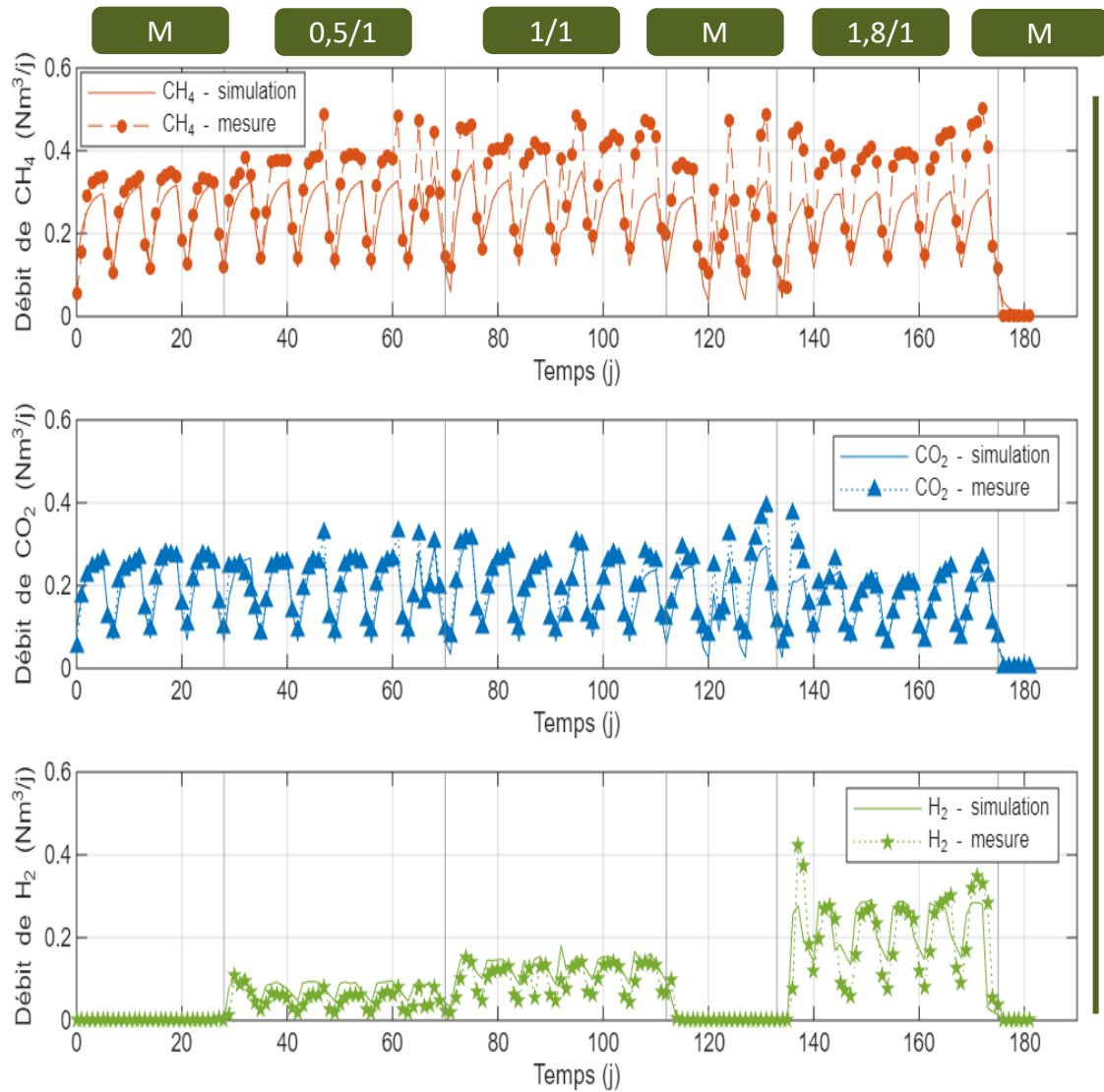
- Echelle laboratoire → $k_L a$ de 533 j⁻¹ à 3000 j⁻¹
- Echelle pilote → $k_L a$ de 39 j⁻¹ à 100 j⁻¹

- Pour des valeurs de $k_L a$ plus élevées, la différence de concentration entre les phases liquide et gazeuse diminue, et l'amélioration du transfert nécessite des valeurs de $k_L a$ plus élevées.
- Des facteurs biologiques supplémentaires (facteur d'amélioration biologique) pourraient influencer le taux de transfert de gaz (Jensen et al. 2025).

Pour aller plus loin : différents systèmes de diffusion à l'échelle pilote



Pour aller plus loin : différents systèmes de diffusion



Conclusions et perspectives

- L'ADM1 constitue une bonne base pour la simulation des processus de biométhanisation *in situ*.
 - L'injection d'hydrogène a probablement amélioré la dégradation de la matière. Toutefois, des expériences spécifiques doivent être menées pour confirmer cette hypothèse.
 - Le réacteur à l'échelle du laboratoire a présenté un meilleur transfert de masse que le réacteur à l'échelle pilote.
 - Le $k_L a$ a dû être augmenté de de 533 j^{-1} à 3000 j^{-1} à l'échelle du laboratoire contre 39 j^{-1} à 100 j^{-1} à l'échelle pilote.
 - Le troisième système de diffusion testé à l'échelle pilote, qui consiste à injecter de l'hydrogène dans la boucle de recirculation du digestat, a montré la meilleure conversion d' H_2 .
- Approfondir l'étude de la dégradation de la matière dans la biométhanisation *in situ*.
 - Comprendre les mécanismes de transfert de masse dans la biométhanisation *in situ* et les différences entre les valeurs $k_L a$ mesurées et celles déterminées à travers des modèles.



Merci de votre attention
Vous avez des questions ?



Références

- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T., Siegrist, H., Vavilin, V.A., 2002. The IWA anaerobic digestion model No 1 (ADM1). *Water Sci. Technol.* 45, 65–73. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>.
- Jensen, T.B., Anand, M., Batstone, D., Vedel Wegener Kofoed, M., 2025. Here comes the sun: intermittent operation of hydrogen-based in situ biomethanation at pilot-scale. *Appl. Energy* 401, 126601. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126601>
- Mahieux, M., 2025. Biométhanation in situ, compréhension des mécanismes et optimisation opérationnelle. Thèse de doctorat, Université de Montpellier.
- Segura, T., Zanoni, P., Brémond, U., Lucet-Bérille, C., Pradel, A., Escudíe, R., Steyer, J.P., 2025. Modelling anaerobic digestion of agricultural waste: from lab to full scale. *Waste Manag.* 200. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114739>.



De la Digestion Anaérobie à l'Électrométhanogénèse : Rôle des Biofilms Electroactifs pour Maximiser la Conversion de Substrats Complexes Réels en Biométhane

Anne-Laure Borg – CIFRE PhD Student

Benjamin Erable – LGC Toulouse

Claire Dumas – TBI

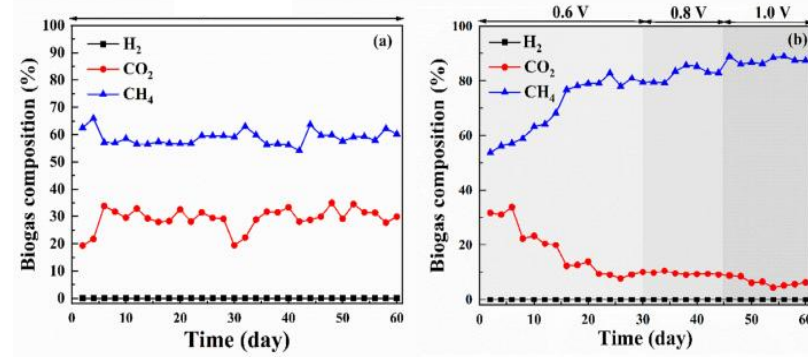
Gaspard Bouteau, Quentin Aemig, Geoffrey Karakachian – ENGIE Lab CRIGEN



Verrous de la Digestion Anaérobie... Motivant le développement de l'Électrométhanogénèse.

1 Fraction élevée de CO₂ dans le biogaz

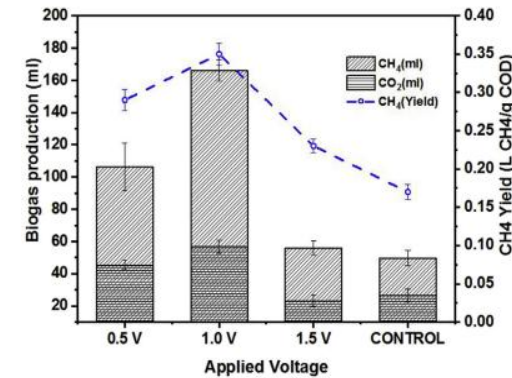
➔ ↑ Teneur en CH₄ et ↓ CO₂



Source: Gao et al. (2022)

2 Rendement de production de biogaz limitée

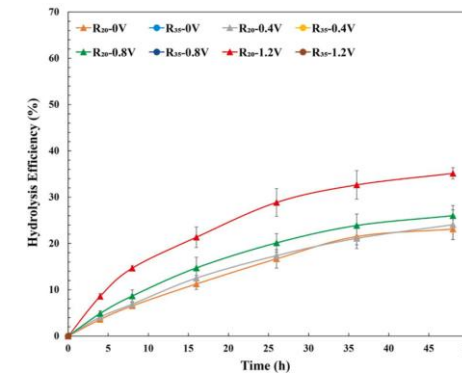
➔ ↑ Rendement de production de biogaz



Source: Flores-Rodriguez et al. (2019)

3 Matière organique récalcitrante

➔ ↑ Efficacité de dégradation du substrat

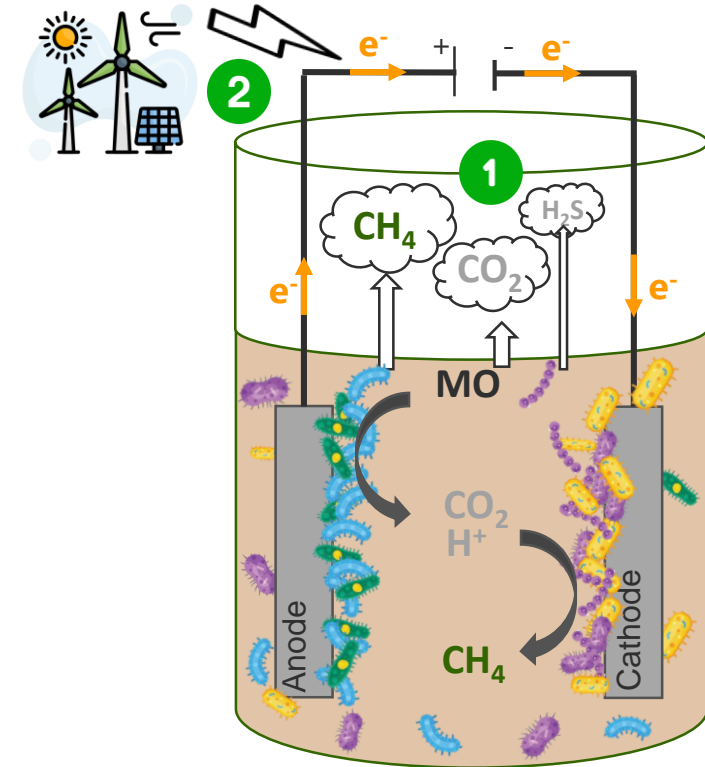


Source: Huang et al. (2022)

L'électrométhanogénèse, qu'est-ce que c'est ?

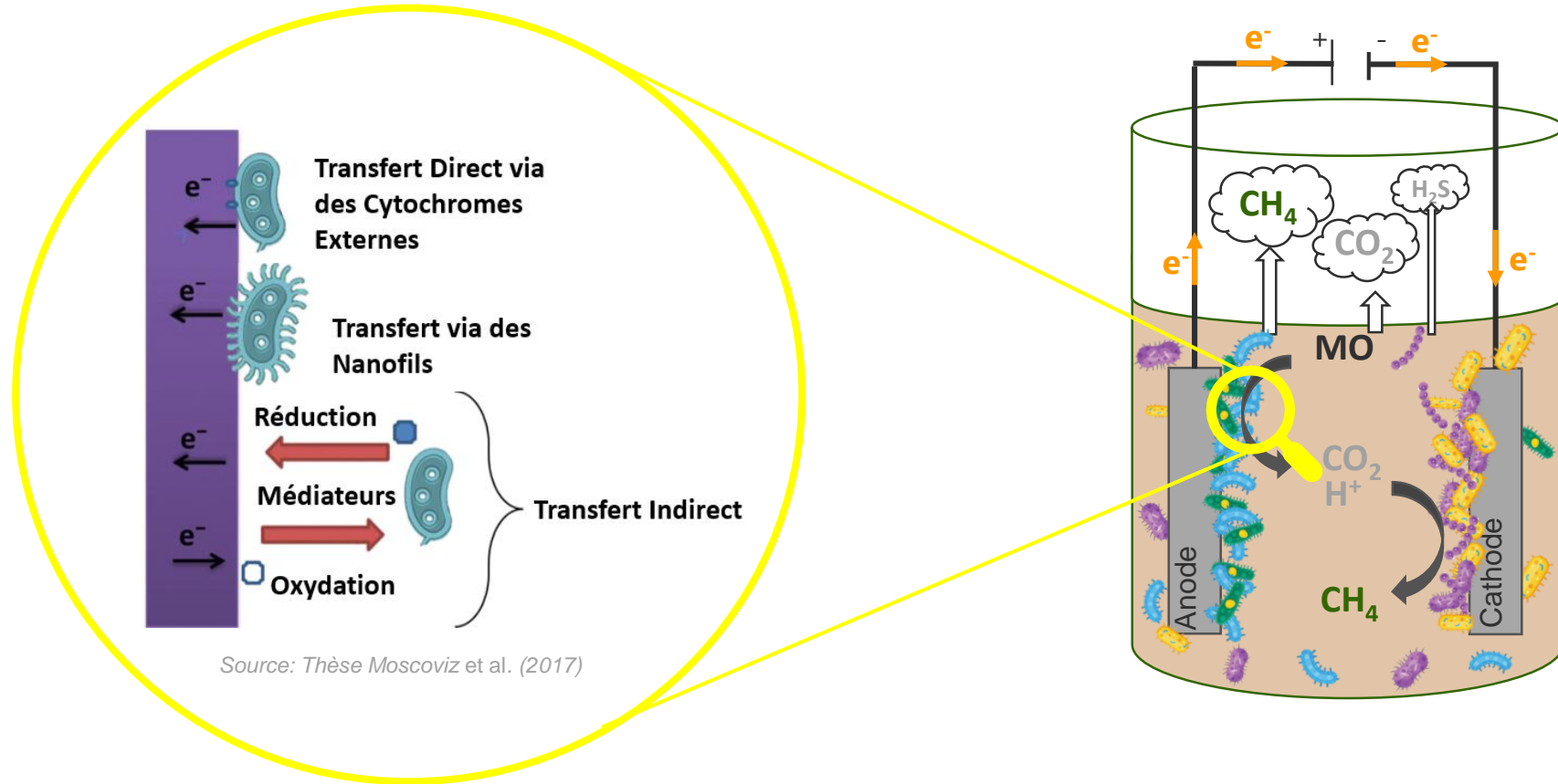
Procédé bioélectrochimique dans lequel les **interactions entre les microorganismes**, dans les biofilms et dans le milieu, et les **électrodes, auxquelles une tension électrique est appliquée**, permettent l'oxydation de la matière organique en **CO₂** et **protons** à l'anode, et la production de **CH₄** par réduction du **CO₂** à la cathode.

- Améliore les rendements de production de biogaz **1**
- Améliore la composition du biogaz en méthane **1**
- Valorise le surplus d'électricité renouvelable : Power-to-Gas **2**

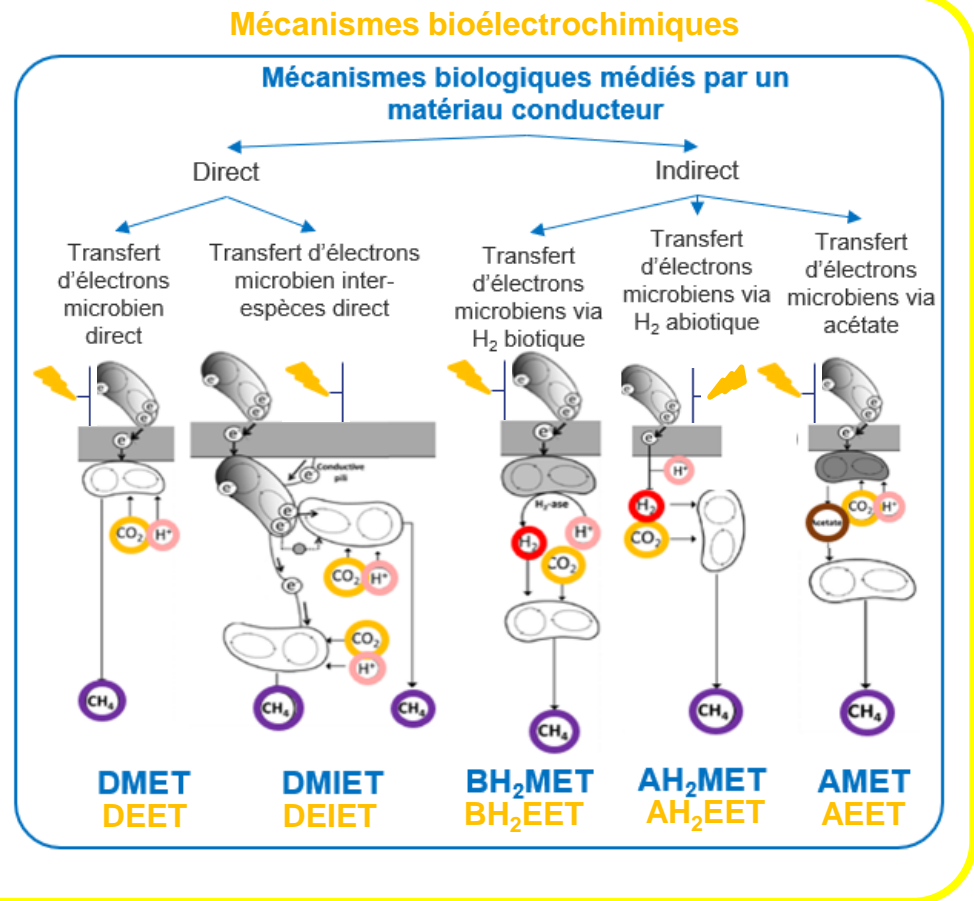
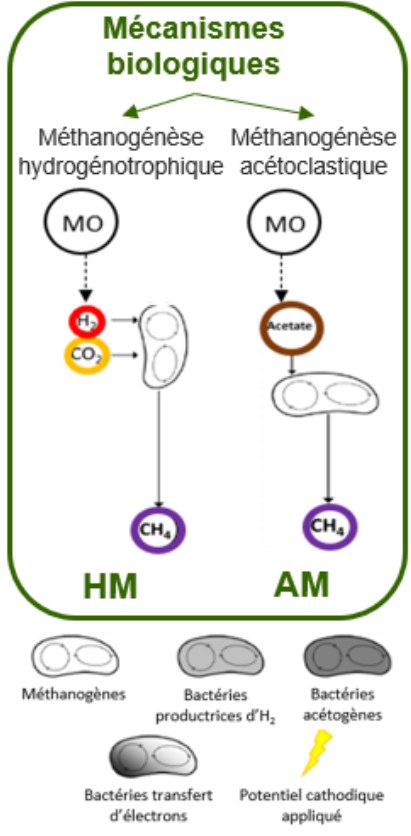
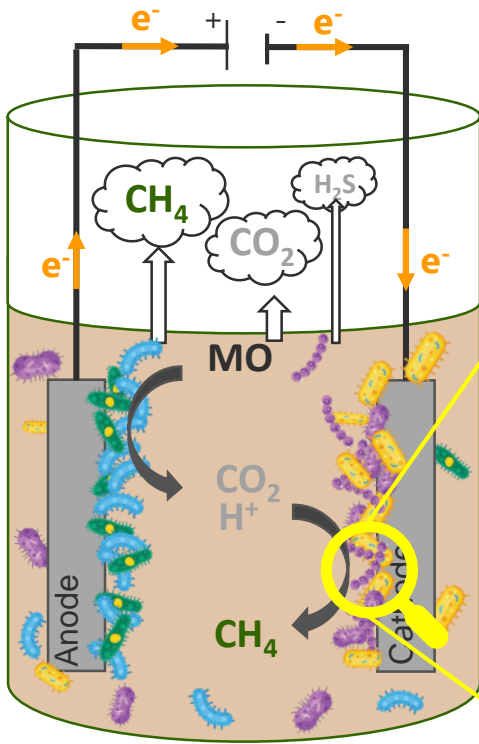


ENGIE Production de biométhane **X10** pour 2035

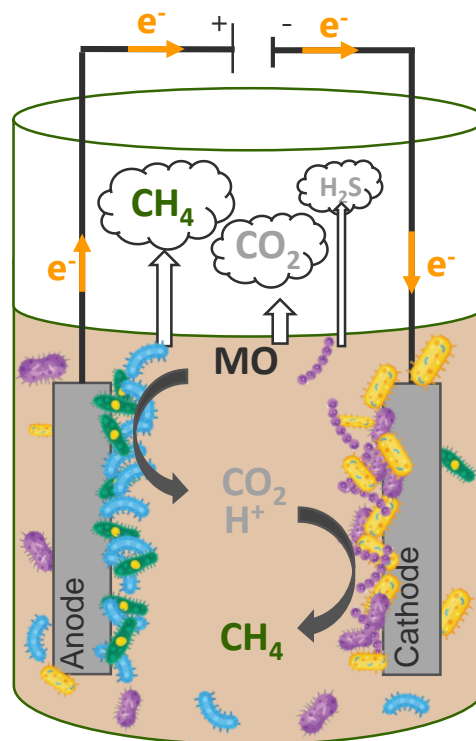
Les mécanismes anodiques de l'électrométhanogénèse



Les mécanismes cathodiques de l'électrométhanogénèse



Les mécanismes cathodiques de l'électrométhanogénèse



- Comprendre les différents mécanismes anodiques et cathodiques de l'EMG sur substrats complexes par l'expérimentation.
- Optimiser le procédé en quantifiant et contrôlant ces différents mécanismes.

Matériels et Méthodes

Substrats



Intrants frais



Digestat

Électrodes



Feutre de carbone



Brosse de carbone

Réacteurs



EMG



Témoin DA

Principaux appareils analytiques



Potentiostat



Compteur de gaz



Analyseur de gaz

Setup expérimental



La nécessité d'un biofilm anodique en électrométhanogénèse

Réaliser un premier essai d'EMG en réacteur une chambre sur substrat complexe avec deux polarisations cathodiques différentes

Matériels et Méthodes

- Inoculum = Digestat
- Substrat = Mélange complexe (Fumier, lisier, biodéchets, paille)
- $E_{\text{cathode}} = -0,8 \text{ V vs. ECS} \rightarrow$ Favoriser le Transfert Direct d'Electrons (DET).
- $E_{\text{cathode}} = -1,2 \text{ V vs. ECS} \rightarrow$ Favoriser le Transfert Indirect Médié par l' H_2 (HMET).

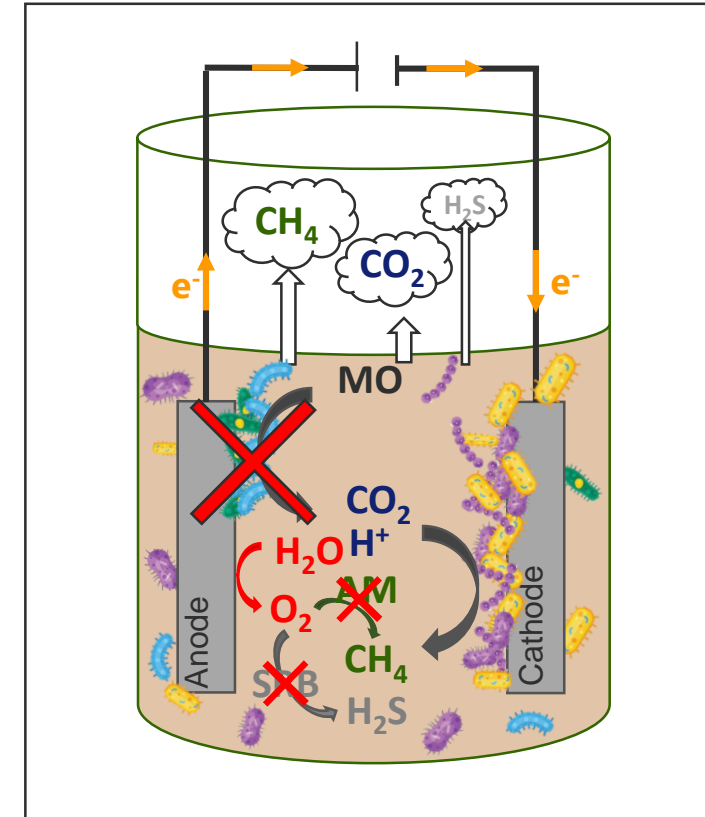
Résultats

Volume produit (NmL/g _{MV})	CH ₄	H ₂ S
Témoin AD	136 ± 8	0,17 ± 0,01
EMG_0,8	118 ± 6	0,03 ± 0,01
EMG_1,2	5 ± 6	0,00 ± 0,00

➔ Baisse de 13 % de la production de CH₄ en EMG_0,8 vs. DA.

➔ Diminution significative de la production d'H₂S.

Discussion



Conclusion

Ces résultats semblent démontrer l'importance du biofilm anodique en électrométhanogénèse.

L'effet de la nature du substrat en électrométhanogénèse

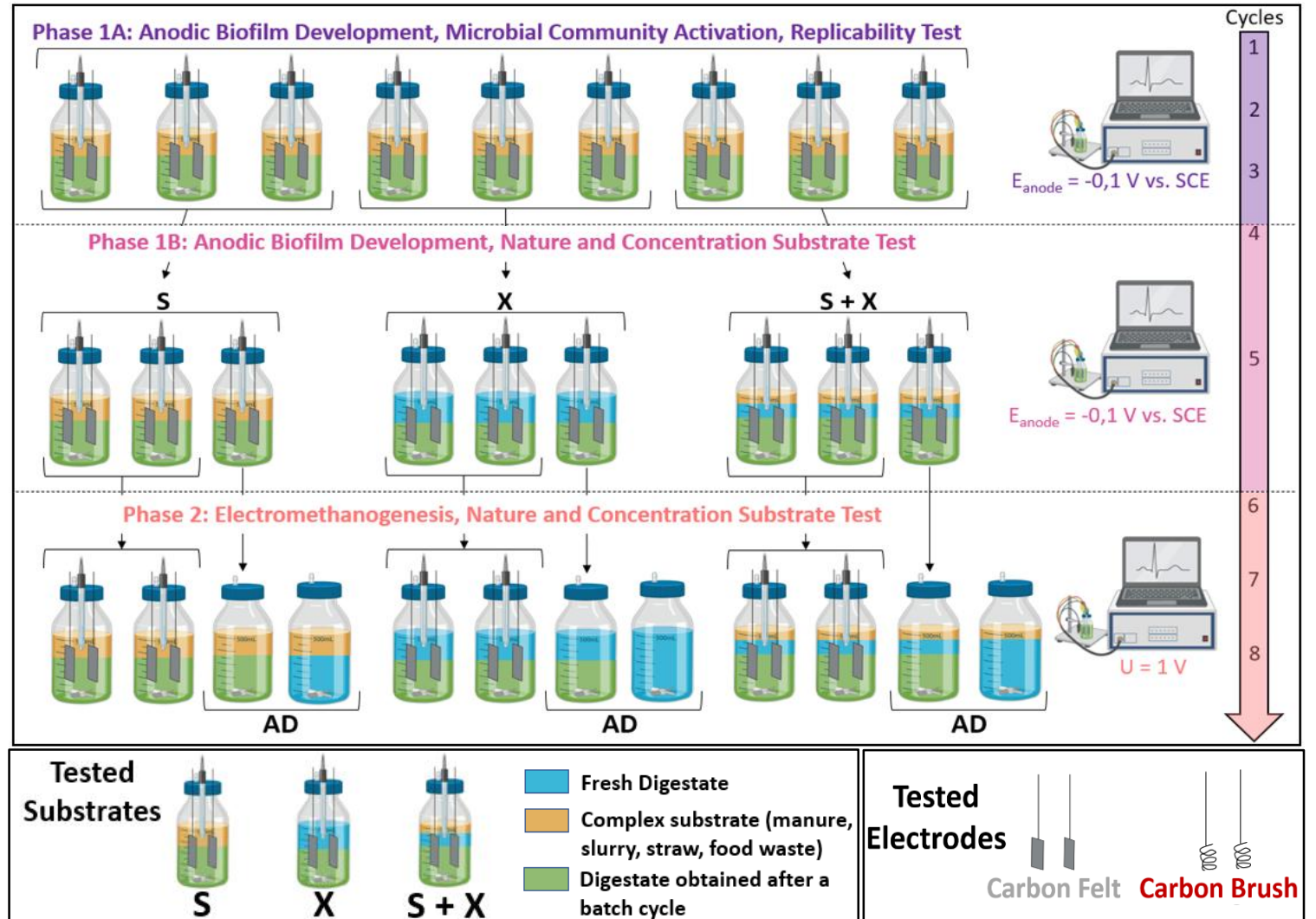
Réaliser un essai d'EMG avec développement de biofilm anodique sur différents substrats complexes et deux types d'électrodes.

Matériels et Méthodes

1 Développement biofilm anodique sur substrat mixte complexe et test de réplicabilité

2 Développement biofilm anodique + différenciation des substrats complexes

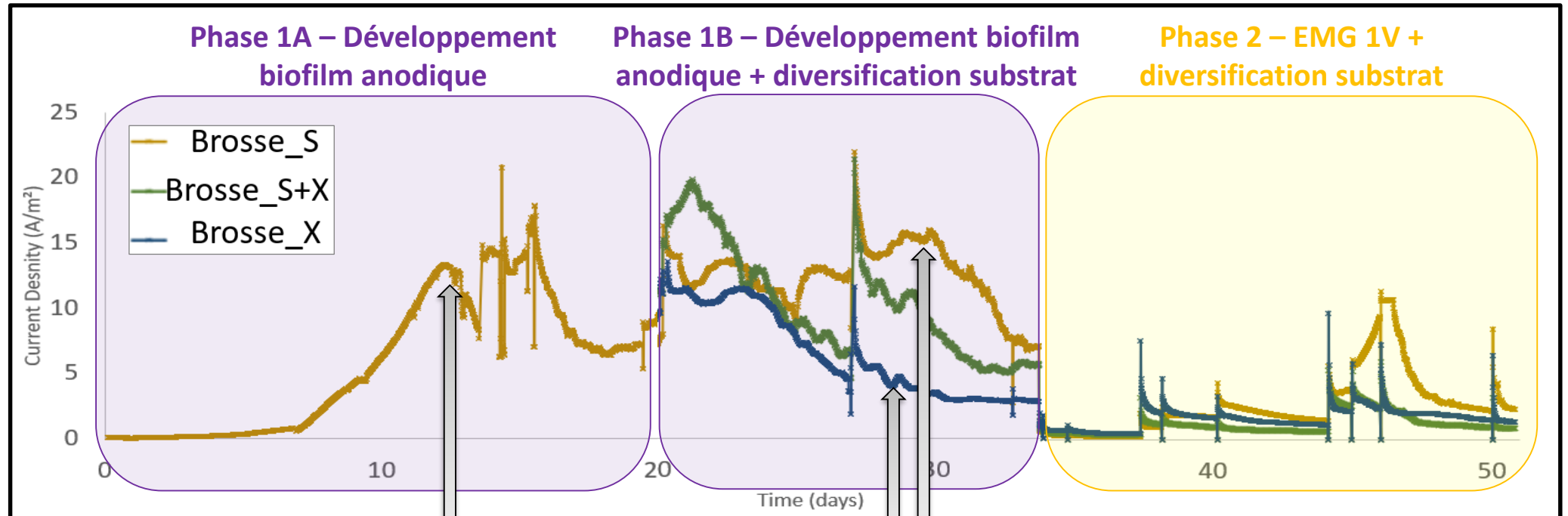
3 Électrométhanogénèse à 1 V avec différenciation des substrats complexes



L'effet de la nature du substrat en électrométhanogénèse

Réaliser un essai d'EMG avec développement de biofilm anodique sur différents substrats complexes et deux types d'électrodes.

Résultats



Développement d'un biofilm anodique

Influence de la nature du substrat sur le courant produit

Conclusion

Le substrat complexe, plus riche en macromolécules dégradables, induit la production d'un courant plus important et plus stable que le digestat.

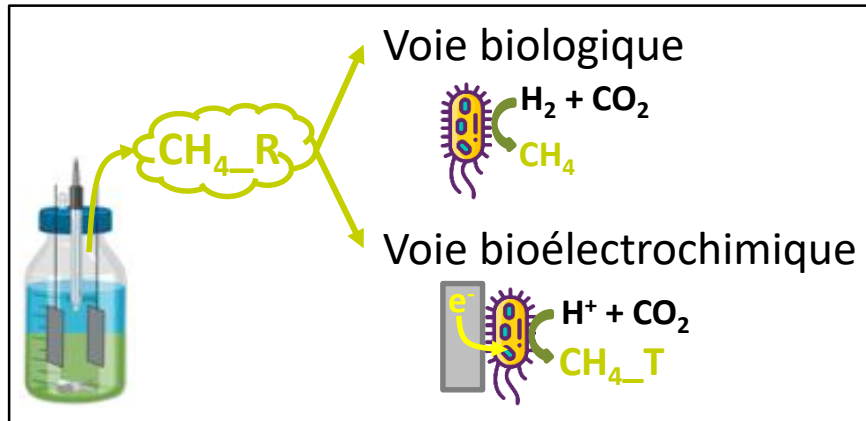
Hypothèse

Plus de courant = Conversion plus efficace du CO₂ en CH₄ ?

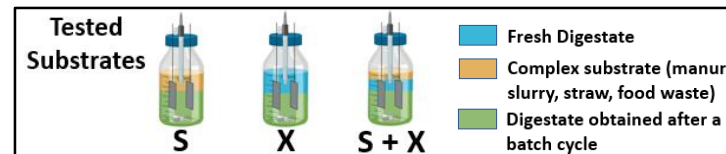
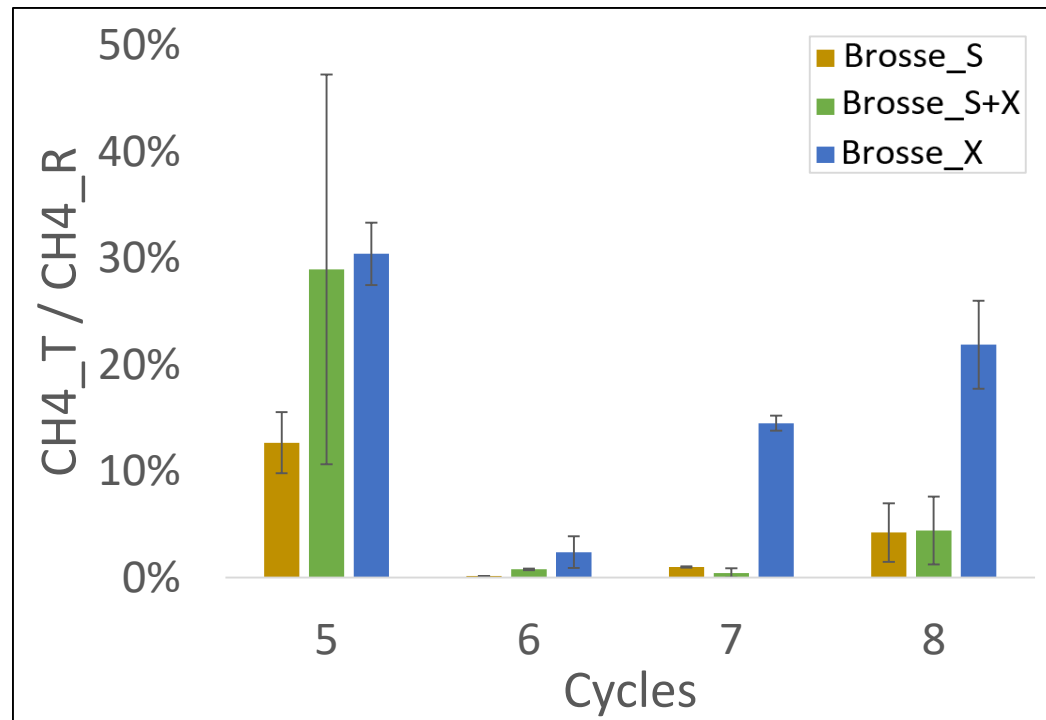
L'effet de la nature du substrat en électrométhanogénèse

Réaliser un essai d'EMG avec développement de biofilm anodique sur différents substrats complexes et deux types d'électrodes.

Résultats



$CH_4_T / CH_4_R =$ Part du CH_4 théoriquement produit par voie bioélectrochimiques.



Conclusion

La contribution bioélectrochimique dépend du substrat : <10 % du CH_4 total pour S vs. ~20% pour X.

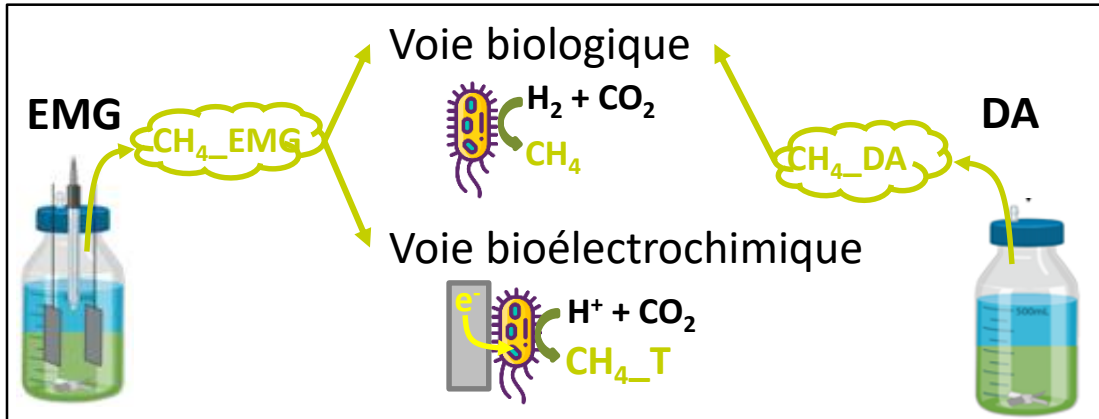
Hypothèse

Importante disponibilité de macromolécules fermentescibles = DA fonctionnelle donc contribution faible du système bioélectrochimique.

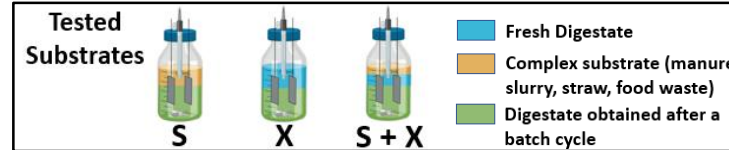
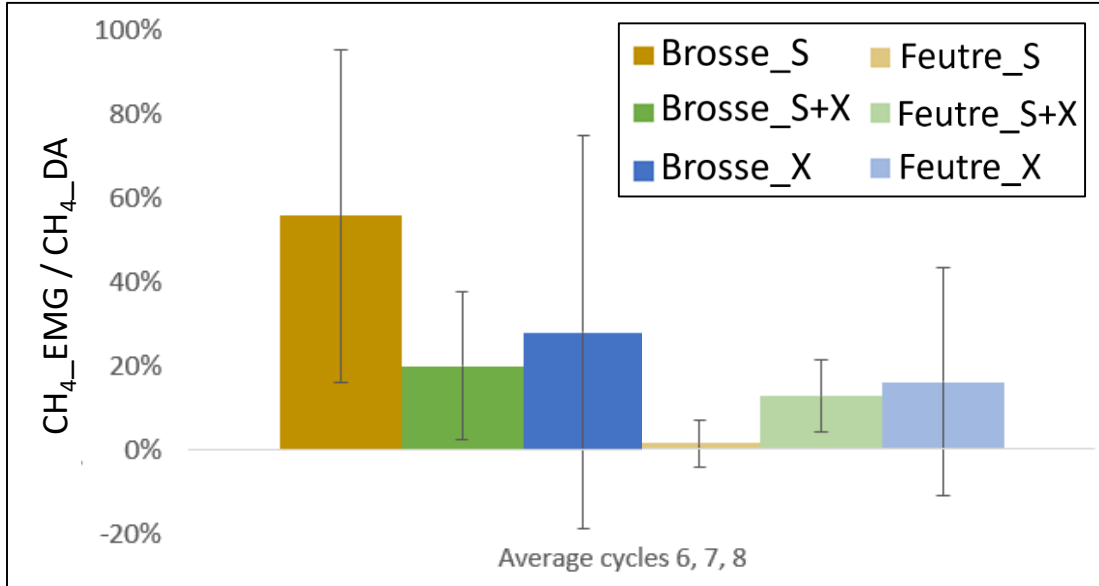
L'effet de la nature du substrat en électrométhanogénèse

Réaliser un essai d'EMG avec développement de biofilm anodique sur différents substrats complexes et deux types d'électrodes.

Résultats



$\text{CH}_4\text{-EMG} / \text{CH}_4\text{-DA} =$ Pourcentage d'amélioration de la production de CH_4 en EMG vs. DA



Conclusion

Globalement, l'EMG permet de produire plus de CH_4 que la DA.

Remarque

Même sans différences significatives, cet effet de l'EMG semble également dépendre de la structure des électrodes.

Conclusions et Perspectives

1

La nécessité du biofilm anodique.

- Peu d'information dans la littérature à ce sujet,
- Biofilm anodique indispensable au bon fonctionnement de l'EMG : limite la production d'O₂ et stabilise la production de CH₄.

2

L'effet de la nature du substrat sur l'électrométhanogénèse.

- Nature du substrat / concentration en macromolécule fermentescible primordiale en EMG,
- Modification la contribution bioélectrochimique et donc impacte les performances de production de CH₄.

3

L'effet de la structure des électrodes sur l'électrométhanogénèse.

- Activité électrochimique liée aux performances du procédé d'EMG mais de manière non linéaire,
- D'autres phénomènes, notamment liés aux électrodes et à leur structure, comme l'encrassement des électrodes ou la compétition entre EAB et méthanogènes, impactent les voies métaboliques de la production de CH₄.

A

Identifier et quantifier la compétition entre EAB et méthanogènes.

B

Explorer les interconnexions substrat-électrode afin d'identifier les conditions limitant l'encrassement et la compétition microbienne.

**MERCI A TOUS POUR VOTRE ATTENTION !
DES QUESTIONS ?**

annelaure.borg@engie.com

PROCÉDÉS ET VALORISATION

DIGESTATS : CONCEPTION, VALORISATION ET DURABILITÉ

Animateur
Romain Girault

1 Nicolas Auvinet, OPALE INRAE

Impact des critères de conception des unités de méthanisation sur le potentiel méthanogène résiduel du digestat

2 Julie Jimenez, LBE INRAE

METHASOLCN : Méthanisation et retour au sol - prédire la minéralisation du carbone et de l'azote des intrants et digestats par des méthodes spectrales

3 Julie Jimenez, LBE INRAE

Une stratégie combinée acidification-séchage pour améliorer la valorisation agronomique des digestats : devenir de la matière et des contaminants

4 Wasim Ahmed, LBE INRAE

Optimisation multi-objectif d'une filière de méthanisation : évaluation de la production durable de biogaz et de la gestion du digestat sous variabilités saisonnières

PREDIGEM _ Impacts des solutions de traitement du digestat sur les émissions de méthane au stockage.

Equipe projet Inrae UR Opaale : Nicolas Auvinet, Romain Girault, Fabrice Guiziou, Guillaume Nunes, Martine Sarrazin, Anne-Cécile Santellani, Matheus Viera



Présentation de l'étude



PREDIGEM

- **Objectifs du projet**

- Identification de solutions de traitement du digestat existantes et leurs évaluations à différentes échelles



BMP



Mesures pilotes 1m³



Mesures sur site

- Développement et évaluation d'un outils de prédiction des émissions de méthane au stockage
- *Financement*

Identification des solutions de traitement du digestat

- Réflexions au niveau des solutions existantes

- Temps de séjour très long
- Stockage sans chauffage avec récupération du biogaz
- Séparation de phase

- Hygiénisation
- Mais aussi :
 - ajout d'adjuvants
 - micro-aération
 - dégazage
 - ...

Solutions retenues
pour l'étude

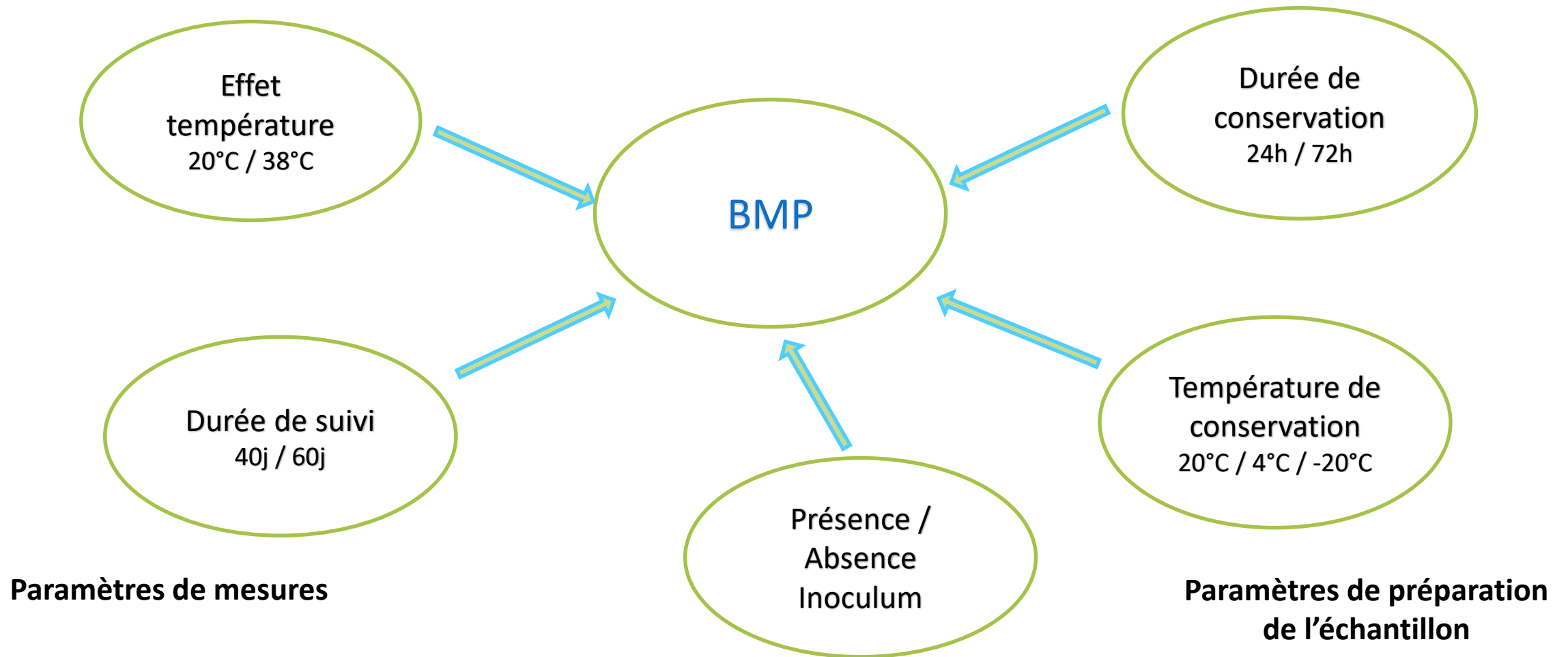
Couplage des
deux solutions

Protocole de mesures des BMP



Mesures du BMP

- Réflexion autour des paramètres de mesures des BMP



Résultats de cette pré-étude

PARAMETRE	EFFET	DESCRIPTION	CHOIX POUR L'ETUDE
Durée de conservation	-	Peu d'effet entre 24 et 72h mais certaines mesures montre des variations à 72h	Lancement des BMP le plus rapidement possible après prélèvement < 24h/36h
Température de conservation	-	Peu d'effet entre 4°C et 20°C dans le cas d'une durée de conservation faible	Conservation à température ambiante
	++	Effet de la congélation (> 20 %)	Pas de congélation des échantillons
Inoculum	-	Pas d'effet significatif (hors congélation)	Présence d'inoculum
Température	+++	20 % d'écart en moyenne entre 20°C et 38°C mais avec corrélation entre les deux mesures $BMP_{20^{\circ}C} = 60 \% BMP_{38^{\circ}C}$	Mesure du BMP à 38°C
Temps de mesure		Peu de production de méthane sur cette période. Difficulté à évaluer l'effet à cause des incertitudes de mesures	Mesure sur 60 j

Identification des installations de méthanisation

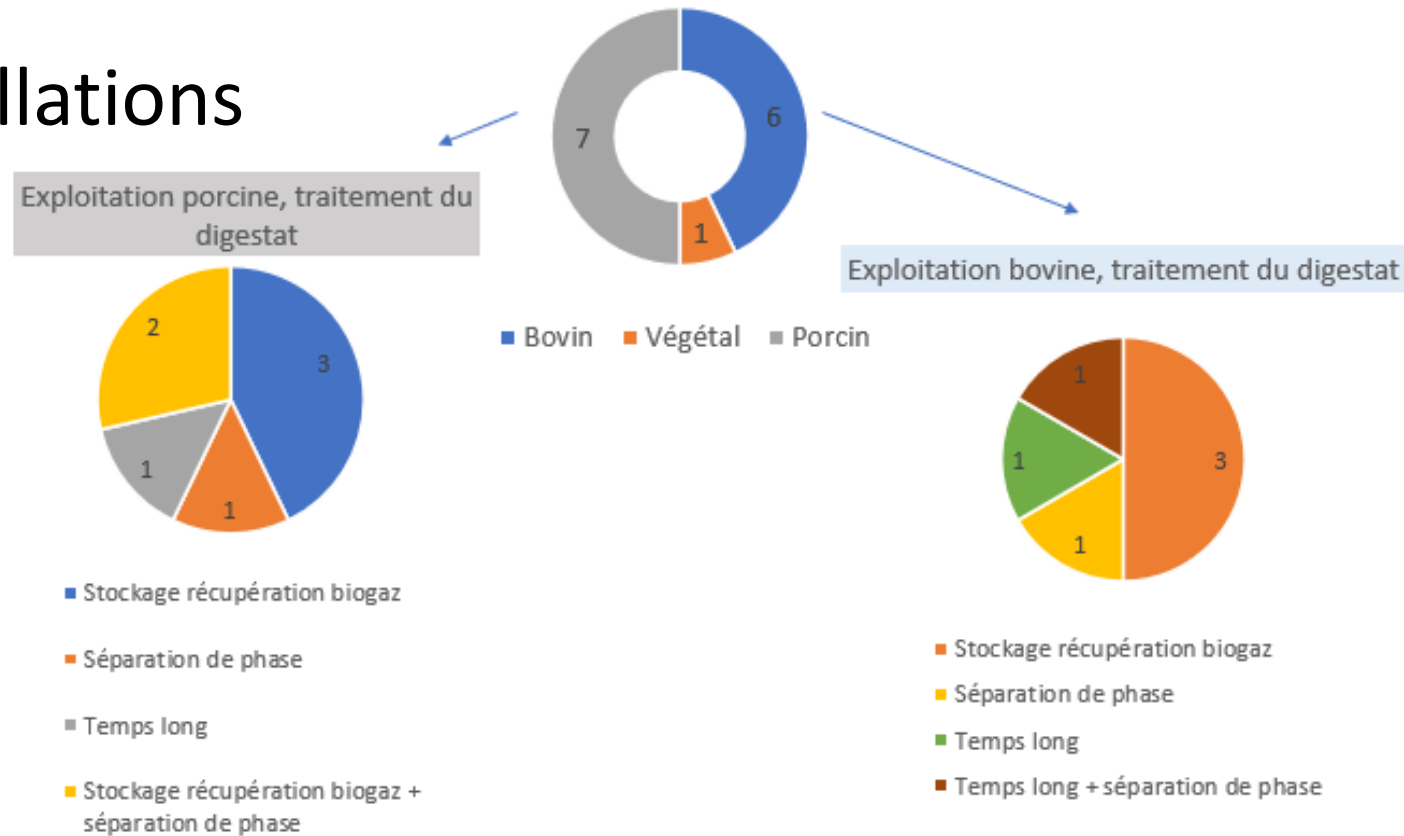
- Identification avec l'aide de l'AAMF et AILE
- Intégration d'effluents de différents types :
 - Bovins
 - Porcins
 - Végétaux
- Pour chaque site :
 - BMP avant solution de traitement du digestat
 - BMP après solution de traitement du digestat



Typologie des installations

Type d'effluent (majoritaire)

- 14 installations



Traitement	« Temps long » > 100j	Stockage avec récupération de biogaz	Séparation de phase	Couplage de procédé
Nombre d'installations	2	7	2	3

Echantillonnage

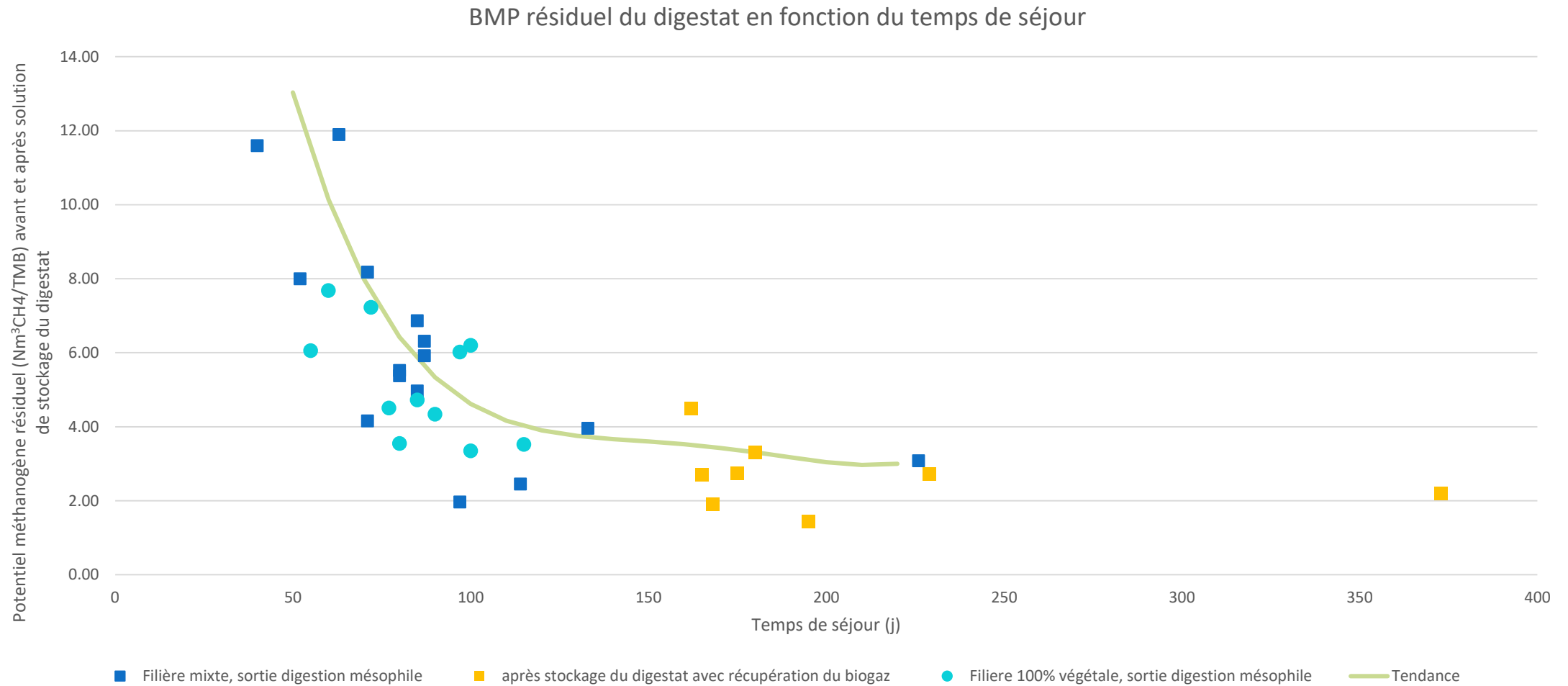
- Prélèvements \simeq 20 litres après :
 - Agitation pendant \simeq 20mn
 - Vidange des volumes morts
- BMP
 - Conservation :
 - Température ambiante
 - Durée < 24/36h
 - Avec inoculum
 - Condition de mesures :
 - 38°C
 - 60 jours
 - Triplicat



Résultats



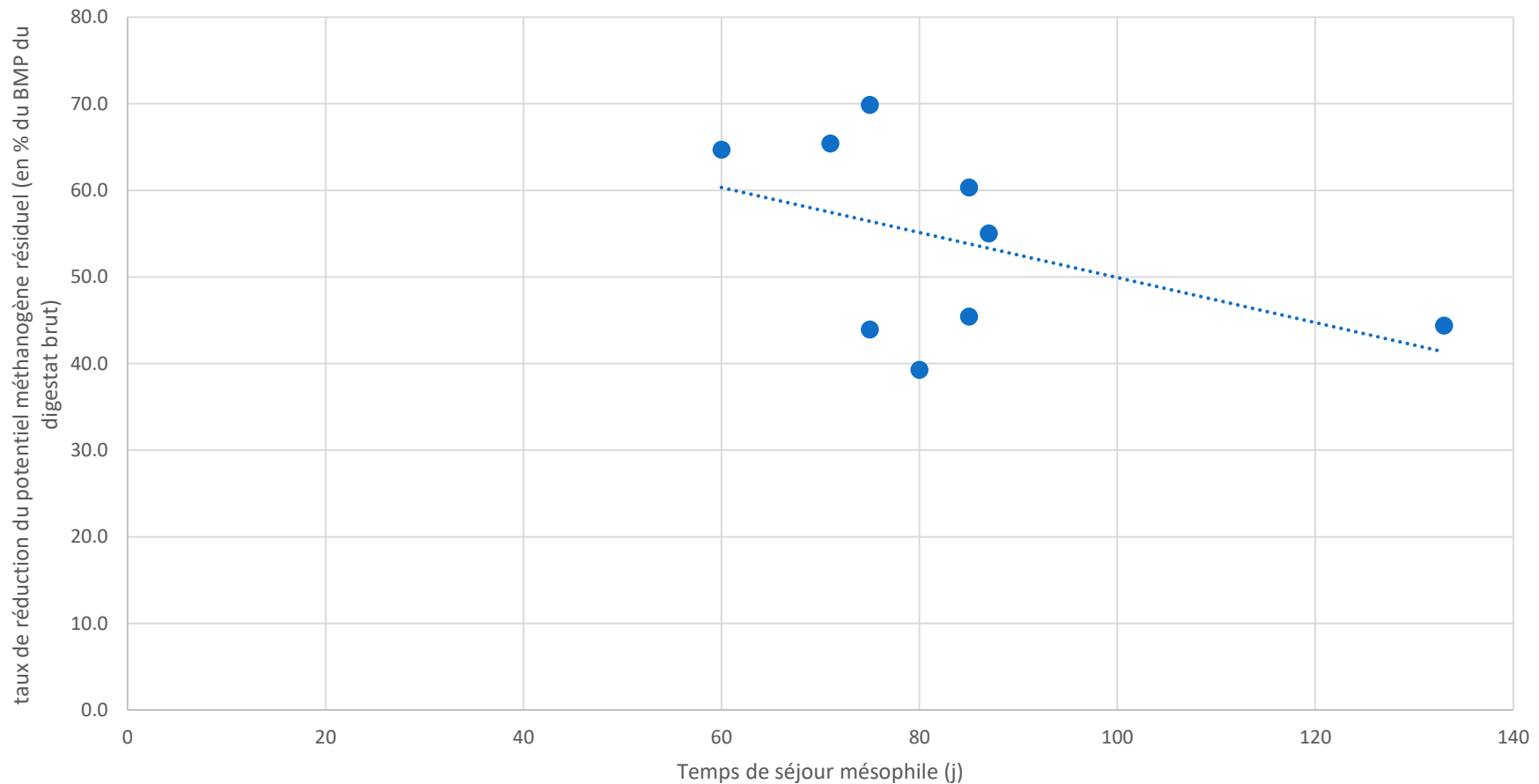
Solution de stockage du digestat avec récupération de biogaz



- Temps de séjour solution de traitement sont estimés
- Effet temps de séjour jusqu'à $\approx 100j$
- Sur solution de stockage : effet temps de séjour + diminution T°

Solution de stockage du digestat avec récupération de biogaz

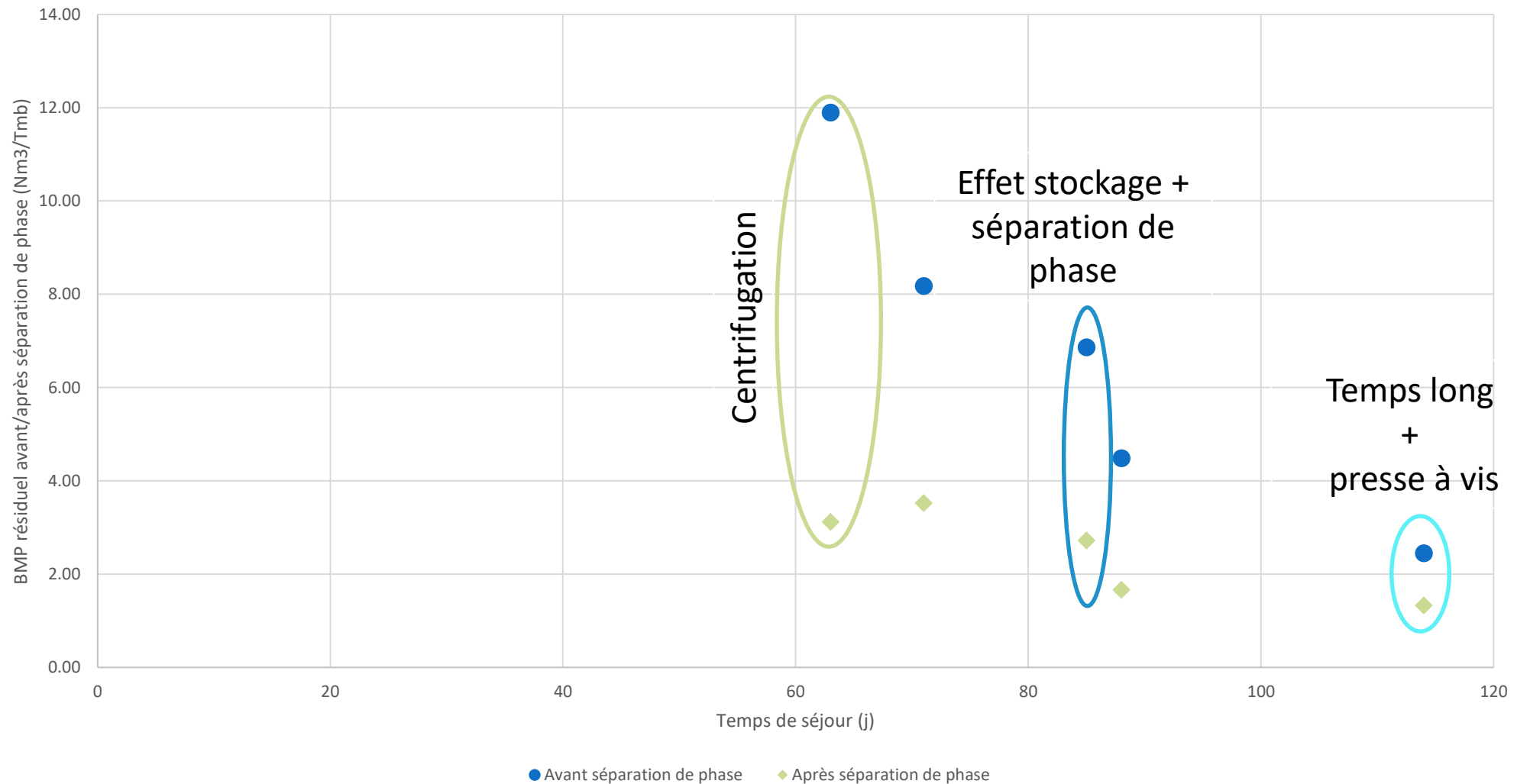
Abattement du BMP avant/après stockage avec récupération de biogaz en fonction du temps de séjour mésophile



- Moyenne autour de 50 % de réduction (+/- 9 %)
- Taux de réduction diminue avec l'allongement de la phase mésophile

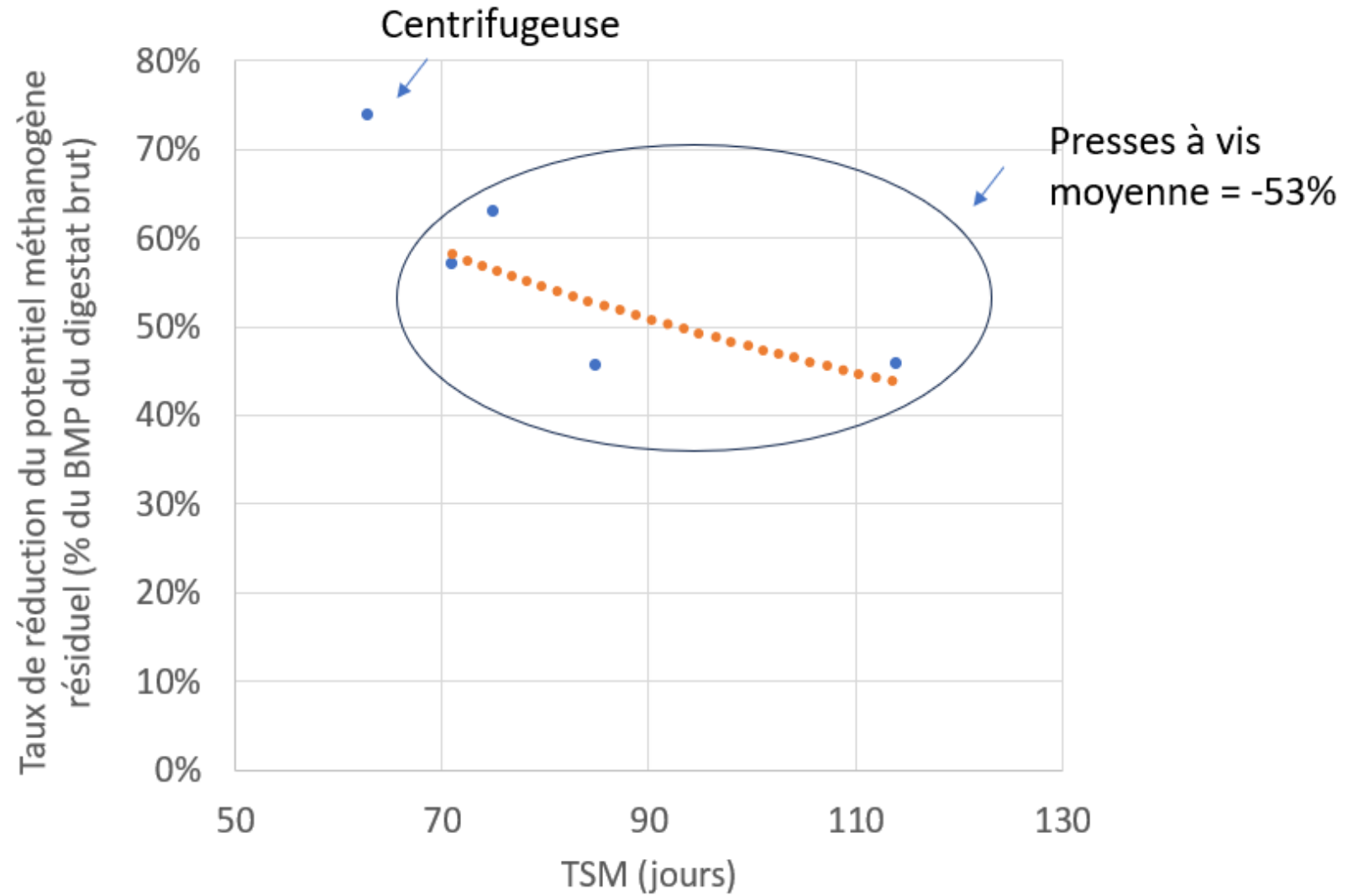
Séparation de phase

Evolution du BMP résiduel sur les sites avec séparation de phase (Nm³/Tmb) en fonction du temps de séjour du digestat en phase mésophile



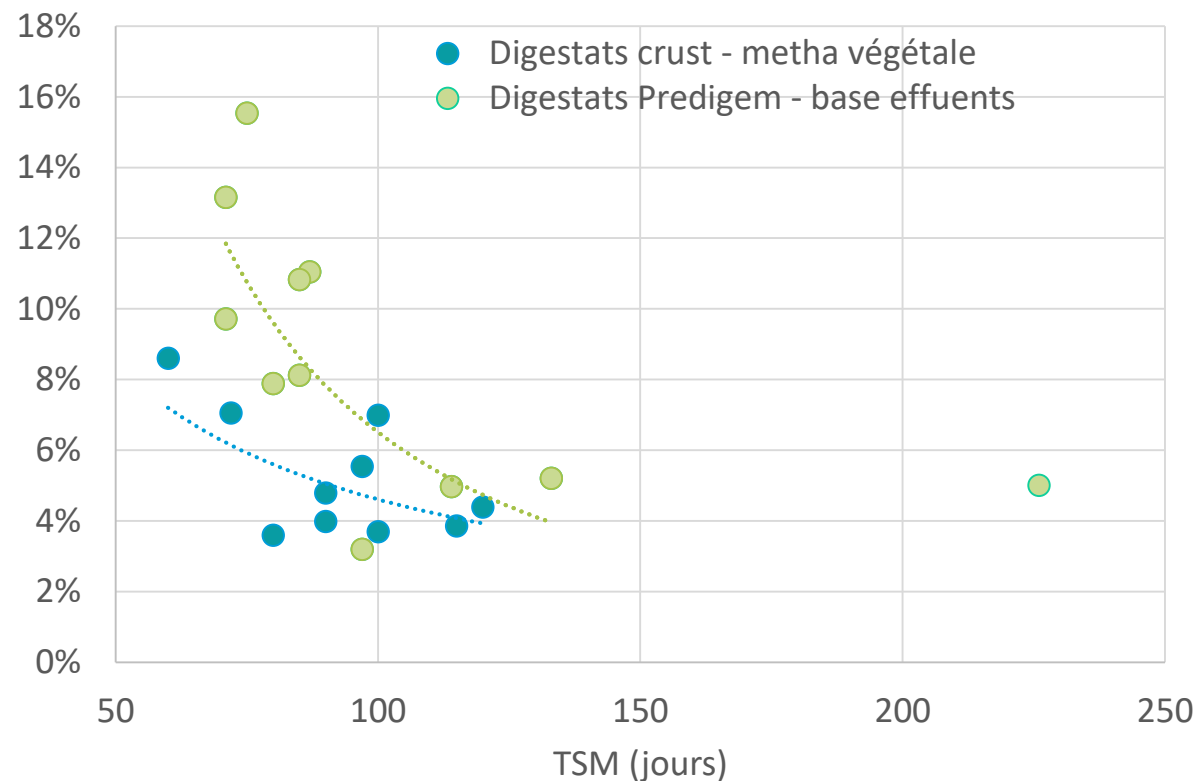
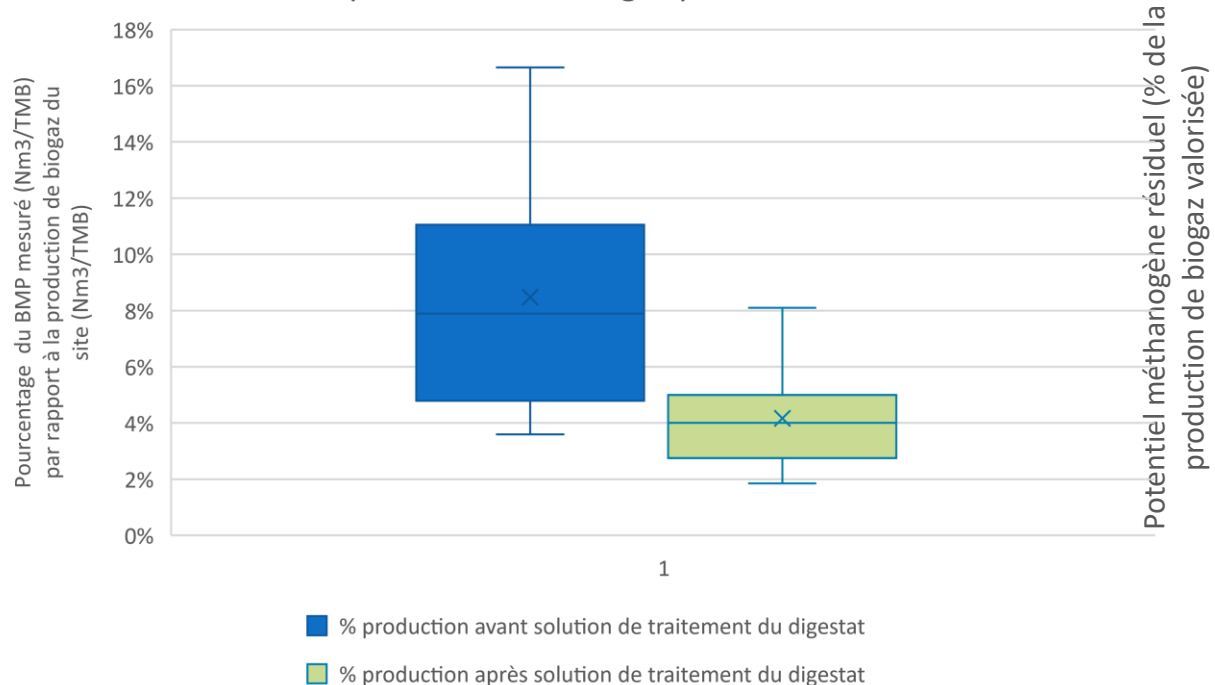
Séparation de phase

- Réduction du BMP :
 - Centrifugation : > 70 %
 - PàV : \approx 50 %



BMP en fonction du biométhane valorisé sur le site

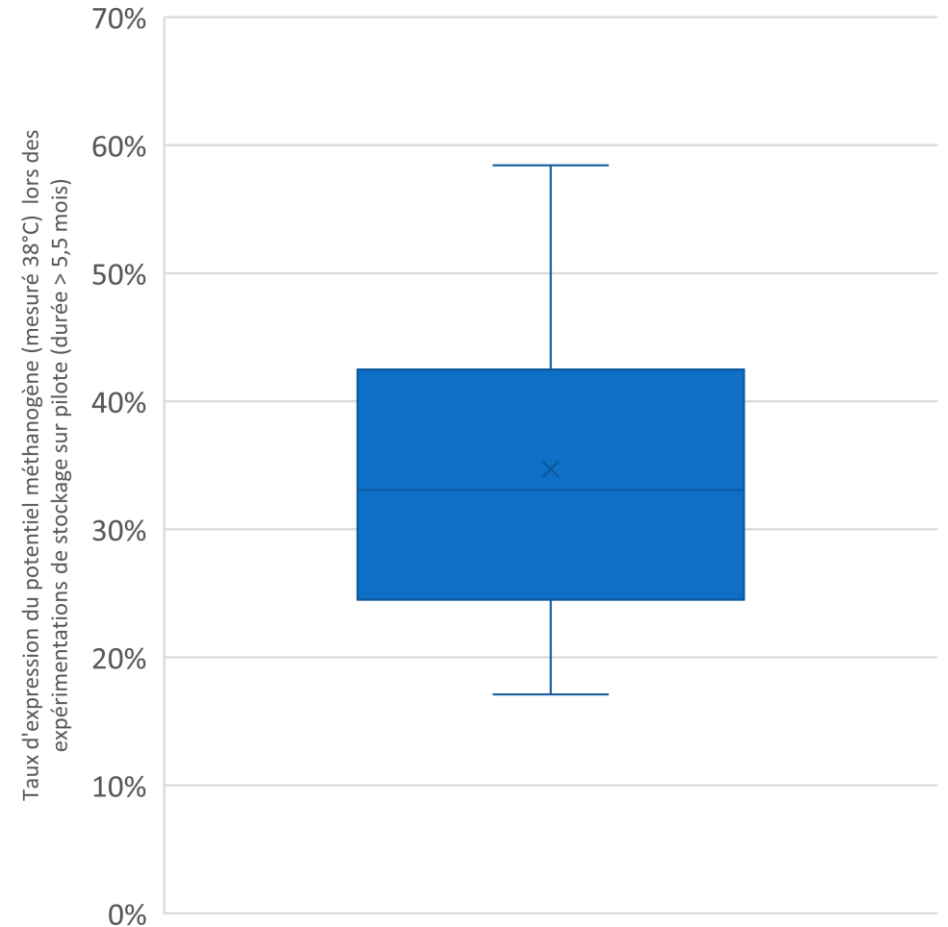
Représentation du pourcentage du BMP mesuré par rapport à la production de biogaz par unité



- Solutions de traitement permettent la diminution de la part d'émissions de méthane au stockage
 - 50 % des données entre 5 et 11 % avant solution
 - 50 % des données entre 2,7 et 5 % après solution
- Pourcentages inférieurs pour méthanisation végétale car production de biométhane plus importante par tonne de matière brute

Taux d'expression du BMP

- Taux d'expression mesurés en comparant BMP résiduel et suivi des émissions dans pilote de stockage (batch)
 - Taux d'expression moyen autour de 35 %
 - 50 % des valeurs entre 25 et 42 %
 - Diminution de la dégradation de la matière en lien avec la température
- Sur pilotes de mesures :
 - Abattement des émissions de CH₄ (sur 2 sites) :
 - 40 à 70%



Conclusions

- La mise en place d'un système de traitement du digestat va permettre de diminuer le BMP du digestat au stockage
 - Solution de stockage du digestat avec récupération du biogaz
 - Valorisation du biogaz restant dans le digestat
 - Allongement du temps de séjour de la matière
 - Diminution de la température
 - **Durée du stockage n'est pas toujours la même au cours d'une année**
 - Solution de séparation de phase
 - Séparation de la MO
- Le BMP donne un résultat maximisant
 - Il ne s'exprime pas en totalité en situation réelle
- Suivis in-situ de deux installations en cours
 - Suivi des effets de saisonnalité

- Merci de votre attention

- Contact :
nicolas.auvinet@inrae.fr

 OPAALe



Méthanisation et retour au sol – Prédire la minéralisation du carbone et de l'azote des digestats par des méthodes spectrales

J. Do Souto Soeiro¹, E. Latrille¹, R. Servien¹, B. Zennaro², J.-P. Steyer¹, J.-C. Thoisy³, S. Houot³, J. Jimenez¹

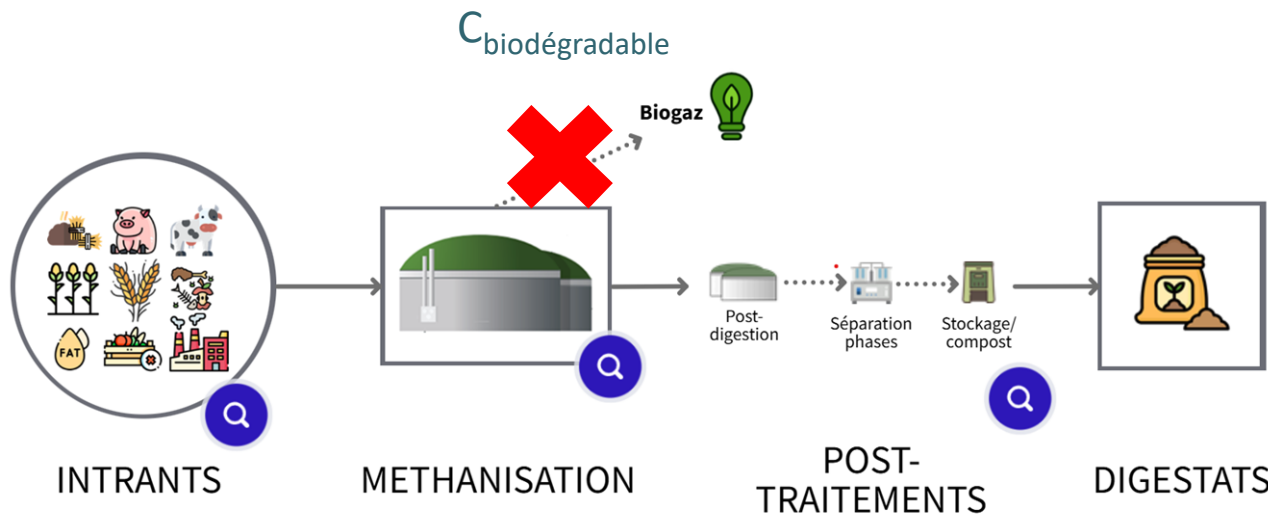


¹ INRAE, LBE, Narbonne, France.

² INRAE Transfert METYS, Narbonne, France.

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

Contexte: Méthanisation et devenir du C et N



INTRANTS

METHANISATION

POST-TRAITEMENTS

DIGESTATS

C

$C_{\text{labile/stable}}?$
Potentiel amendant

$N_{\text{min}}, N_{\text{org}}$

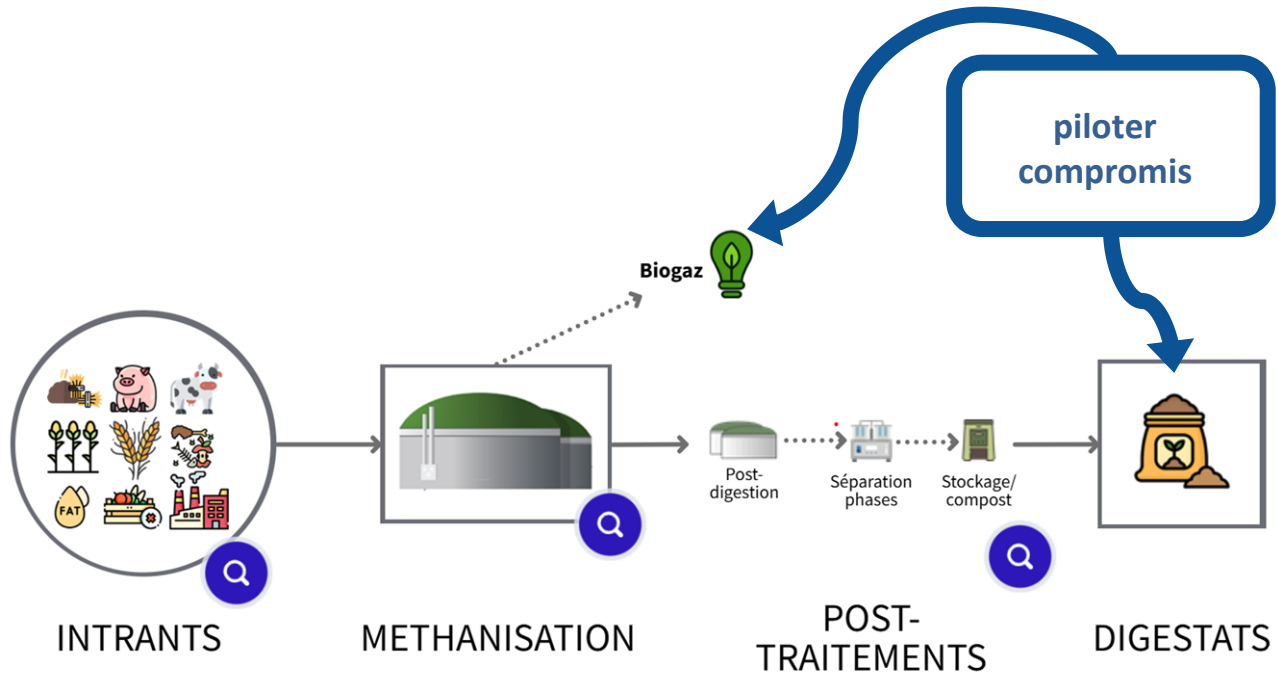
$N_{\text{min}}, N_{\text{org}} \text{ minéralisable?}$
Potentiel fertilisant

Méthanisation des résidus organiques: double enjeu de transitions énergétique et agroécologique

- Production énergie
- Recyclage agronomique des digestats

Sources de **variabilité** et **usage du C et N** : synergies et antagonismes

Contexte: Méthanisation et devenir du C et N



Projet FertiDig, 2024

Méthanisation des résidus organiques: double enjeu de transitions énergétique et agroécologique

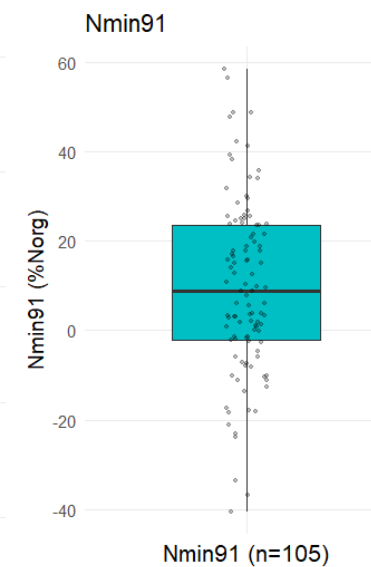
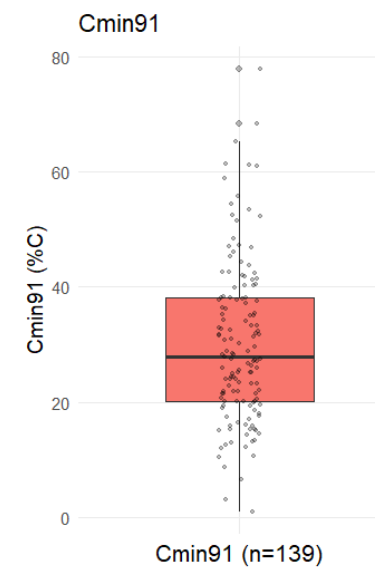
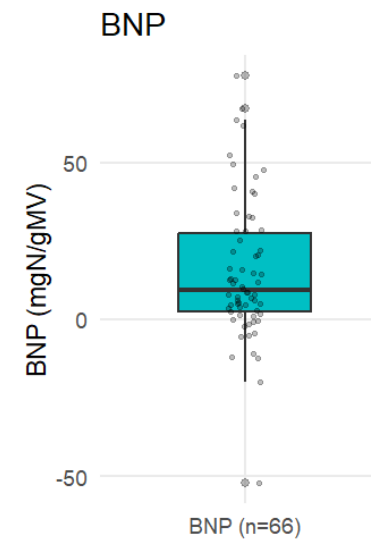
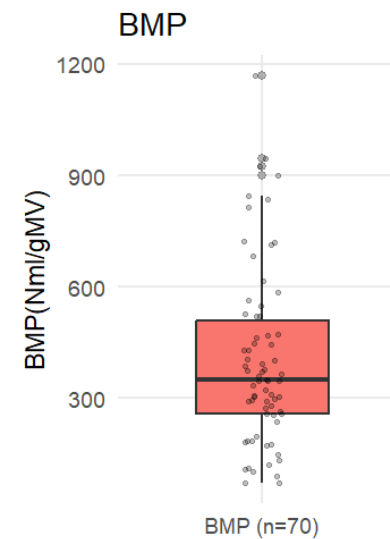
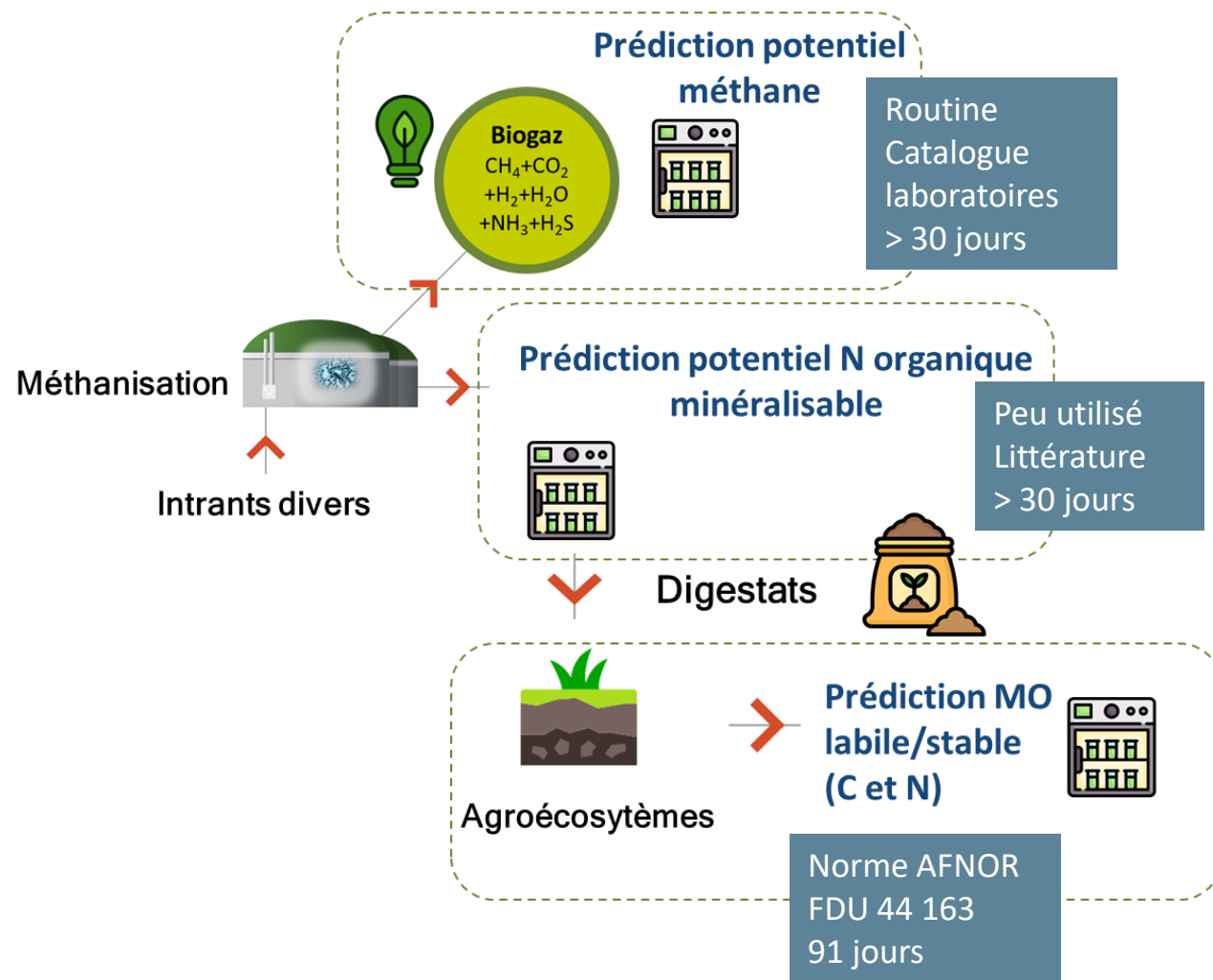
- Production énergie
- Recyclage agronomique des digestats

Sources de **variabilité** et **usage du C et N** : synergies et antagonismes

Optimisation : gestion des compromis

Indicateurs du degré de minéralisation C et N dans le procédé et dans le sol ?

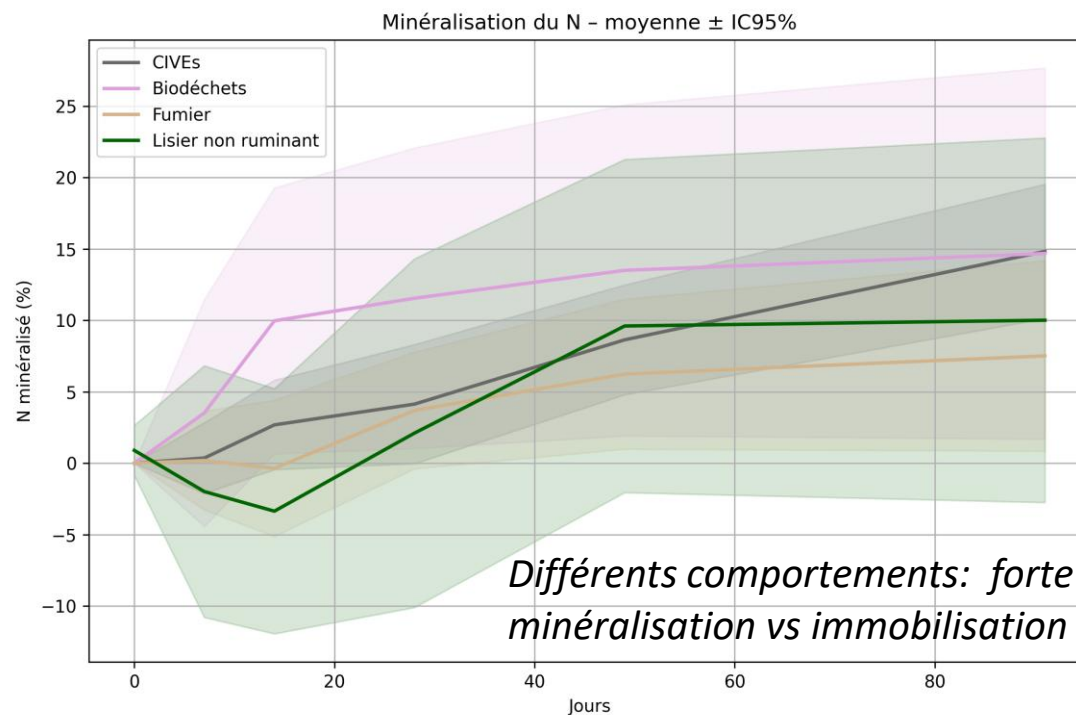
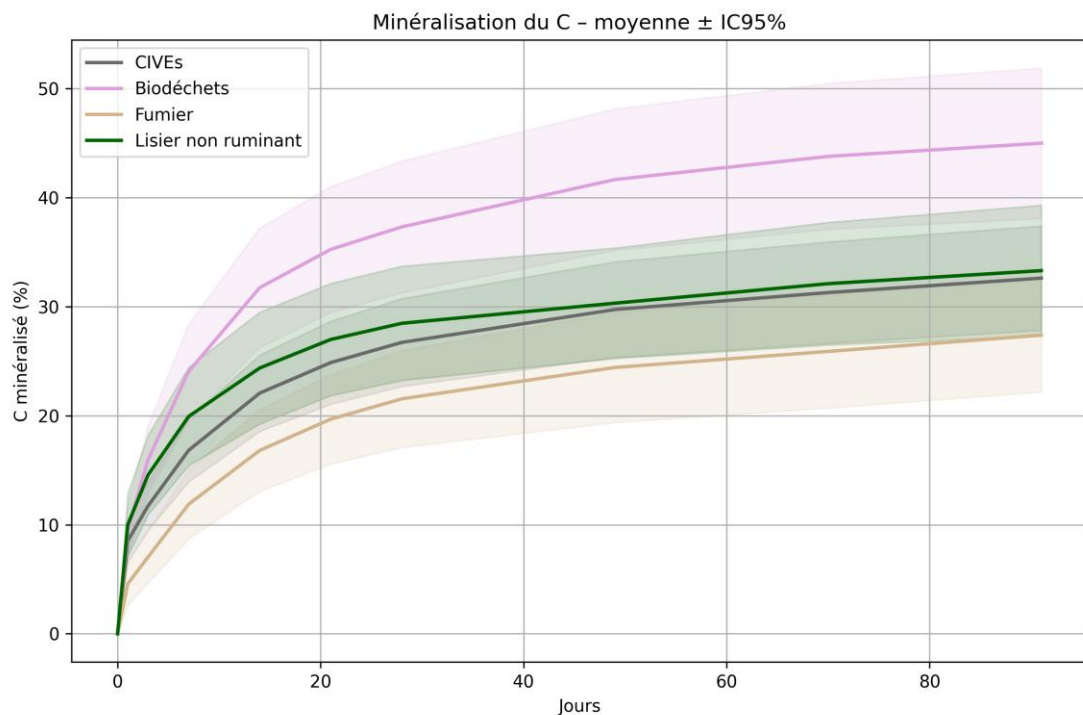
Indicateurs et variabilité



Impact typologie des digestats sur leur minéralisation au sol (empreinte « intrants », conditions procédé, post-traitements)

Indicateurs et variabilité

Variabilité des cinétiques de minéralisation des digestats par intrant



Besoin de mieux décrire la qualité de la MO pour prédire et comprendre

Piloter et optimiser la méthanisation avec des outils de caractérisation fine



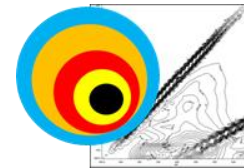
Indicateurs : méthodes longues et coûteuses, mesurant la minéralisation mais peu explicatives des propriétés de la MO



Méthodes de caractérisation rapide et fine de la MO (C et N):
Outils de prédiction des indicateurs de la filière
Outils de caractérisation communs aux intrants / digestats

FlashBMP (Lesteur et al., 2011)

Prédiction *ISMO* (Peltre et al., 2011),
6% digestats



BMP et *Cmin* sur produits organiques
avec quelques digestats (Jimenez et
al., 2017)

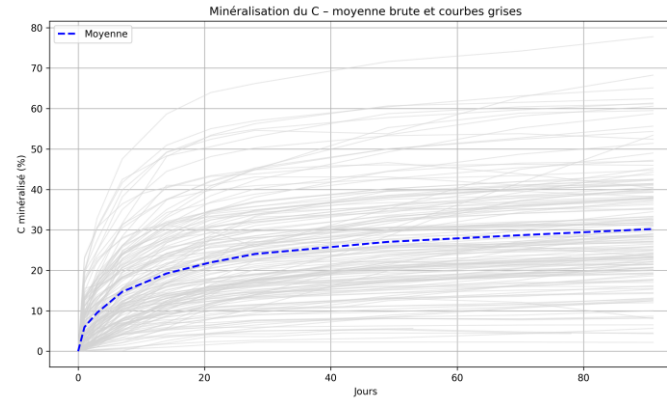
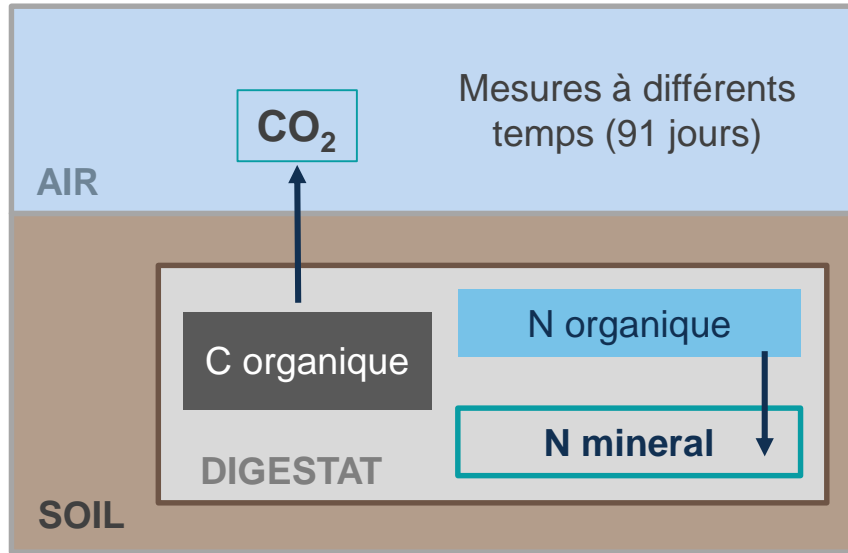
BMP: Berube et al. (2018)

Quel est le potentiel du NIRS et de l'ISBAMO pour prédire la minéralisation du C et de N des digestats ?

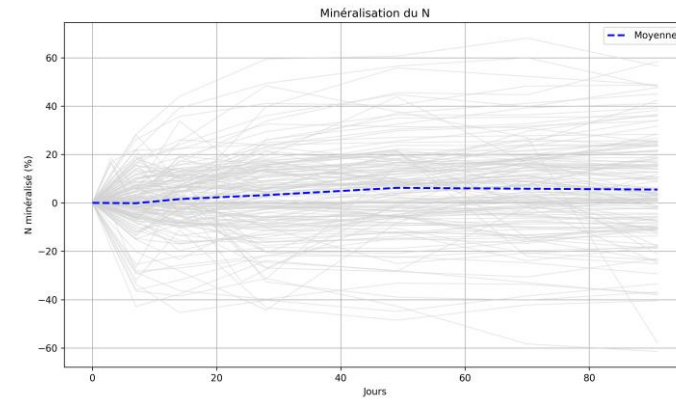
Les modèles de prédiction peuvent-ils aider à mieux comprendre les déterminants gouvernant cette minéralisation ?

Matériel et méthodes

- Minéralisation C et N : incubation sur sol (Norme FDU 44-163)



6,90% C



13,32% Norg

Standard Error of Laboratory, inter-laboratoire

Carbone 28°C



Azote



Apports de 2 gC/kg sol dans tous les cas
6 à 30 g N /kg de sol
Dose: 60 à 100 t MB/ha



$$SEL = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{var_{k-1}}{n}}$$

Matériel et méthodes



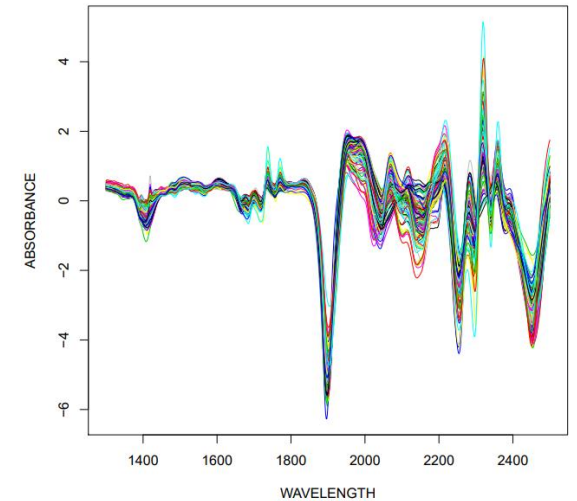
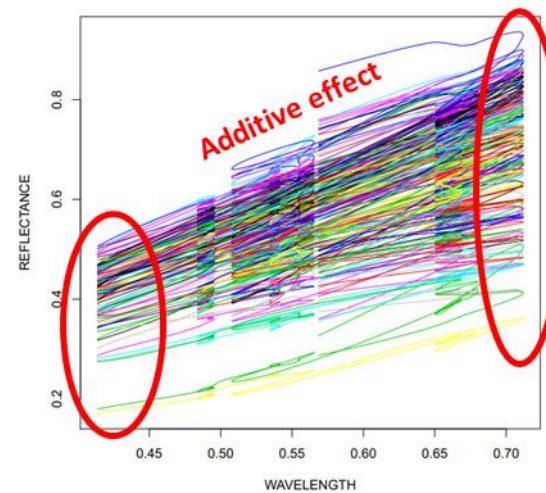
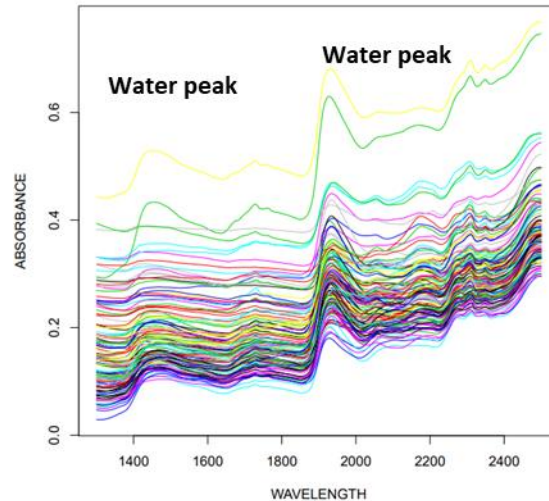
- Caractérisation des digestats: proche infra-rouge (NIRS)



Lyophilisé-broyé 1 mm



NIRS used for the analysis (Nirflex BÜCHI)
Reflectance mode (4000 – 10000 cm⁻¹)



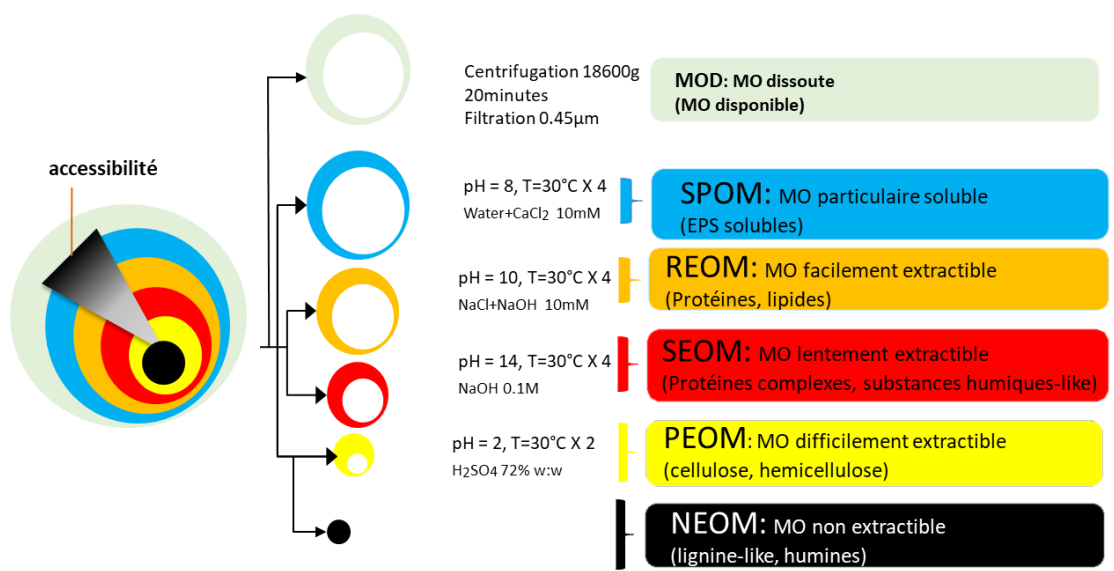
Prétraitements (Zennaro et al., 2023):

- SAVITSKY-GOLAY (derivative 1 polynomial 2, window of 13)
- SNV

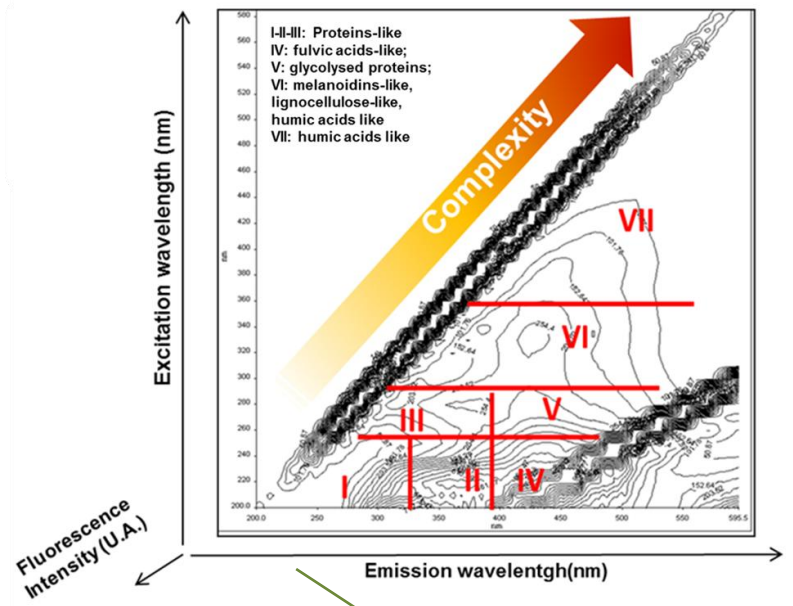
Mesure des vibrations de liaisons chimiques (harmoniques et combinaisons)

Matériel et méthodes

- Caractérisation des digestats: ISBAMO®

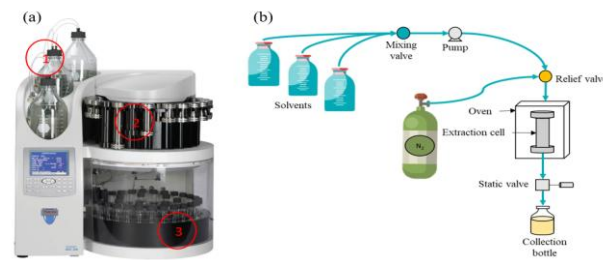


Accessibilité



Fractions accessibilité
DCO et N

Mesure DCO et N



Thermo Scientific™ Dionex™ ASE™ 350



Perkin Elmer LS55

Pourcentage de fluorescence par zone pour chaque fraction extractible

Jimenez et al. 2015; 2017

- Modèles

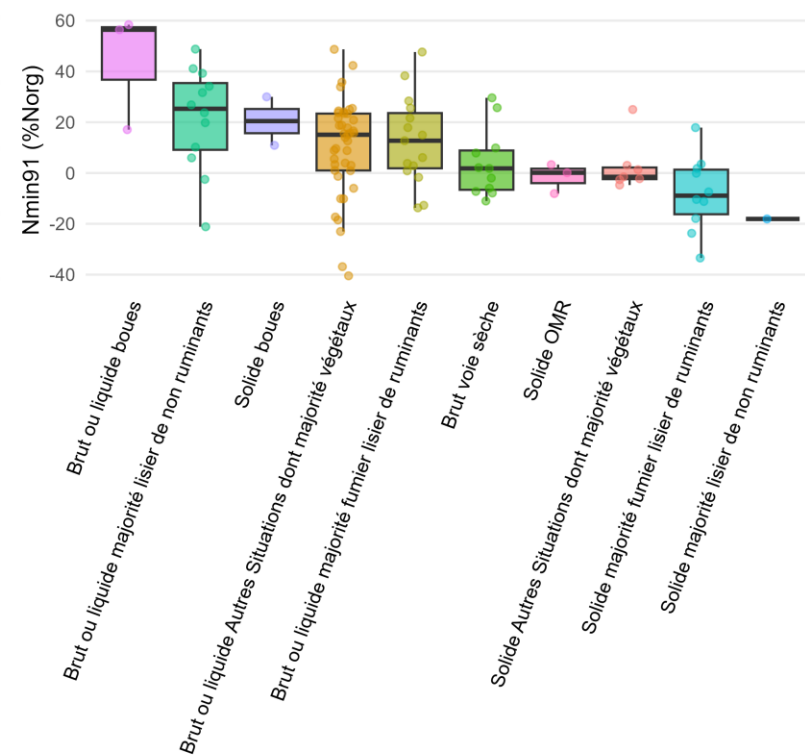
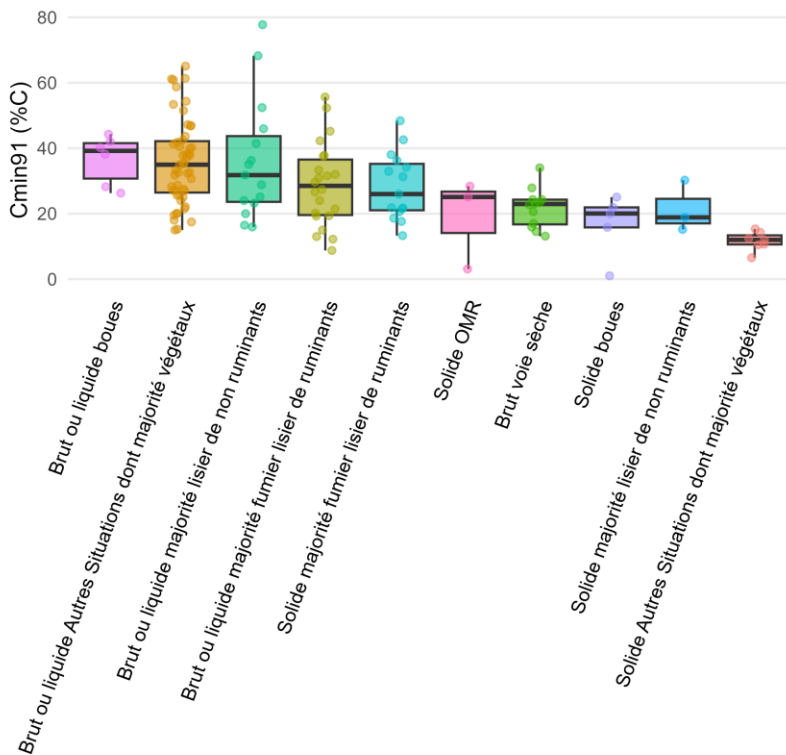
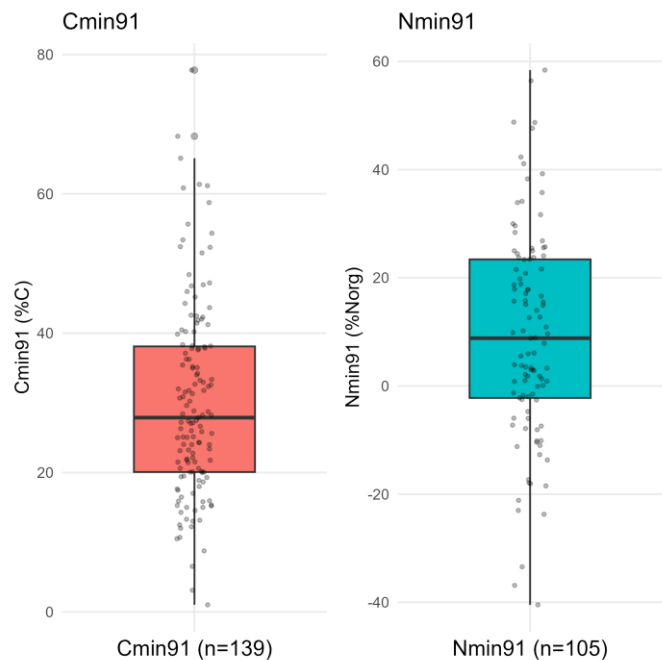
- **Comparaison modèles** linéaires (Partial Least Square Regression, PLS) et non linéaires (Random Forest, RF)
- Stratégie « Bootstrap »: 200 modèles avec 80% données calibration/20% validation
- Indicateurs de qualité du modèle sur les données de validation

$$MAEP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i| \quad RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad \leftrightarrow \quad SEL = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{var_{k-1}}{n}}$$

- **Beta coefficients (PLS) ou VIP (RF):** poids des variables explicatives sur Y

Minéralisation du C et de N des digestats

- Digestats balayant une large typologie*



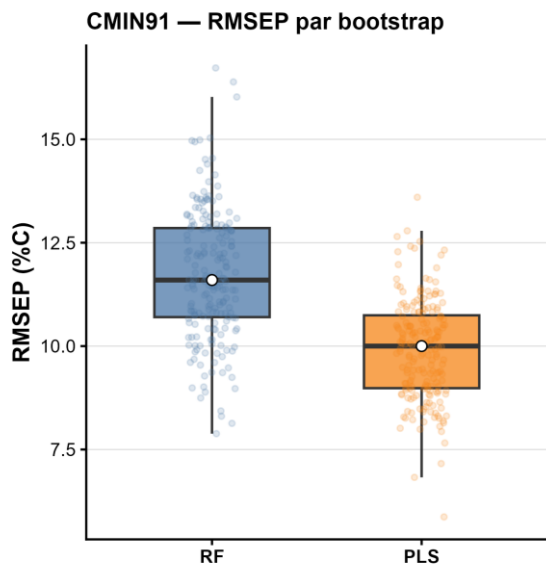
*Typologie FertiDig (2024)



Prédire C et N minéralisable au sol des digestats: performances



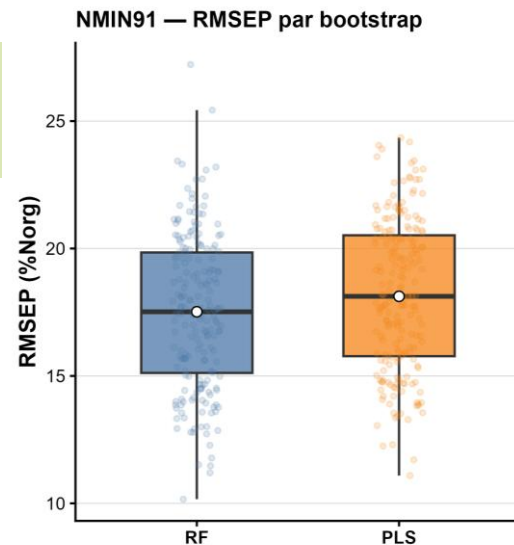
NIRS



PLS significativement meilleur que RF

$$SEL = 6,90\%$$

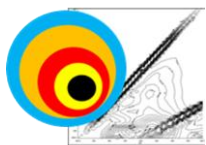
$$\frac{RMSEP}{SEL} = 1,4$$



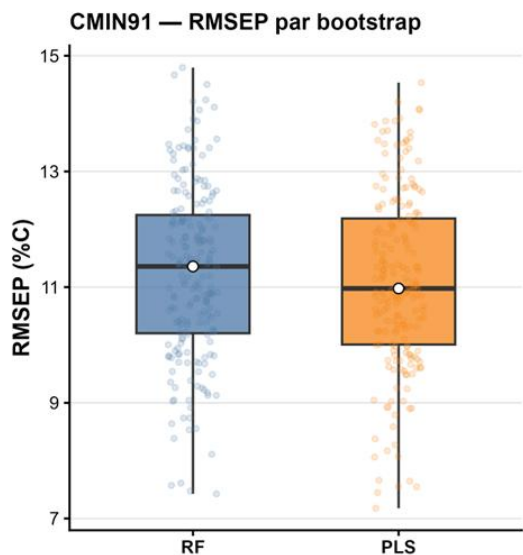
Performances RF ≈ PLS

$$SEL = 13,32\%$$

$$\frac{RMSEP}{SEL} = 1,3$$



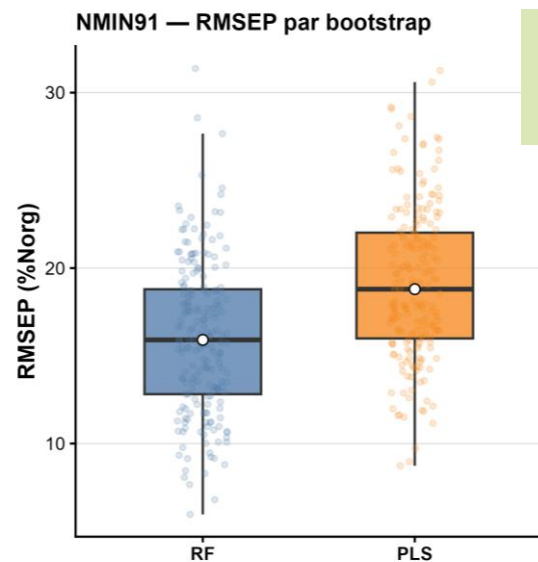
ISBAMO



PLS ≈ RF
PLS légèrement meilleur

$$SEL = 6,90\%$$

$$\frac{RMSEP}{SEL} = 1,5$$



RF significativement meilleur que PLS

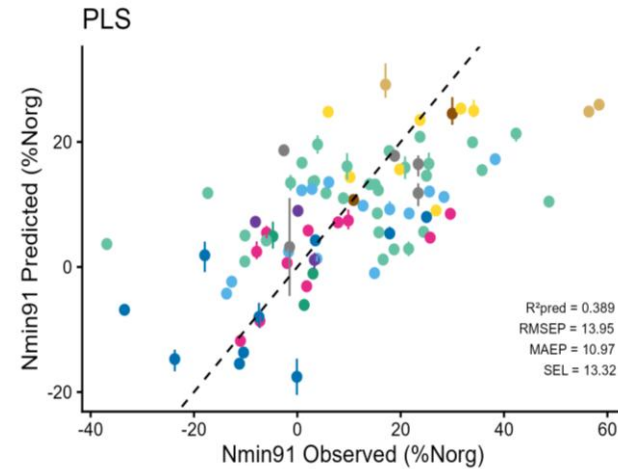
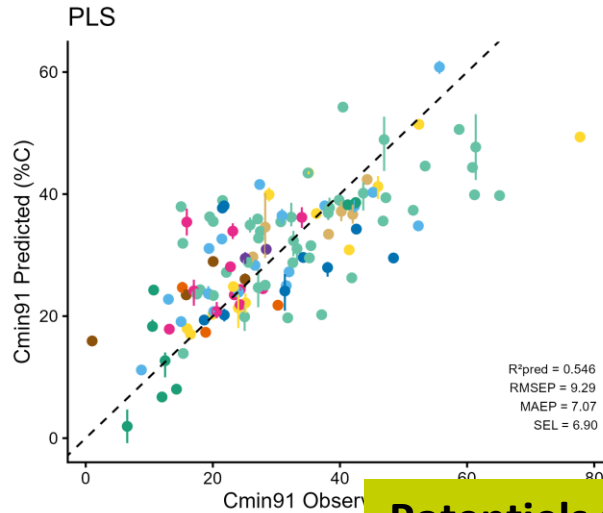
$$SEL = 13,32\%$$

$$\frac{RMSEP}{SEL} = 1,2$$

Prédire C et N minéralisable au sol des digestats: performances

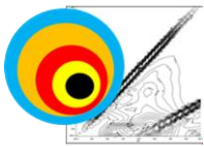


NIRS

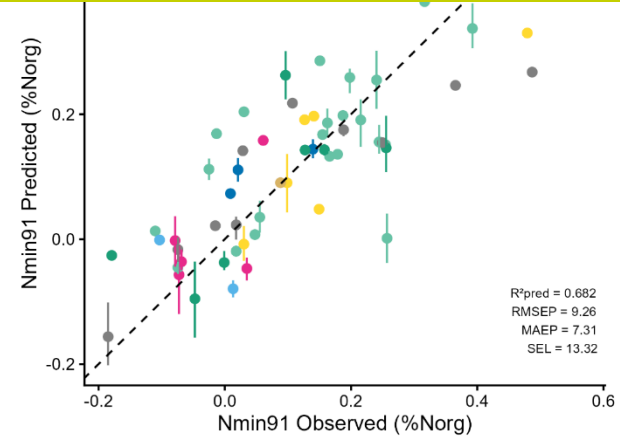
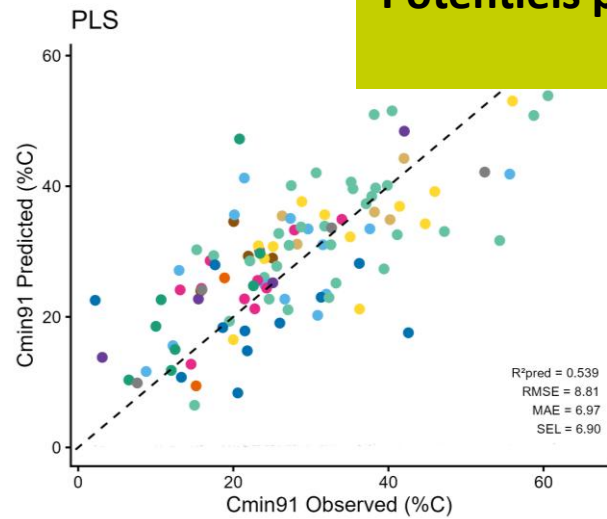


30% des digestats
mauvaise prédiction

Potentiels prédictifs NIRS et ISBAMO sur Cmin 91 et ISBAMO sur Nmin91 prometteurs



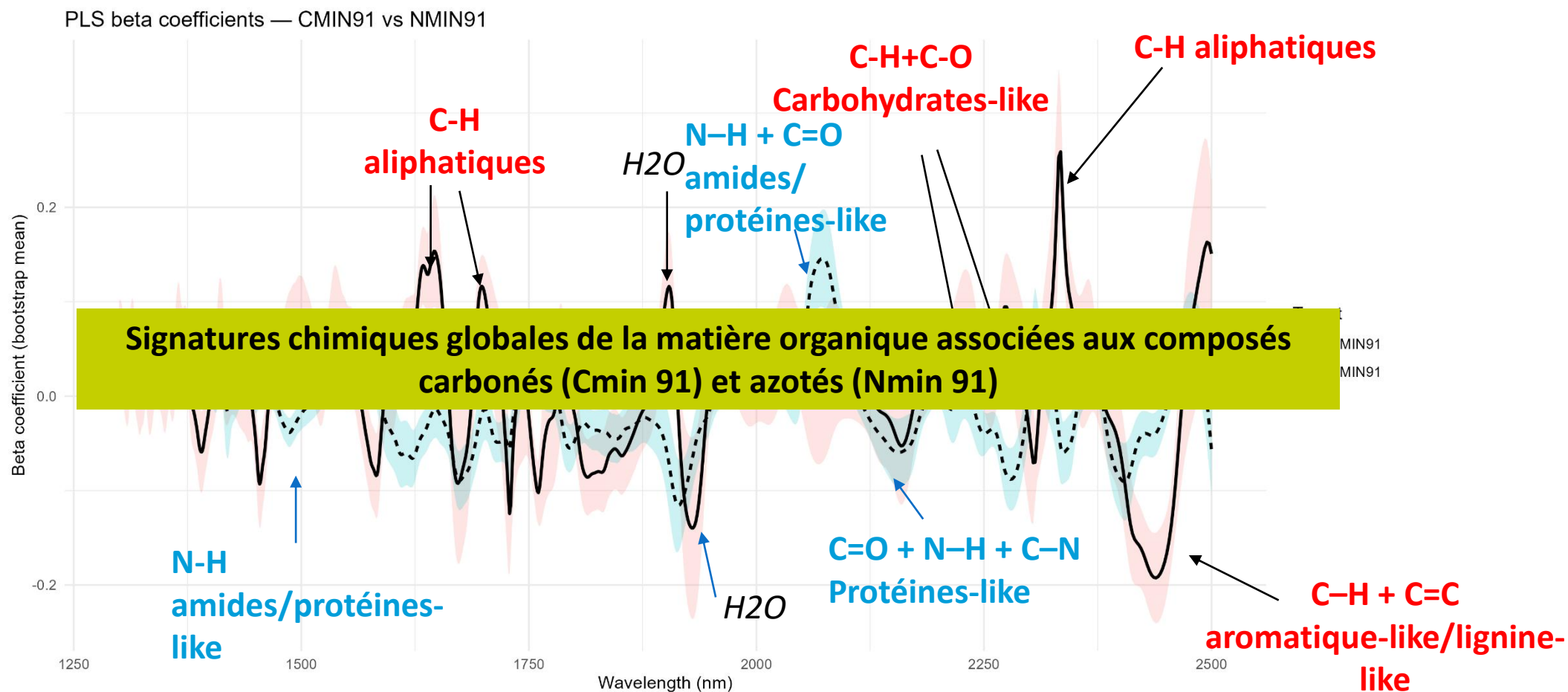
ISBAMO



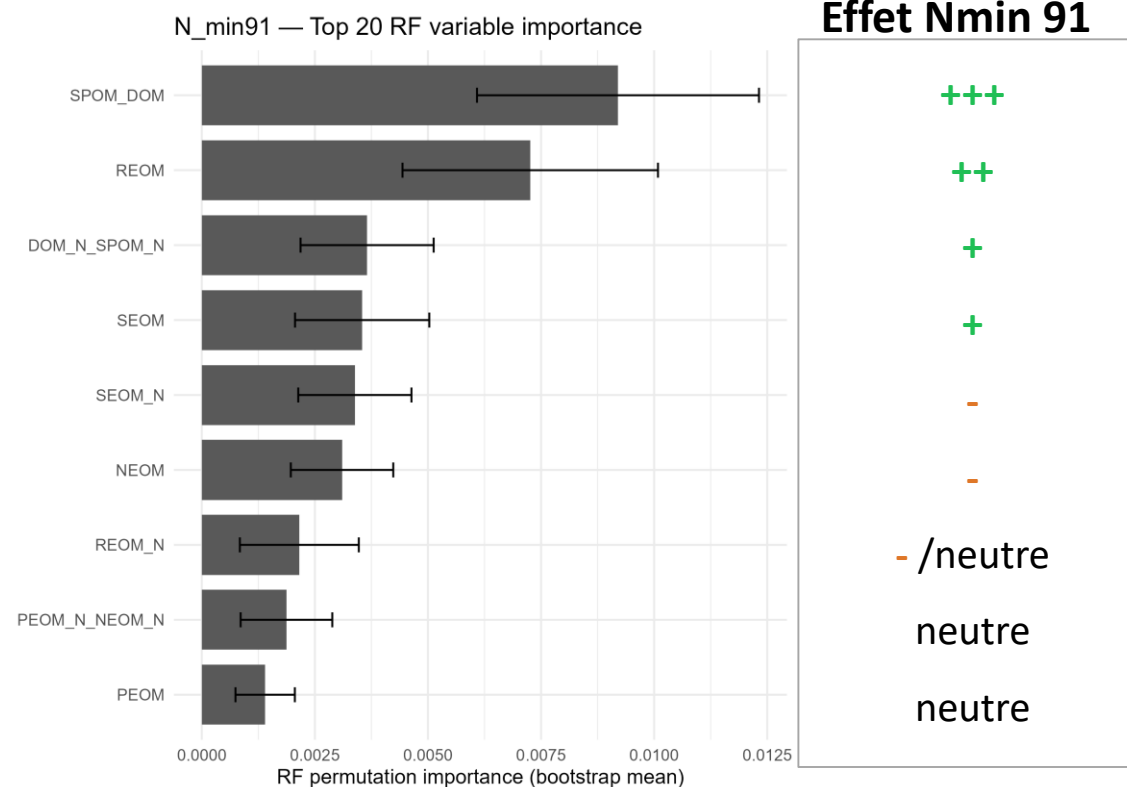
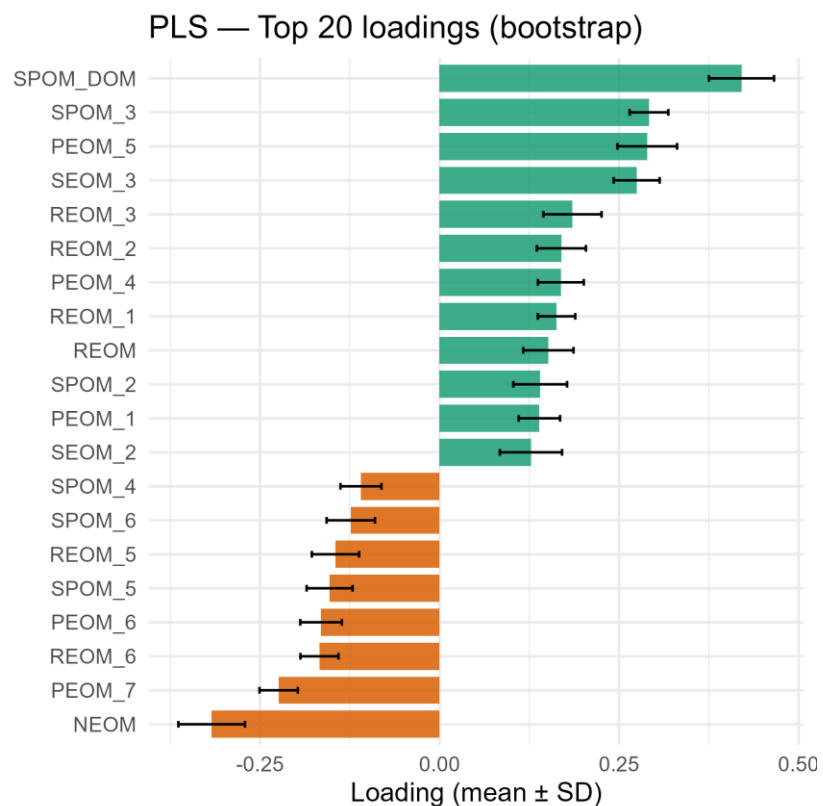
- Brut ou liquide Autres Situations dont majorité végétaux
- Brut ou liquide boues
- Brut ou liquide majorité fumier lisier de ruminants
- Brut ou liquide majorité lisier de non ruminants
- Brut voie sèche
- Solide Autres Situations dont majorité végétaux
- Solide boues
- Solide majorité fumier lisier de ruminants
- Solide majorité lisier de non ruminants
- Solide OMR

Que révèlent les modèles sur la minéralisation des digestats ?

Tentative d'identification des signatures chimiques impactant la prédiction de Cmin 91 et Nmin 91



Que révèlent les modèles sur la minéralisation des digestats ?



Accessibilité et Complexité expliquent Cmin 91

- + Fractions labiles & fluorescence 1, 2, 3 (*protéines « simples »*)
- Fractions moins accessibles et molécules plus complexes 5, 6, 7 (*protéines complexes, substances humiques-like*)

Jimenez et al., 2017

Accessibilité MO et N explique Nmin91

- + Fractions très labiles et accessibles C et N
 - MO et protéines peu accessibles -> effet négatif
- Fluorescence n'améliore pas le modèle*

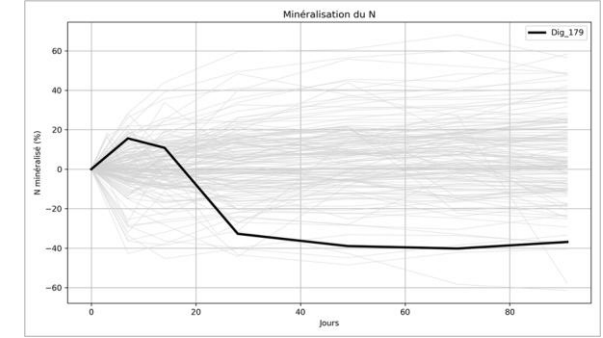
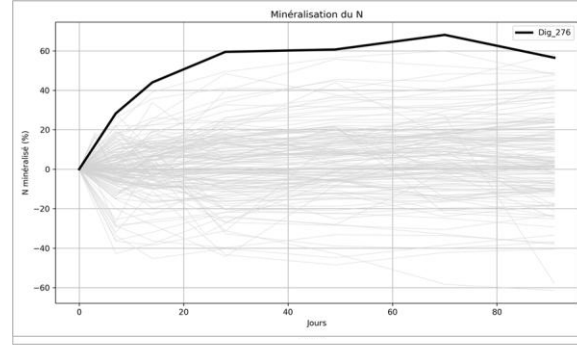
Que révèlent les modèles sur la minéralisation des digestats ?

Digestat issu de biodéchets
 MO accessible et simple élevée
 (structures aliphatiques, protéines simples)

C minéralisable élevé

Activité microbienne

Besoin N élevé



Minéralisation N élevée

Immobilisation N

composés N accessibles élevés

oui

non



Conclusions et perspectives

- Les digestats présentent **une forte variabilité de minéralisation C et Norg au sol** liée à la qualité de leur matière organique
- **NIRS et ISBAMO permettent de prédire les indicateurs de minéralisation** avec des performances acceptables et améliorables
- Ces outils captent **des dimensions complémentaires : signatures chimiques C et N et accessibilité x complexité des molécules.**
- Ils ouvrent la voie à **une caractérisation rapide des digestats pour piloter leur valorisation agronomique...**
- et à l'amélioration de la compréhension des liens entre biodégradabilité des intrants et minéralisation au sol des digestats (en cours)
- Étude sur les cinétiques de minéralisation des digestats pour l'utilisation des modèles mécanistiques -> impact du devenir C et N par typologie court/long terme (en cours)

Une stratégie combinée acidification–séchage pour améliorer la valorisation agronomique des digestats: devenir de la matière et des contaminants

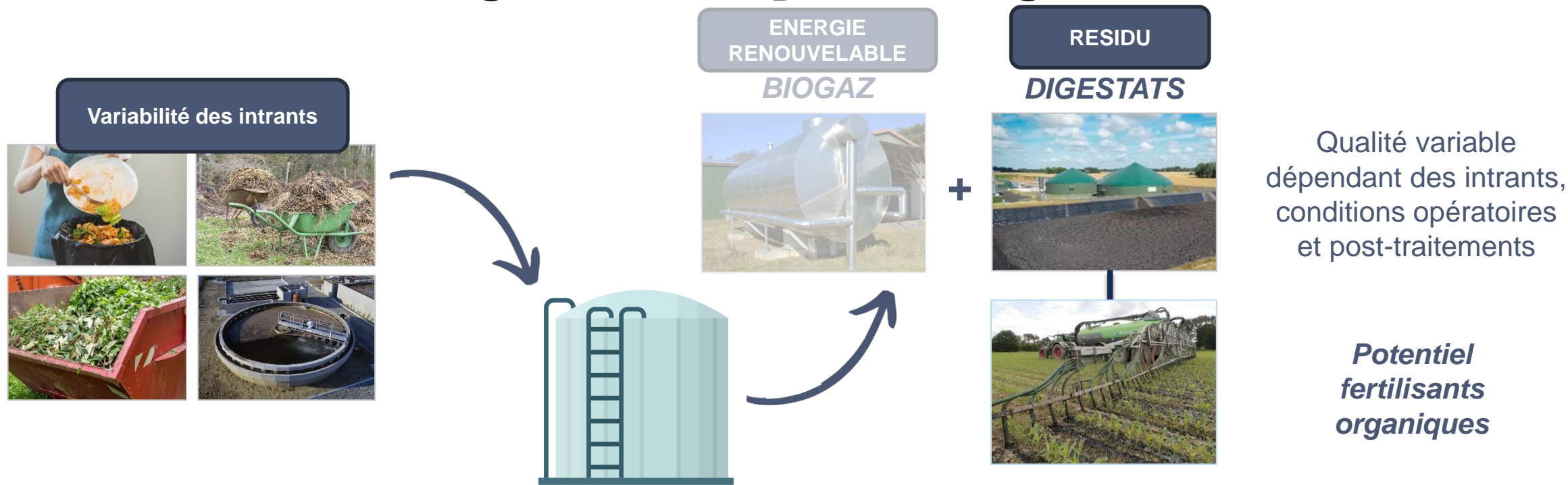


K. Galopin¹, D. Patureau¹, F. Guilayn², G. Zuccaro², J. Jimenez¹

¹ INRAE, LBE, Narbonne, France.

² SUEZ, BioResourceLab, Narbonne, France

Utilisation des digestats d'origine non agricole



Qualité variable dépendant des intrants, conditions opératoires et post-traitements

Potentiel fertilisants organiques




Utilisation et commercialisation limitée
 → Post-traitements

Levier d'action pour l'utilisation des digestats

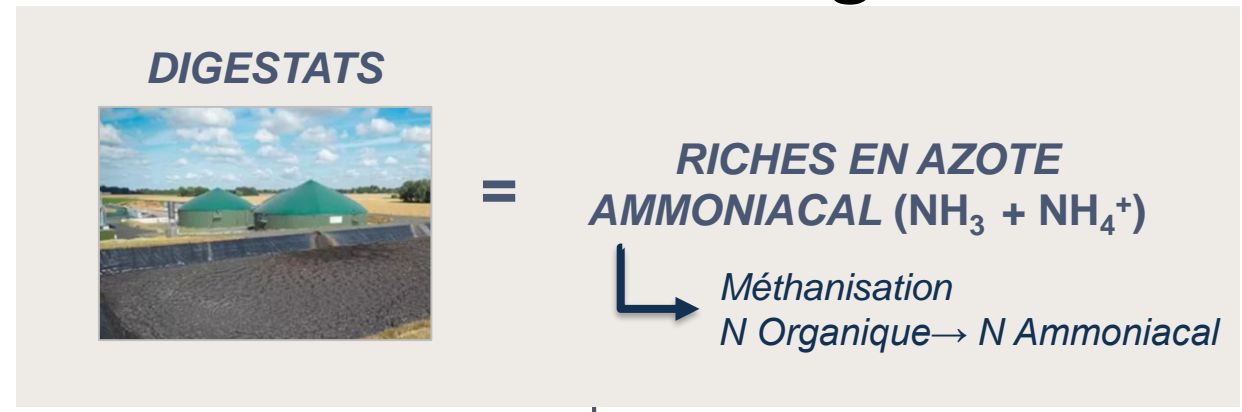

 =
 
 Digestats Non Agricoles



 Digestats agricoles

Produits dans les fermes et appliqués dans les exploitations

Verrous associés à la valorisation des digestats



1

Traitements des digestats non agricoles et conformité réglementaire

2

Volatilisation du NH_3 pendant stockage et épandage (perte valeur fertilisante et pollution)

3

Coûts transport dus à la quantité d'eau contenue dans les digestats

➤ *Comment lever ces verrous?*



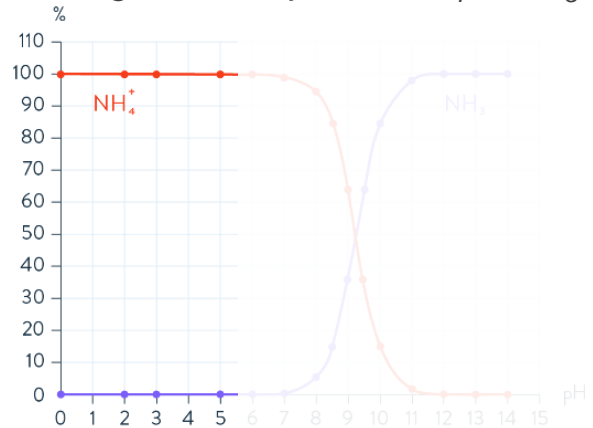
F. Guilayn

Thèse de F. Guilayn (2019): nouvelles voies de valorisation des digestats



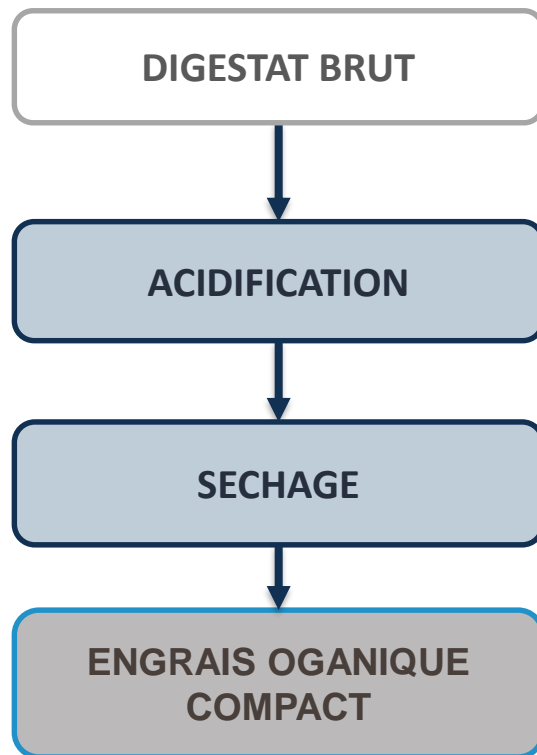
Solution proposée: combiner acidification et séchage

Diagramme équilibre $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3$



Shift : $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+$

Réduire l'eau et donc le volume de digestat



- Limiter la volatilisation de l'azote ammoniacal
- Eliminer les pathogènes (*favoriser conformité réglementaire*)
- Concentrer la matière (*favoriser conformité réglementaire*)
- Réduire les coûts de transport



Thèse F. Guilayn,
BiogazRio, 2022

Preuve de concept sur la conservation de N



Objectifs et questions de recherche

PROCEDE

Valider l'efficacité de l'acidification sur la conservation de l'azote et évaluer la montée en échelle (130 L)

MATIERE

Comprendre le devenir de la matière (organique, N et P) au cours du procédé

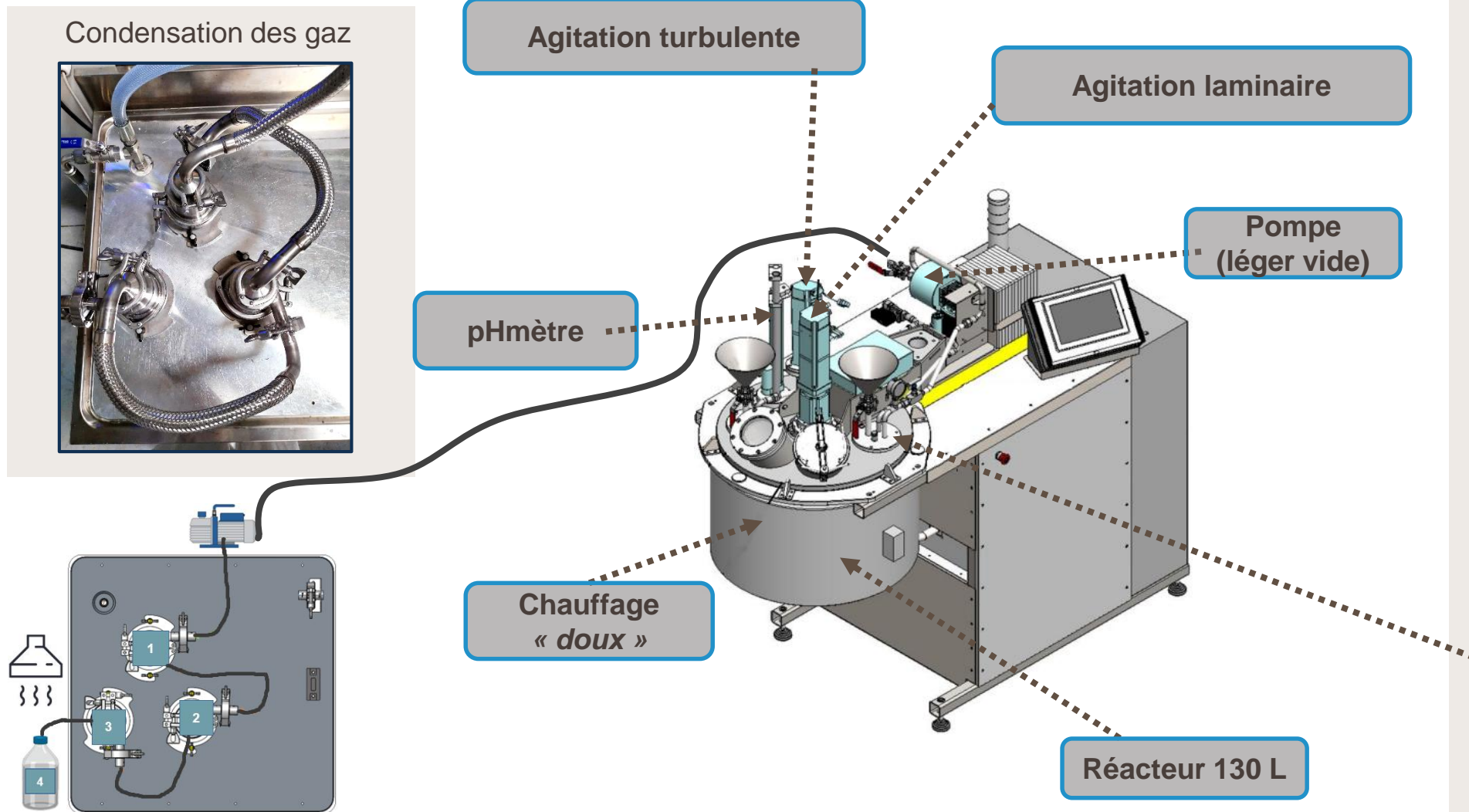
PRODUIT FINAL

Évaluer la qualité agronomique du produit final et comprendre l'impact du procédé sur cette qualité

QUESTIONS DE RECHERCHE





Comment le procédé impacte la qualité des produits finaux vis-à-vis de leur qualité agronomique?
Est-ce que l'effet est similaire lorsque l'on considère des digestats de différentes origines?





Matériel et méthodes: réacteur pilote







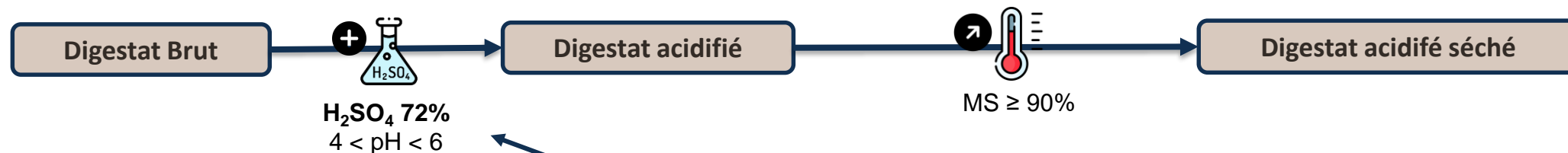
Matériel et méthodes: conditions du procédé

Paramètres du procédé

Digestat brut				
Digestat	Masse	Intrant	MS	pH
	32.7 kg	Biodéchets	5.5%	8.0
	30.1 kg	Territorial (CIVE et biodéchets)	10.7%	8.0
	29.3 kg	Déchets verts	20,9%	7.7
	30.0 kg	Fumier bovin	9.9%	7.7

Acidification		
Digestat	H ₂ SO ₄ (% m/m)	pH
	3.4%	4.6
	2.7%	4.8
	2.7%	5.2
	2.7%	5.3

Séchage				
Digestat	Temps	Masse finale	MS	pH
	11 days	1.4 kg	96.4%	4.6
	7 days	3.3 kg	95.9%	5.0
	7 days	6.1 kg	98.4%	5.4
	8 days	2.5 kg	96.4%	5.4



- pH < 6 : Conservation N
- 4 < pH < 6 augmentation possible de la disponibilité du P, dépendant des cations présents

Matériel et méthodes: caractérisation des produits

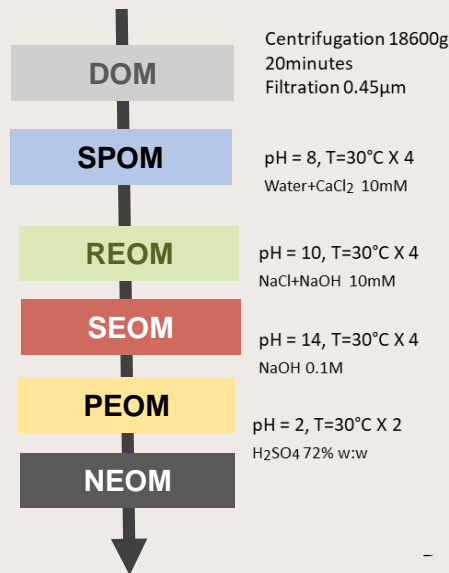
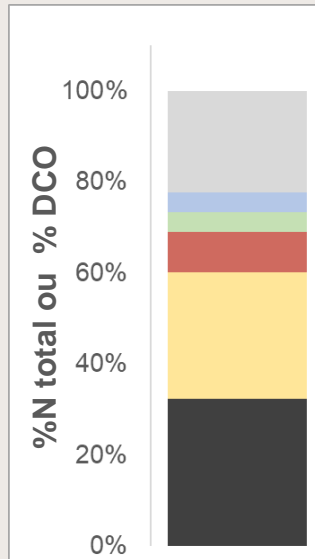
Analyses physico-chimiques globales:

MS, MV, Ntot, TAN, DCO, Ctot, P₂O₅, K₂O

Disponibilité de la matière: extractions séquentielles

Disponibilité et Accessibilité de la MO et de N (fractionnement ISBAMO®)

Analyse DCO



ACCESSIBILITE ↘

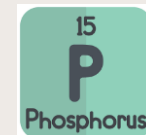
Analyse N



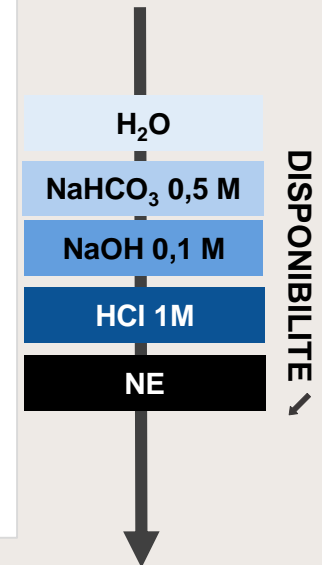
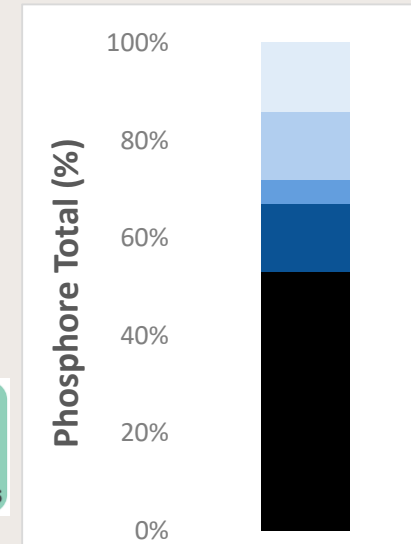
Jimenez et al., 2015

Disponibilité du P

Analyse P total



Grigatti et al., 2015
Jimenez et al., 2020



DISPONIBILITE ↘

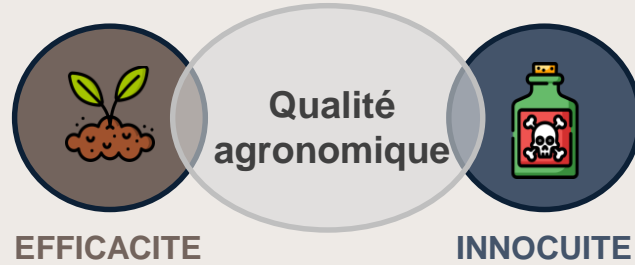
Matériel et méthodes: qualité agronomique



Paramètres qualité agronomique

Comment est minéralisé le C et N des digestats traités au sol?

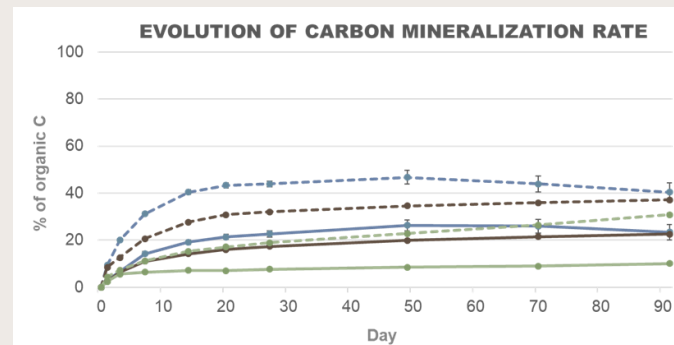
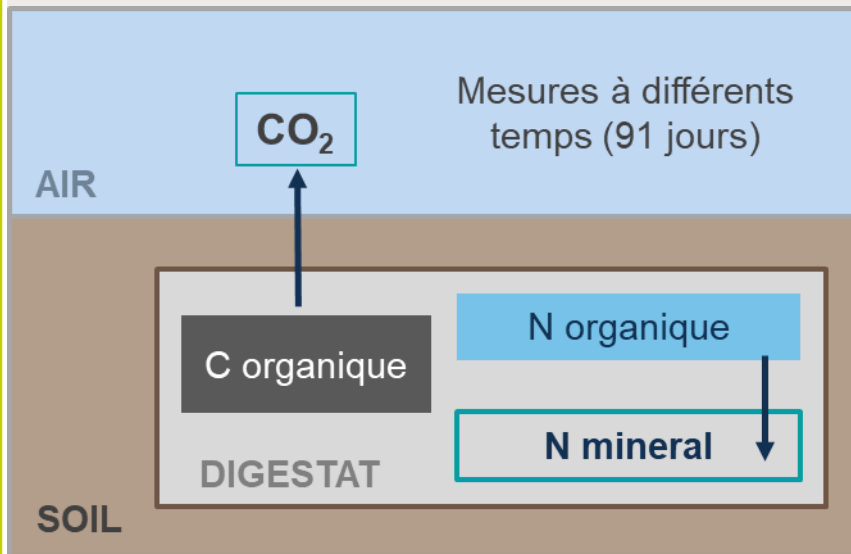
→ Incubations sur sol
Méthode FD U44-163



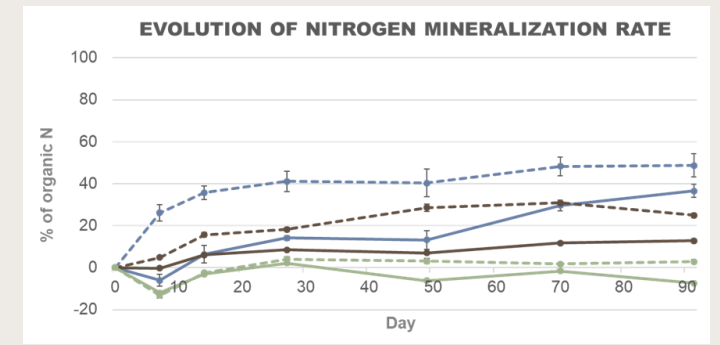
Conformité réglementaire?

Paramètres réglementation (EU 2019/1009):
ETM, Pathogènes (*Salmonella* spp, *E.Coli*,
Enterococcaceae)

Tests de minéralisation au sol



Potentiel amendant



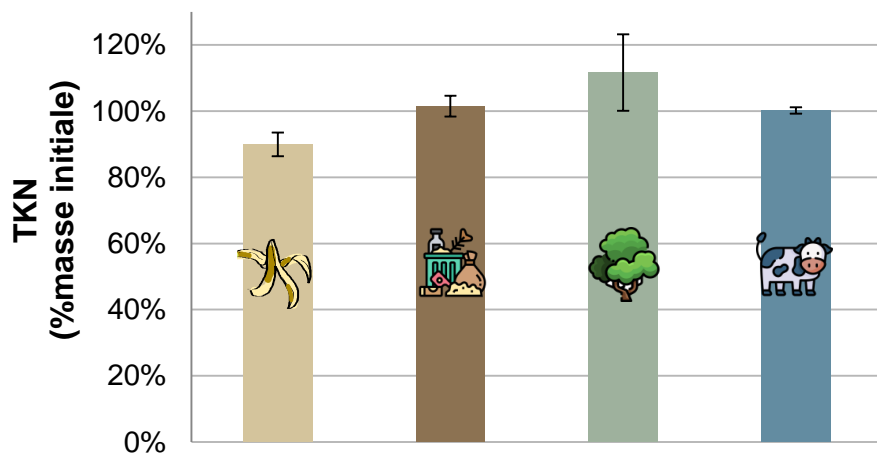
Potentiel fertilisant N

Conservation de l'azote et de l'azote ammoniacal

> Est-ce que l'azote est conservé pendant le procédé?

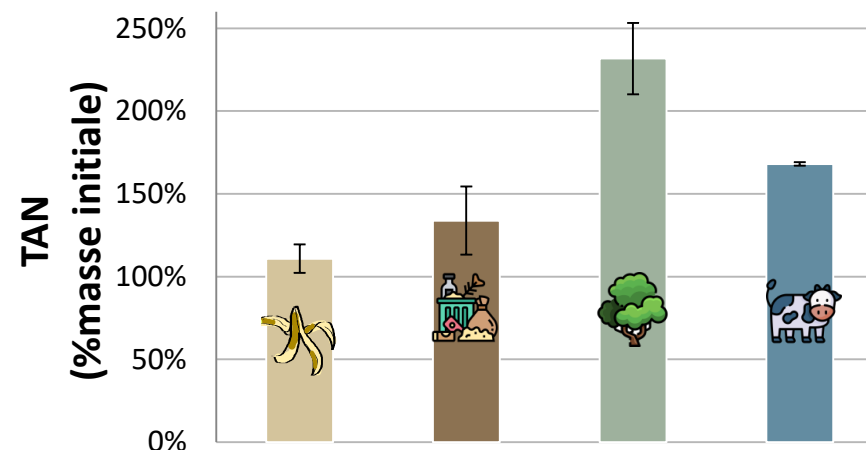
Conservation de N_{tot} pendant le procédé

Comparaison entre digestat brut et produit final



Conservation du TAN pendant le procédé

Comparaison entre digestat brut et produit final



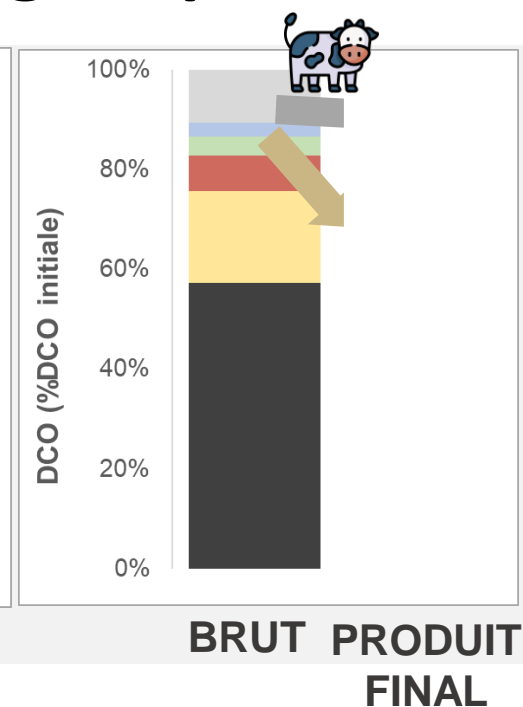
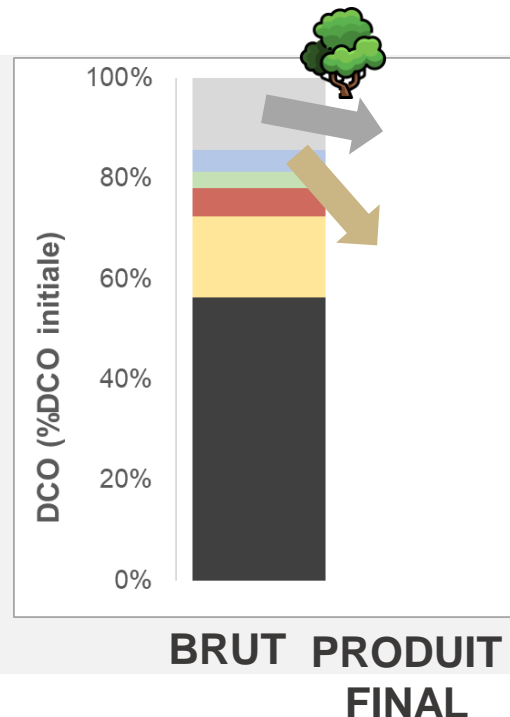
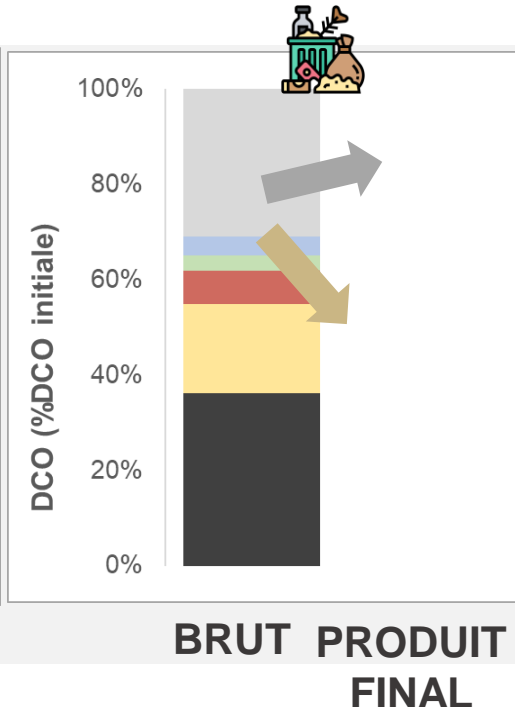
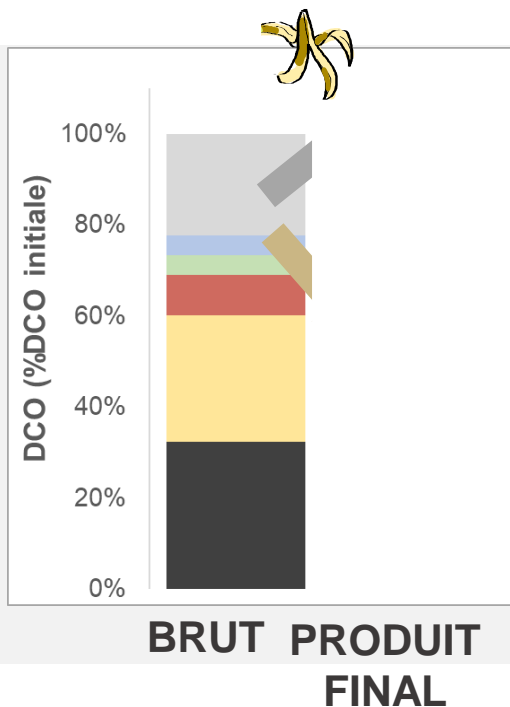
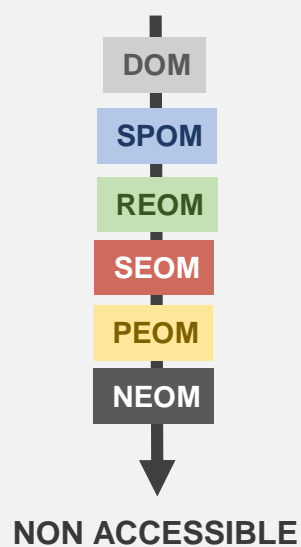
Azote et azote ammoniacal conservés pendant le procédé

=

Acidification efficace

Augmentation du TAN pendant acidification (différents degrés selon digestats) minéralisation N organique (Liu et al., 2025) et N intracellulaire relargué (Liu et al., 2024)

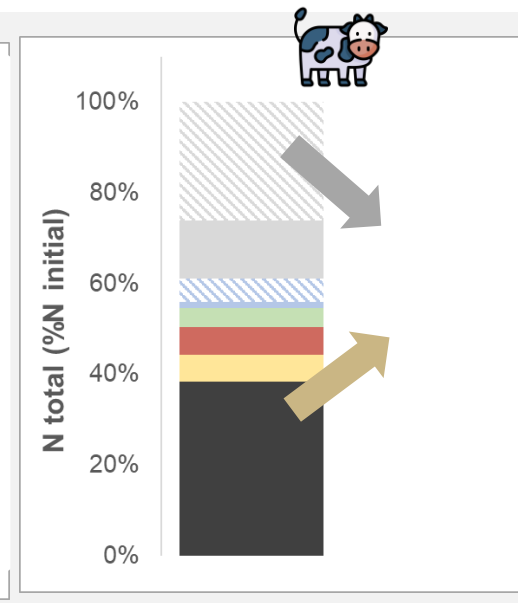
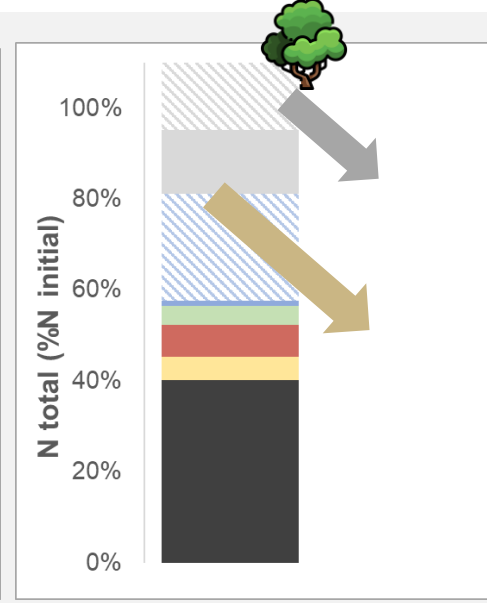
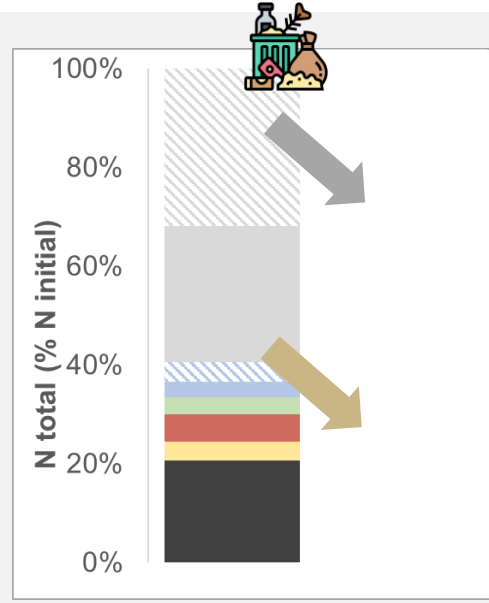
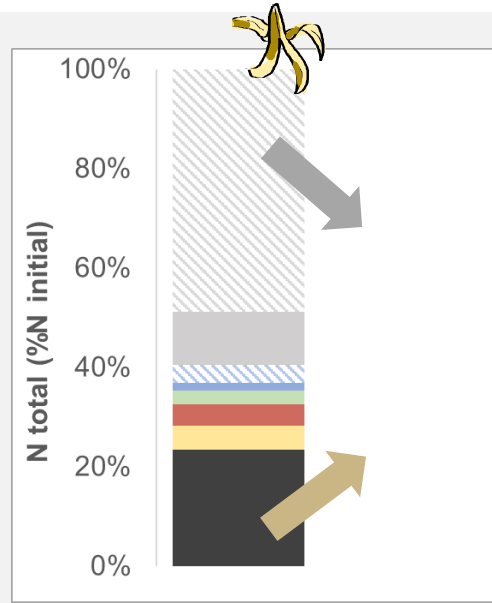
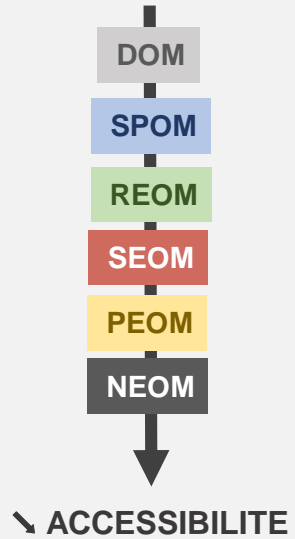
Bilan matière sur l'accessibilité de la matière organique



Profils d'accessibilité différents selon les digestats :
digestats déchets verts et fumiers plus fibreux -> moins de MO accessible

Pendant le séchage DOM -> SPOM et NEOM
Diminution de l'accessibilité de la MO sur tous les digestats

Bilan matière sur l'accessibilité de l'azote

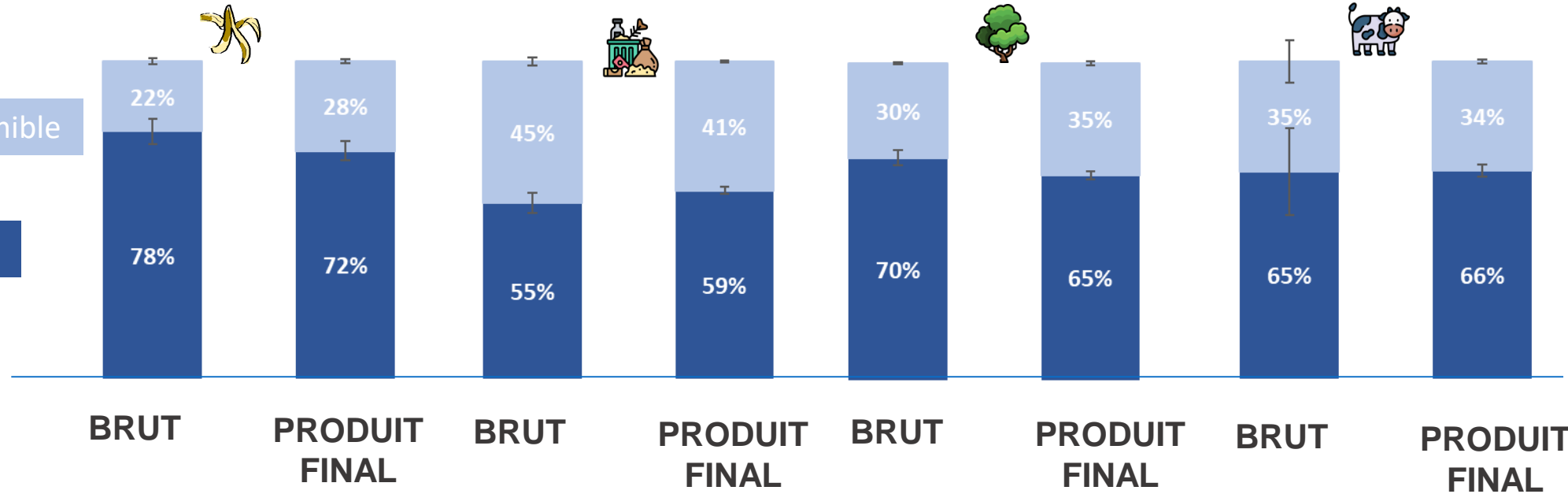
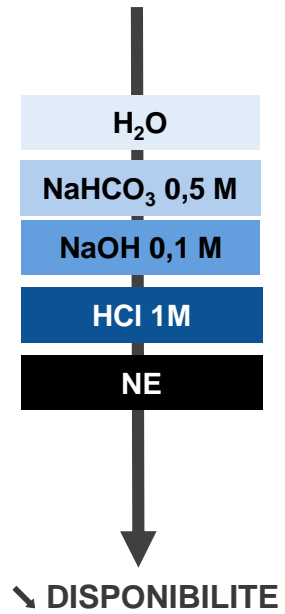


Distribution de l'azote soluble (DOM) dans la fraction la plus accessible SPOM

Tendances différentes sur le NEOM :

Diminution (biodéchet, fumier) -> SPOM (hydrolyse + minéralisation via l'acidification)
 Augmentation (territoire et déchets verts) : DOMorg+SPOMorg-> NEOM (réorganisation)

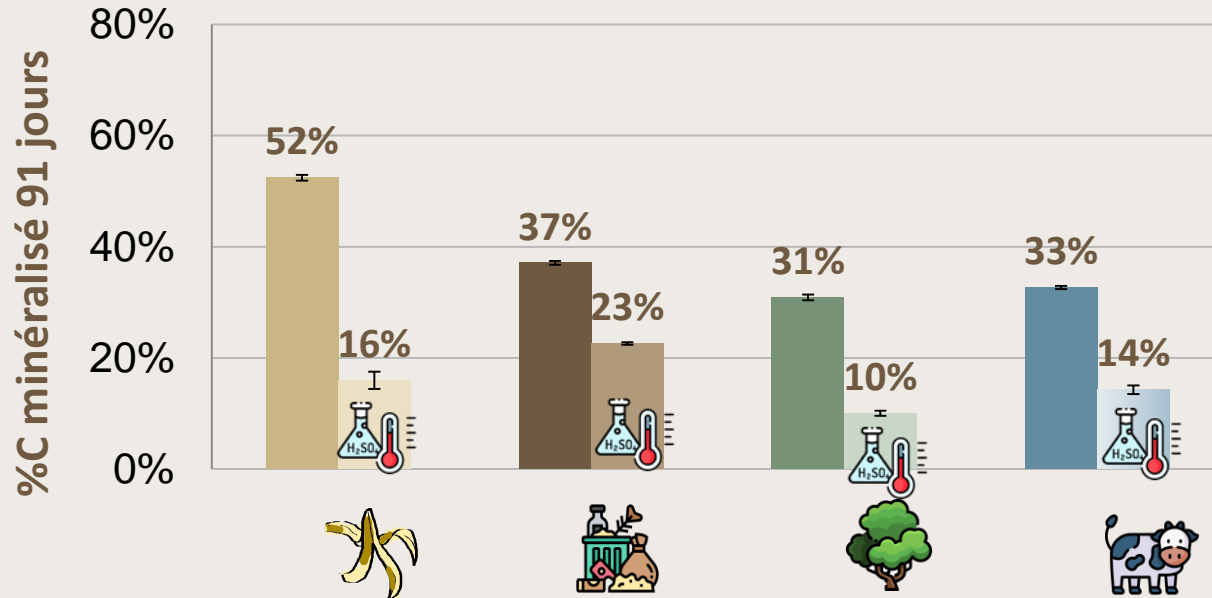
Impact du procédé sur la disponibilité du P



Pas d'impact significatif sur la disponibilité du P

Impact du procédé sur la minéralisation du C et N au sol

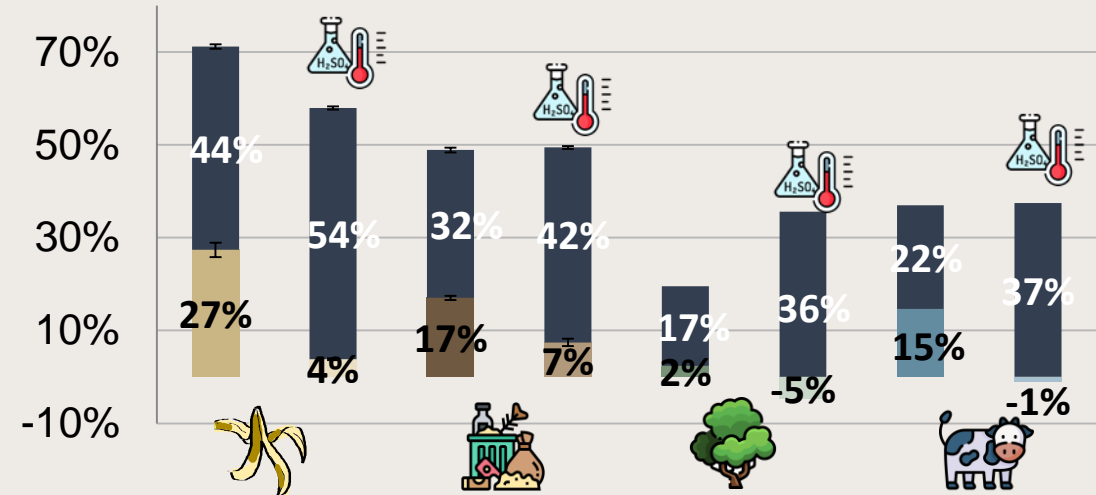
Minéralisation du carbone organique *Propriétés amendantes*



↘ C organique minéralisé
Le procédé stabilise le produit : potentiel amendant augmente

● Norganique minéralisé 91 jours ● N ammoniacal

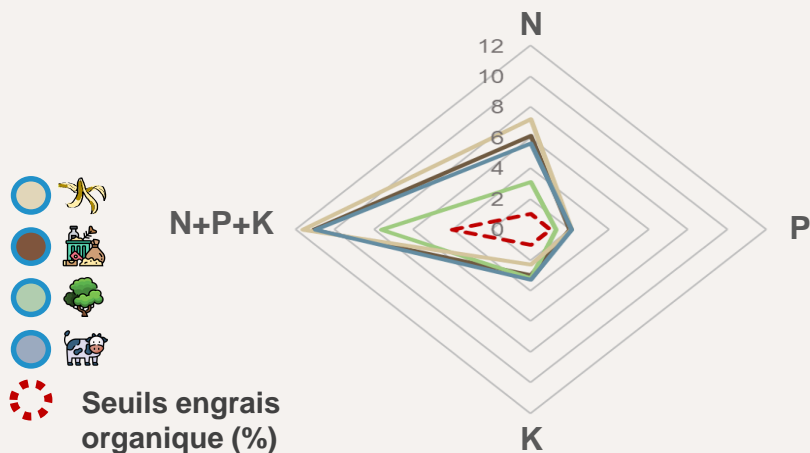
Minéralisation de l'azote organique *Propriétés fertilisantes N*



↘ N organique minéralisé,
Valeur N fertilisante similaire voire plus élevée due à l'acidification en fonction des digestats

Qualité et innocuité des produits finaux (Règlement EU n°2019/1009)

Nutriments



HEAVY METALS



Métaux	Concentrations (mg/kg MS)				Seuils
Cadmium (Cd)	0	0	0	0	1,5 mg/kg MS
Chrome (Cr)	114	29	90	38	2 mg/kg MS Cr VI
Mercure (Hg)	0	0	0	0	1 mg/kg MS
X Nickel (Ni)	98	21	51	26	50 mg/kg MS
Plomb (Pb)	4	4	24	4	120 mg/kg MS
Arsenic (As)	2	1	7	2	40 mg/kg MS
Zinc (Zn)	119	120	159	156	800 mg/kg MS
Cuivre (Cu)	81	29	74	66	300 mg/kg MS

Carbone organique



C organique(%)				Seuils	
				Engrais organique solide	Amendement
24%	32%	24%	34%	> 15%	> 7.5 %

Augmentation Chrome et Nickel x14: acier inoxydable 316, contenant [Fe] > 50%, [Cr] ~ 18%, [Ni] ~10%, attaqué par H₂SO₄ (Ouarga et al., 2023)

Digestat : structure liquide s'accrochant aux parois

Pathogènes



Indicateur	Unit	Valeurs				Seuils
<i>Salmonella</i> spp.	/	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
<i>E. Coli</i>	Ufc/g	< 100	< 100	< 100	< 100	<i>E. Coli</i> or <i>Enterococcaceae</i>
<i>Enterococcaceae</i>		< 23	35	359	28	< 1 000

Globalement, conforme avec la réglementation sur les engrais organiques solides

Conclusions et perspectives

CONCLUSIONS

- **Azote ammoniacal conservé** pendant le procédé, voire augmenté via la minéralisation acide.
- Les nutriments sont concentrés, et les seuils réglementaires globalement respectés: engrais organique solide.
- **Le procédé stabilise** la matière organique avec une augmentation de la capacité amendante du digestat, via une réorganisation de la matière.
- Toutefois, la **capacité fertilisante est conservée** via l'azote minéral et le phosphore disponibles.
- La **typologie du digestat impacte** le niveau de NPK et la transformation de la MO pendant le procédé....
- ... mais quel que soit le digestat initial, **un processus de stabilisation permet d'arriver à un produit hygiénisé avec double propriété: capacité amendante et fertilisante**

PERSPECTIVES

- Investiguer les processus de transformation de la matière (caractérisation)
- Optimisation des conditions opératoires du procédé en lien avec les processus de transformation
- Réaliser des tests agronomiques en pot afin de valider la disponibilité des nutriments

Optimisation multi-objectif d'une filière de méthanisation

Évaluation de la production durable de biogaz et de la gestion du digestat sous variabilités saisonnières

Wasim Ahmed^a, Julie Jimenez^a, Jean-Philippe Steyer^a, Anne Tremier^b, Romain Girault^b, Laurent Thuriès^c, Christiane Rakotomalala^c

^a INRAE LBE, ^b INRAE OPAALE, ^c CIRAD (Recyclage et Risques)



| Contenu

- Objectifs de recherche et principales contributions
- Chaîne de processus de méthanisation et cadre d'optimisation
- Aperçu du modèle de la filière de méthanisation
- Stratégies d'optimisation
- Analyse de scénarios
- Conclusions et perspectives

| Contents

- Research objectives and key contributions
- AD process chain and optimization framework
- AD process chain model overview
- Optimization strategies
- Scenario analysis
- Concluding remarks and future work

CONTEXTE

- Les bioraffineries basées sur la digestion anaérobie impliquent des compromis
- La variabilité des matières premières et leur disponibilité saisonnière affectent les performances du procédé
- La saisonnalité est rarement prise en compte dans les outils opérationnels d'aide à la décision (Murali et al., 2026)

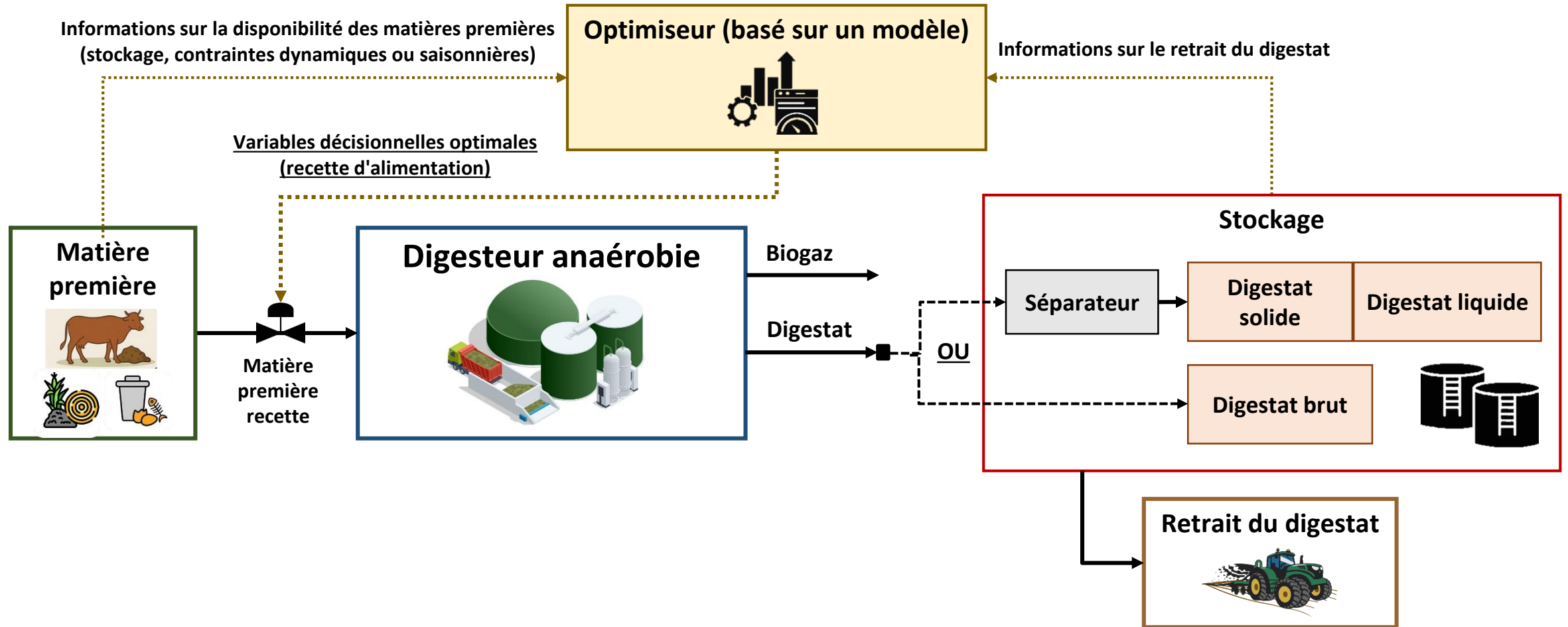
OBJECTIFS DE RECHERCHE

- Développer un cadre de modélisation de procédé et d'optimisation multi-objectif pour les bioraffineries basées sur la méthanisation
- Évaluer des stratégies d'optimisation comme outils d'aide à la décision sous contraintes et conditions opérationnelles

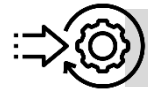
NOUVEAUTÉ ET CONTRIBUTIONS CLÉS

- Prise en compte simultanée de plusieurs objectifs (production d'énergie, valeur agronomique du digestat)
- Intégration des variabilités saisonnières (disponibilité des matières premières, retrait du digestat)

Procédés de la filière méthanisation et cadre d'optimisation



Aperçu du modèle des procédés de la filière méthanisation



ENTRÉES

Caractéristiques de l'alimentation

- Matières solides totales (TS)
- Matières solides volatiles (VS)
- Azote total (TN/TKN)
- Ammonium (NH₄⁺)
- Carbone total (TC)
- Potentiel de biométhane (BMP)
- % de CH₄ dans le biogaz
- Potentiel de minéralisation de l'azote (ANMP)

Conditions de procédé

- Débits d'alimentation (Q)
- Temps de rétention hydraulique (TRH)
- Conditions de séparation du digestat
- Conditions de stockage du digestat



MODÈLE

SYS-Metha + Modifications

(Bareha et al., 2021 & Pérémé et al., 2025)

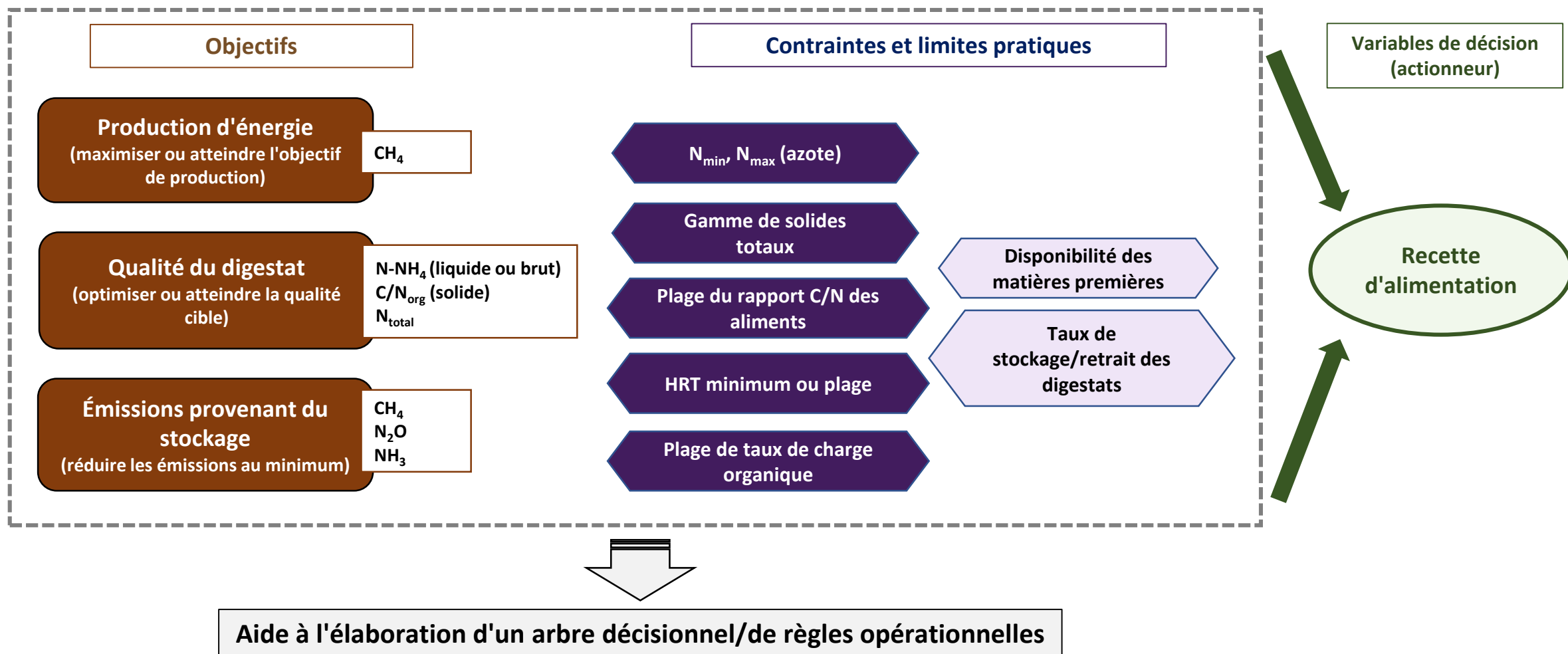
- **Prévisions relatives au digesteur anaérobie**
- **Séparation des digestats bruts (le cas échéant)**
- **Dynamique du stockage des digestats**
- **Fuites de gaz du digesteur**
- **Émissions pendant le stockage des digestats**



RÉSULTATS

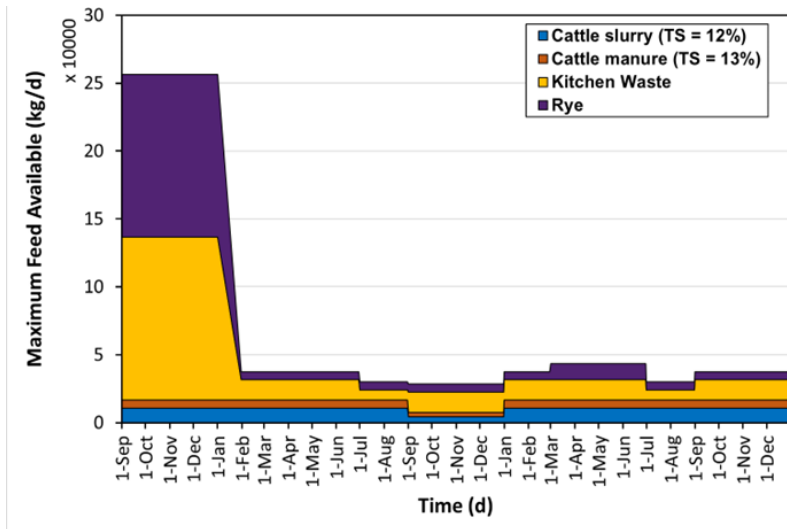
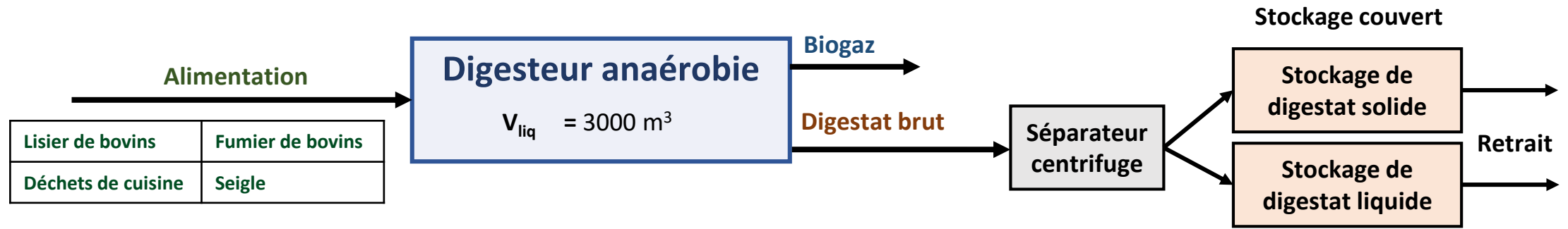
- **Qualité du biogaz**
- **Qualité du digestat**
- **Émissions de gaz**
- **Variables**
 - CH₄ and CO₂ (biogaz)
 - Q, TS, VS, TC, TN, NH₄ (digestat)
 - CH₄, CO₂, NH₃, N₂O (émissions pendant le stockage)

Stratégies d'optimisation



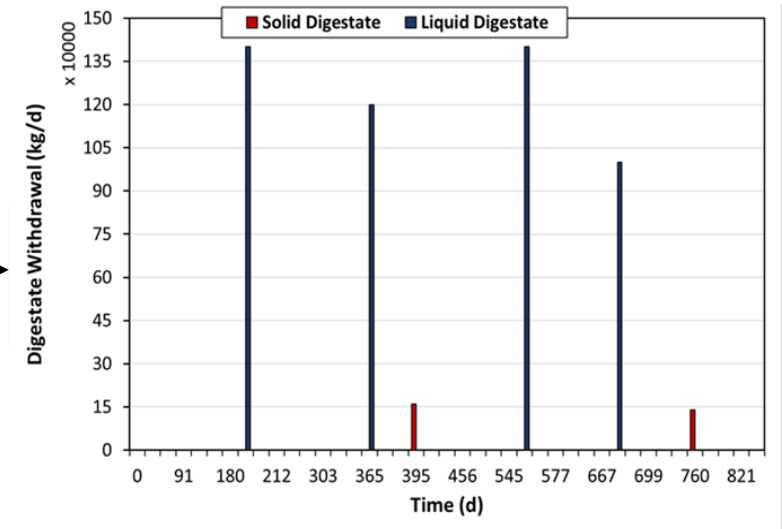
Analyse de scénarios: description

Scénario : **Recette d'intrants optimale avec variations saisonnières de la disponibilité des matières premières et de l'utilisation des digestats**



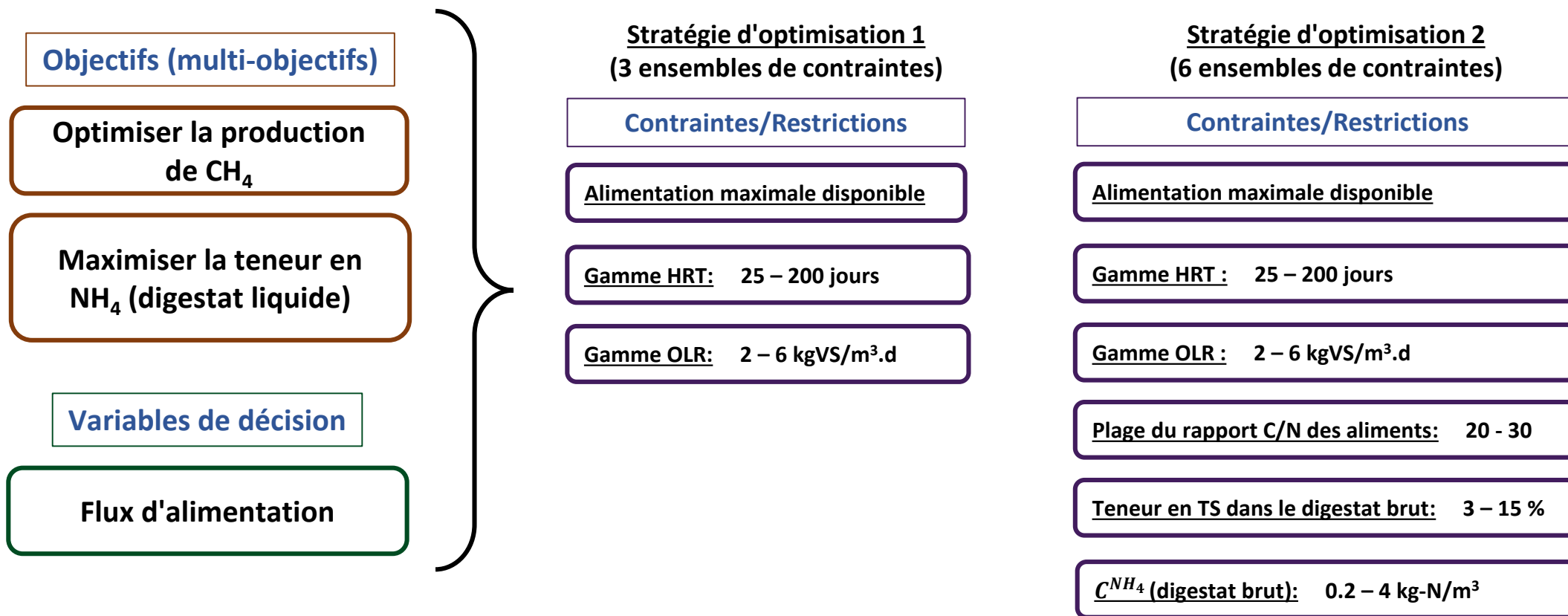
Changements saisonniers

Disponibilité des matières premières Retraits de digestat



Analyse de scénarios: stratégies d'optimisation

Scénario: Recette d'intrants optimale avec variations saisonnières de la disponibilité des matières premières et de l'utilisation des digestats

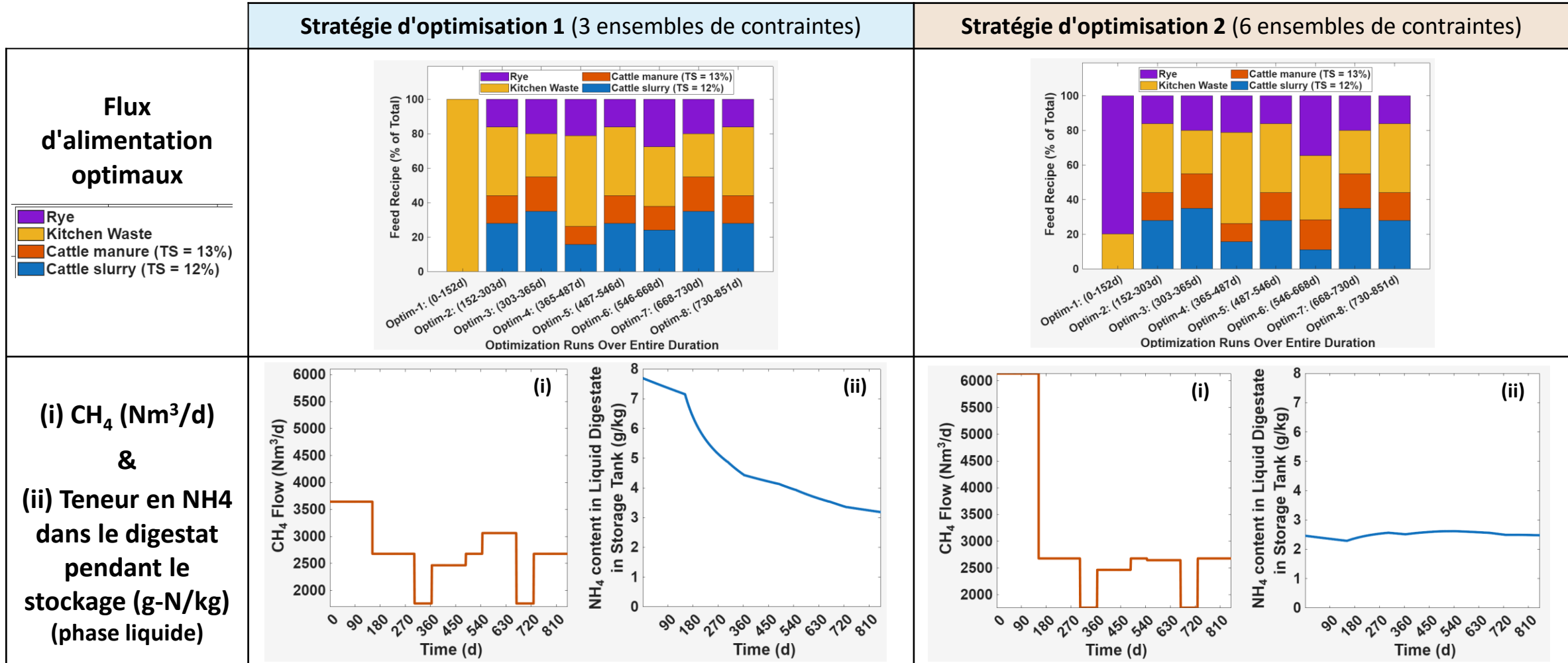


Analyse de scénarios: méthodologie de simulation et d'optimisation

Scénario: Recette d'intrants optimale avec variations saisonnières de la disponibilité des matières premières et de l'utilisation des digestats

Source des caractéristiques des matières premières	Base de données sur les substrats (Bareha et al., 2021)
Nombre d'optimisations	8 optimisations (pour chaque changement dans la disponibilité des matières premières)
Outils logiciels	MATLAB R2025b PLATEMO: boîte à outils d'optimisation de Yao et al. (1999)
Algorithme de solution d'optimisation multi-objectifs	NSGA-II
Durée	~ 2 ans et 3 mois
Pas de temps de simulation	1 jour

Analyse de scénarios: résultats et comparaisons après optimisation



Analyse de scénarios: résultats et comparaisons après optimisation

	Stratégie d'optimisation 1 (3 ensembles de contraintes)	Stratégie d'optimisation 2 (6 ensembles de contraintes)
<p>(i) Débit total d'alimentation (kg/d)</p> <p>&</p> <p>(ii) Rapport alimentation C/N</p>	<p style="text-align: center;"><u>< Remarque ></u></p> <p style="text-align: center;"><i>En période de faible disponibilité du substrat ----> OLR et le rapport C: N ne respectent pas les contraintes (Stratégie 2)</i></p>	
<p>(i) OLR (kgVS/m³.d)</p> <p>&</p> <p>(ii) HRT (d)</p>		

< Message principal >

Disponibilité et type de substrat -----> influencent le maintien des limites d'alimentation opérationnelles (OLR, rapport C:N), même après optimisation

Analyse de scénarios: résultats et comparaisons après optimisation

	Stratégie d'optimisation 1 (3 ensembles de contraintes)	Stratégie d'optimisation 2 (6 ensembles de contraintes)
Total des solides dans le digestat brut (% massique)	<p style="text-align: center;">< Remarque ></p> <p style="text-align: center;"><i>La concentration en NH₄ dans le digestat brut reste dans les contraintes avec la Stratégie 2 et est plus faible que dans la Stratégie 1 ; cependant, l'objectif de maximisation du NH₄ est compromis.</i></p>	
Concentration en NH ₄ dans le digestat brut (kg-N/m ³)		

< Message principal >

Les contraintes pratiques peuvent introduire des compromis supplémentaires entre les objectifs dans l'optimisation multi-objectifs.

Conclusions et Perspectives



Principaux résultats

- Développement d'un cadre d'optimisation basé sur la modélisation des procédés de la filière méthanisation, avec une approche multi-objectifs
- Le cadre fournit une analyse au niveau du système (production de méthane, qualité du digestat et dynamique saisonnière).
- Analyse de scénarios avec mise en œuvre d'un cadre d'optimisation comme outil d'aide à la décision:
 - La disponibilité et les caractéristiques des matières premières ont une forte influence sur le mélange alimentaire optimal.
 - Les contraintes opérationnelles et saisonnières influencent les résultats de l'optimisation multi-objectifs.



Prochaines étapes

- Explorer d'autres stratégies d'optimisation (réduction des émissions, empreinte environnementale, etc.)
- Tester des configurations de scénarios supplémentaires, y compris des scénarios basés sur la littérature et une étude de cas à l'échelle régionale en France pour la planification de la bioéconomie.

PROCÉDÉS ET VALORISATION

MICROBIOLOGIE, INHIBITION ET CONDITIONS OPÉRATOIRES

Animateur

Guillaume Henry

1

Elie Nader, Suez

Découvrir l'optimum caché : Impact de la température sur la phase d'hydrolyse de la méthanisation

2

Joël Awinzure Agumah et Thierry Ribeiro, UTC

Digestion anaérobie mésophile des boues d'épuration municipales sous fortes concentrations de propionate de sodium en conditions semi-continues : inhibition et modifications de la communauté microbienne

3

Maxime Brissaud et Marwa Said, CH4Process – Natran R&I

Traitement de l'H₂S dans le biogaz sans nécessité d'O₂ via laveur par liquide catalytique

4

Léa Laguillaumie, INSA Toulouse

Optimisation de procédés de méthanation biologique : Etude du cycle du soufre et impact sur les activités biologiques au sein de cultures mixtes de microorganismes



Discovering the hidden optimum: The impact of temperature on the hydrolysis phase of anaerobic digestion

Elie Nader^{1,2}, Cyril Marcilhac¹, Roman Moscoviz¹, Jean-Philippe Steyer²

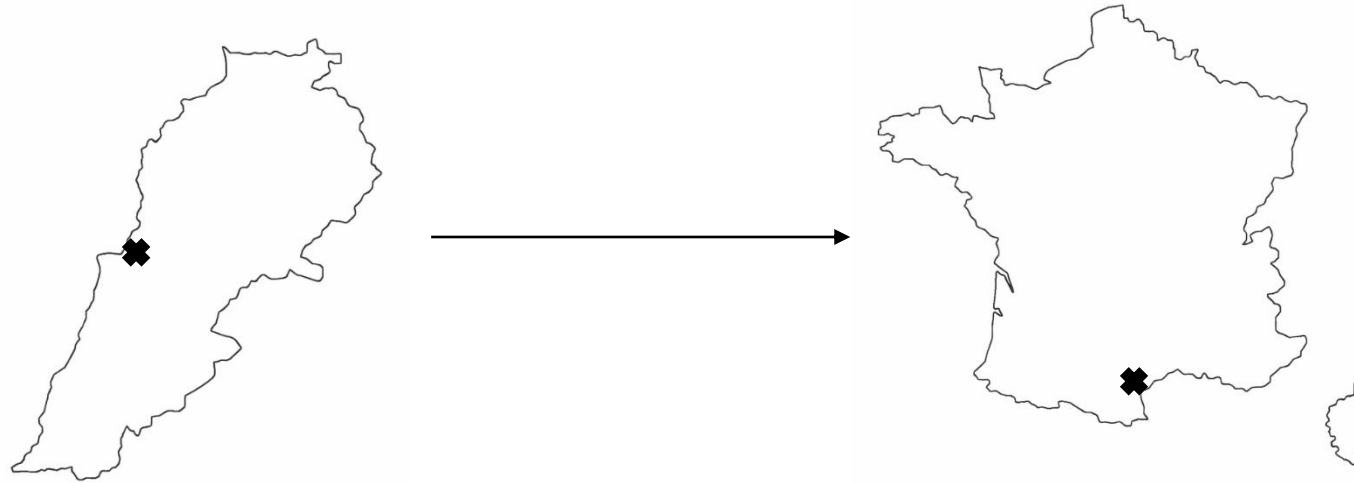
¹ SUEZ, CIRSEE

² INRAE, LBE



Research Context

- ❖ PhD student (2nd year) in **Bioprocess Engineering**
- ❖ **CIFRE industrial PhD** – collaboration between **INRAE (LBE)** and **SUEZ**
- ❖ Thesis Title: “**Role and Impact of Temperature on the Performance of Industrial Digesters**”
- ❖ Originally from **Lebanon**, currently conducting research in **France**



Temperature in Industrial AD

- Temperature is a **major operational variable**
- Current industrial practice relies on **fixed mesophilic (~35 °C) or thermophilic (~55 °C)** setpoints, often without mechanistic justification (*Fernández-Rodríguez, Pérez, & Romero, 2013*)
- These regimes strongly influence **microbial pathways and stability** (*Conrad, 2023*)

Chemical Engineering Journal 232 (2013) 59–64



Comparison of mesophilic and thermophilic dry anaerobic digestion of OFMSW: Kinetic analysis



J. Fernández-Rodríguez ^{a,b,*}, M. Pérez ^c, L.I. Romero ^a

^a Department of Chemical Engineering and Food Technology, Faculty of Science, University of Cádiz, Spain

^b Department of Chemistry and Soil Science, Faculty of Science, University of Navarra, Spain

^c Department of Environmental Technology, Faculty of Sea and Environment Sciences, University of Cádiz, Spain

1. Introduction

AD is a microbiological process capable of degrading the organic matter into methane and carbon dioxide in the absence of oxygen.

The performance of microbiological processes is closely related to the temperature of the system since metabolic activity of microorganisms is possible only in a certain temperature range and, in addition, a maximum activity is obtained within this interval for pure species. However, AD is developed by a complex mixed population and, hence, several temperature ranges are possible for the

development of the process. The two main ranges of temperature for AD are mesophilic (M) and thermophilic (T), whose optimum temperatures are 35 °C and 55 °C, respectively. These processes have been widely studied and applied to different wastes [5–9]. The heterogeneity of the OFMSW is widespread known and this variability in the waste can suppose problems in order to predict the behaviour of the anaerobic systems. The kinetics analysis could give us the key parameters for optimising the anaerobic process. Furthermore, the used FORSU is a non-source sorted organic fraction of municipal solid waste from an industrial MBT plant.

In general, the increase in process temperature means a higher microbiological activity and, hence, the substrate consumption and the methane generation rates were higher, but obviously it carries an increased expenditure of energy, also. In short, thermophilic range shows some advantages like high biogas production,

* Corresponding author at: Department of Chemistry and Soil Science, Faculty of Science, University of Navarra, Spain. Tel: + 34 948 425 600 _ 806271

E-mail addresses: juanafernandez@unav.es, juana.fernandez@uca.es (J. Fernández-Rodríguez).

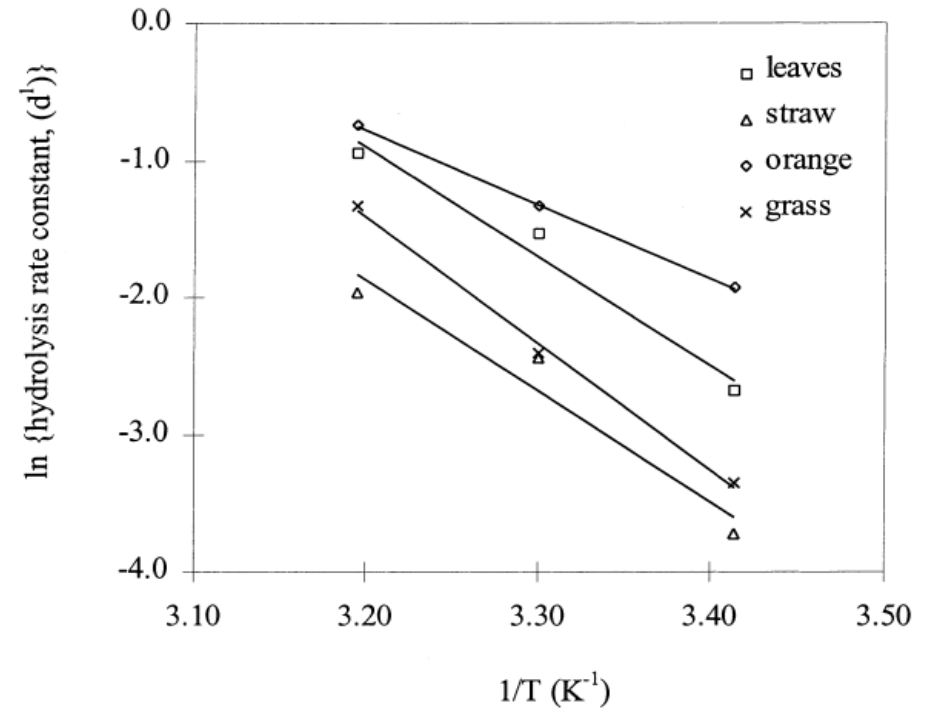
1385-8947/\$ - see front matter © 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.066>

Fernández-Rodríguez, J., Pérez, M., & Romero, L. I. (2013). *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.066>.

Conrad, R. (2023). *Frontiers in Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1232946>

Classical Expectation

- Reaction rates are expected to **increase exponentially with temperature**
- Hydrolysis is often assumed to follow **Arrhenius behaviour** (Veeken & Hamelers, 1999)
- Each substrate shows a linear $\ln(k)$ vs. $1/T$ relationship in the **15–40 °C** range



Source: Veeken & Hamelers (1999)

Veeken, A., & Hamelers, B. (1999). *Bioresource Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00188-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00188-6)

Why Study the Thermophilic Range?

- Thermophilic digestion offers (*Ahring et al., 2001*):

- Faster reaction rates
- Pathogen reduction
- Higher loading capacity



- However it often suffers from **instability and inhibition** (*Capson-Tojo et al., 2020; Nie et al., 2021*)
- **Temperature effects on hydrolysis remain poorly characterised in this range** (*Lin et al., 2024; Zhao et al., 2025*)

Ahring, B. K., Ibrahim, A. A., & Mladenovska, Z. (2001). *Water Research*. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00526-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00526-1)

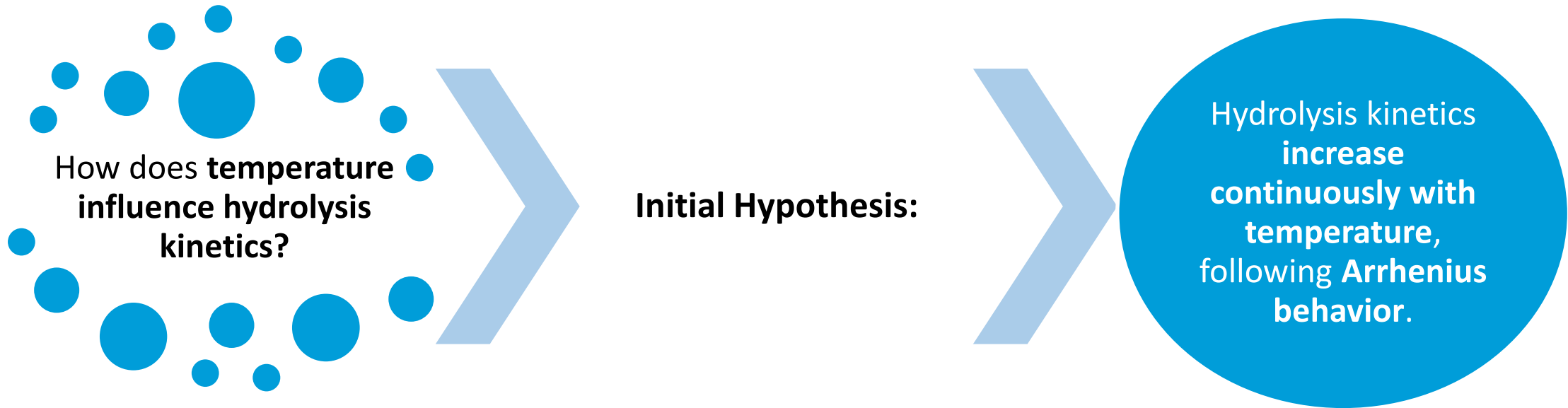
Capson-Tojo, G., Moscoviz, R., Astals, S., Robles, A., & Steyer, J.-P. (2020). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109487>

Nie, Y., Zeng, G., Huang, D., Liu, L., Lai, C., Xu, P., Li, B., & Cheng, M. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111453>

Lin, M., Qiao, W., Ren, L., Sun, Y., Zhang, J., & Dong, R. (2024). *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129890>

Zhao, C., Mo, J., Qin, Y., Gong, Y., Zhan, O., Song, B., & Wu, W. (2025). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115630>

Research Question & Initial Hypothesis



Experimental Design

- **Investigate hydrolysis kinetics under thermophilic conditions**
 - Three 5-L fed-batch reactors operated at **51°C, 56°C, and 61°C**
- **Prevent biomass washout at high temperature**
 - Fed-batch operation
- **Ensure hydrolysis remains the rate-limiting step**
 - Low S/l ratio (<0.3 gVS/gVS)
- **Ensure microbial adaptation and result consistency**
 - ~8 months of operation
 - Repeated batches after temperature acclimation
- **Assess robustness across substrates**
 - Two different commercial food wastes were tested



Substrates & Inoculum Used

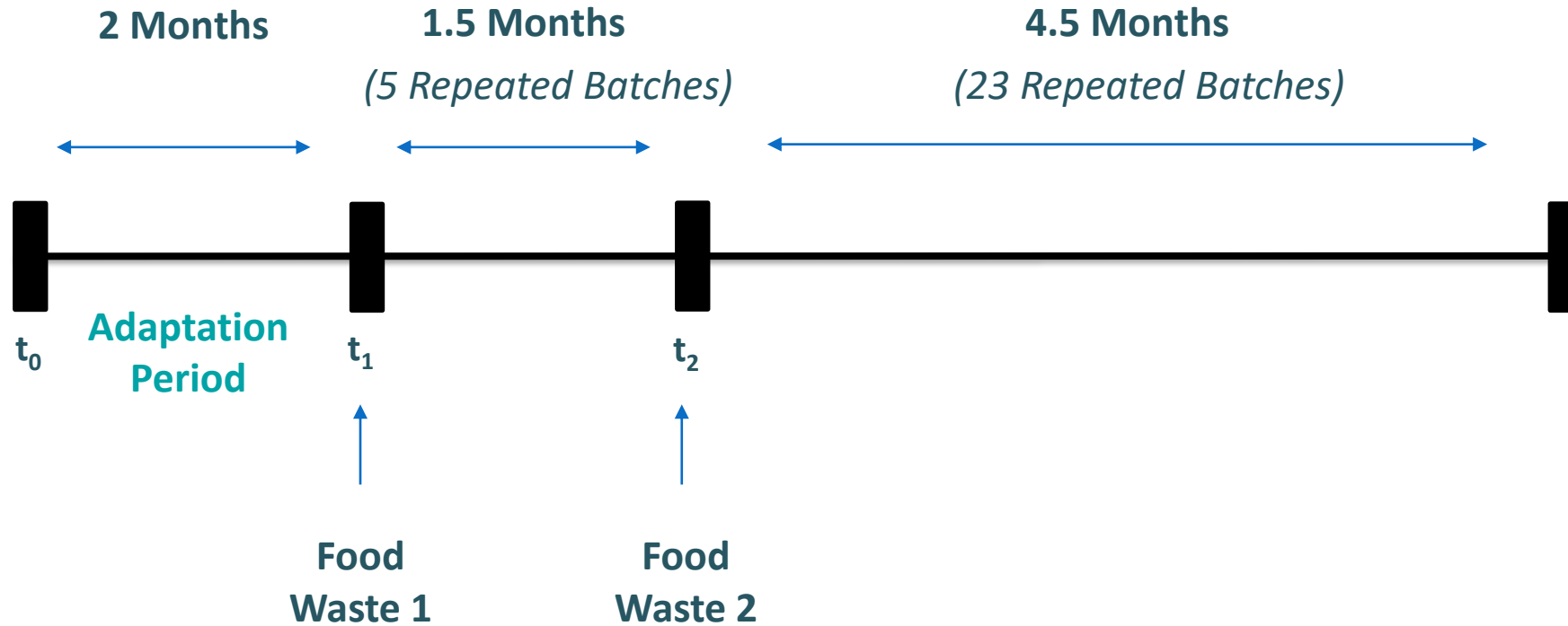
Parameter	Inoculum*	Food Waste 1*	Food Waste 2*	Unit
BMP	-	482	626	NmL CH ₄ / g VS
Total Solids (TS)	23.3	97.3	13.2	%
Volatile Solids (VS)	10.8	83.8	12.2	%
Total COD	-	1380	240	kg/t
Total Kjeldahl Nitrogen	-	-	5.8	g N/kg

* Inoculum from industrial thermophilic digester (51°C) fed with OFMSW

* Food Waste 1 (Grand Producers biowaste): Dry food waste collected from large producers such as restaurants and catering services

* Food Waste 2 (Liquid biowaste): Slurry-type organic waste rich in easily degradable compounds (e.g., food residues, kitchen liquids)

Experimental Timeline



- Inoculum adapted to each temperature
- Repeated batches ensured result consistency

* Food Waste 1 (Grand Producers biowaste): Dry food waste collected from large producers such as restaurants and catering services

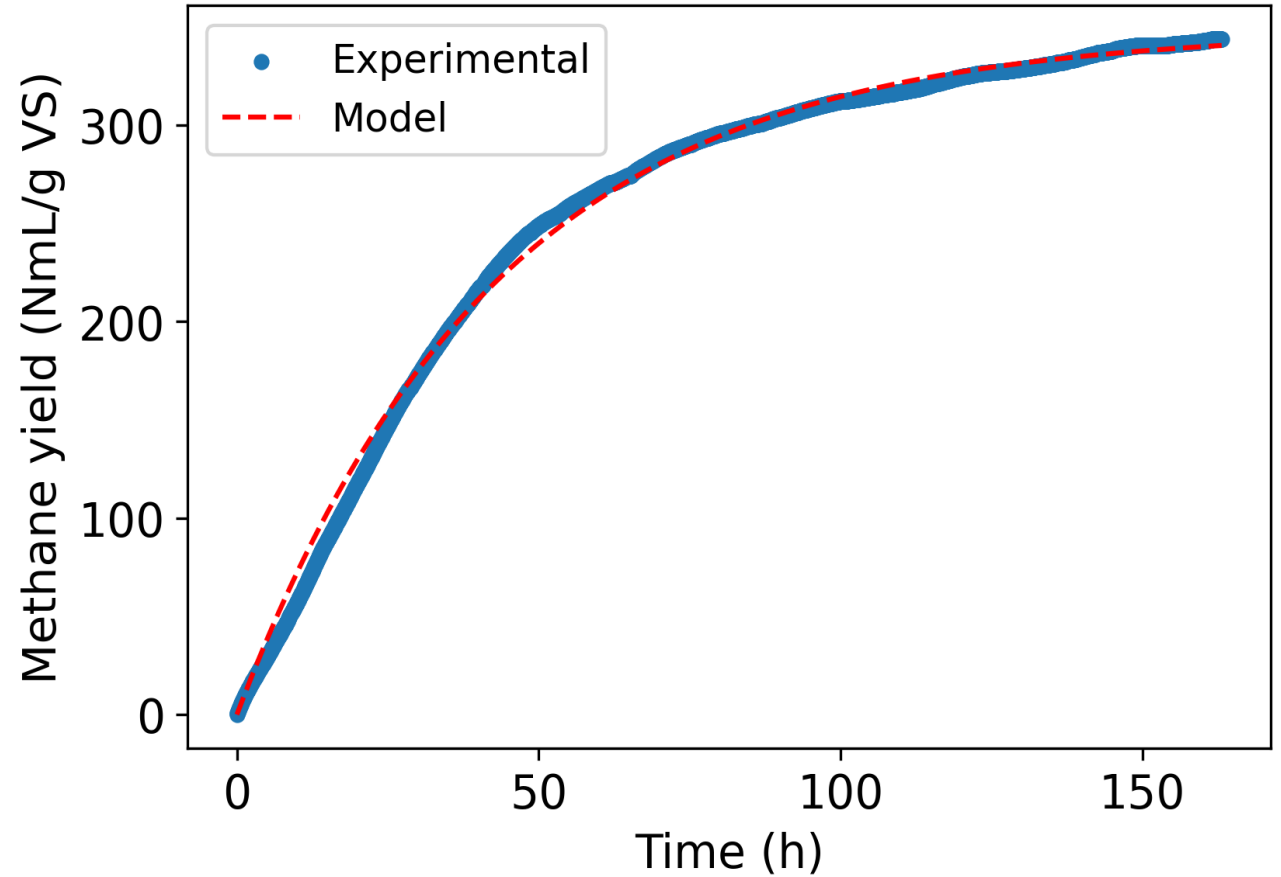
* Food Waste 2 (Liquid biowaste): Slurry-type organic waste rich in easily degradable compounds (e.g., food residues, kitchen liquids)

Hydrolysis Kinetic Modelling

- Hydrolysis kinetics were modelled using the first-order equation:

$$B(t) = B_{\infty}(1 - e^{-kt})$$

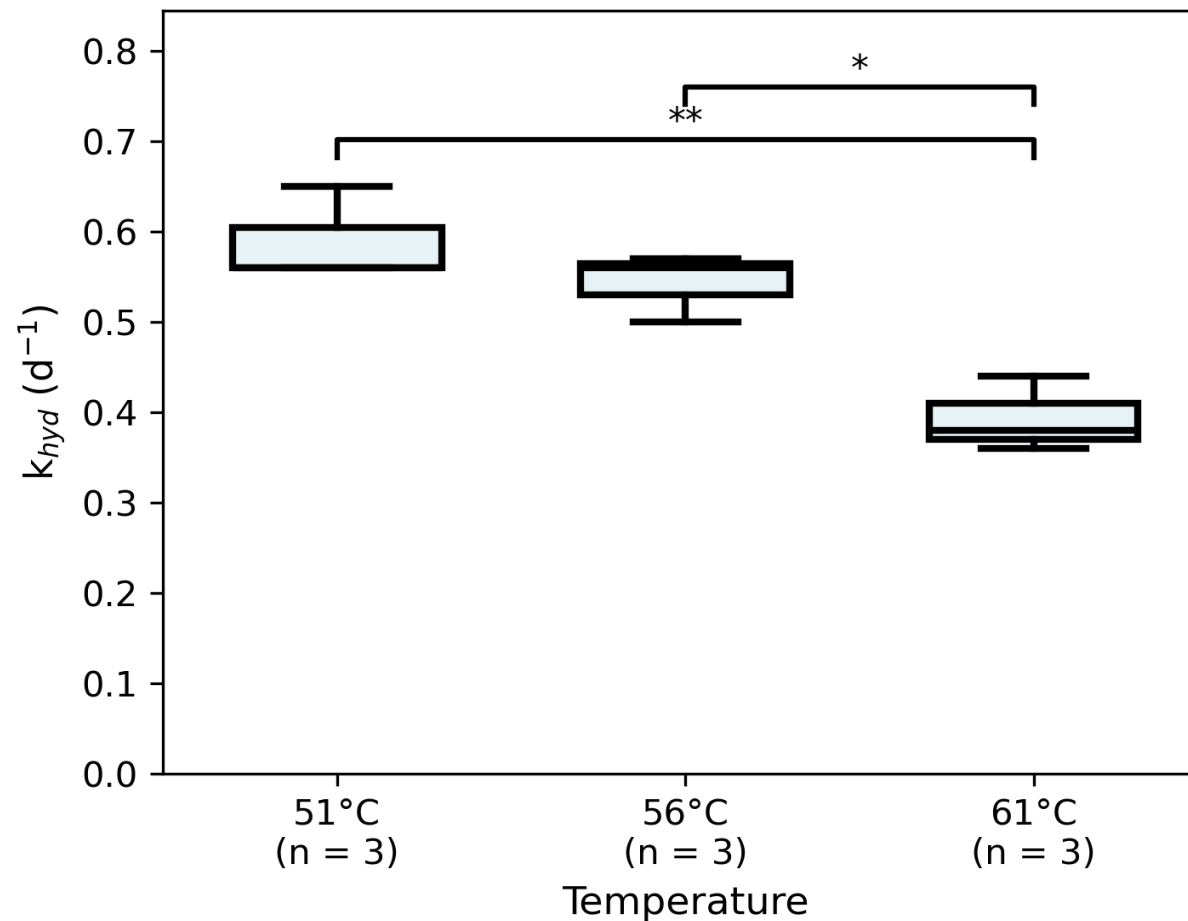
- Parameters determined by **grid search optimization**
- Best fit selected by **RMSE minimisation**



Food Waste 1 - 56°C - Batch 4

Results - Food Waste 1

- ❖ Highest hydrolysis constants observed at **51°C** and **56°C**
- ❖ Significant decrease at **61°C**
- ❖ Differences statistically significant

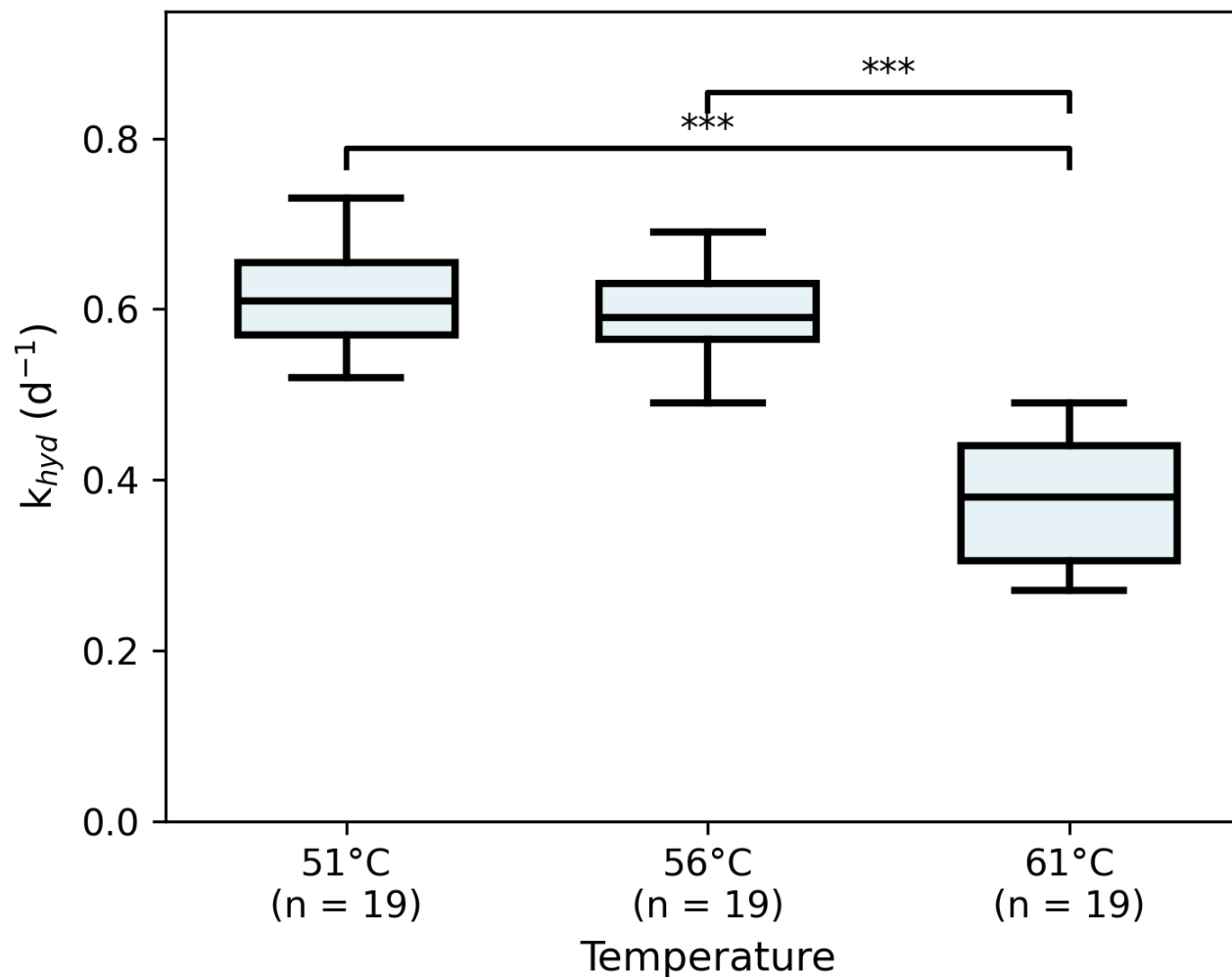


* p -value < 0.05; ** p -value < 0.01

* Food Waste 1 (Grand Producers biowaste): Dry food waste collected from large producers such as restaurants and catering services

Results - Food Waste 2

- Same temperature trend observed
- Moderate thermophilic temperatures
→ fastest hydrolysis
- High thermophilic temperature
→ slower kinetics



*** p -value < 0.001

* Food Waste 2 (Liquid biowaste): Slurry-type organic waste rich in easily degradable compounds (e.g., food residues, kitchen liquids)

Deviation from Arrhenius Expectation

Arrhenius assumption predicts continuous increase with temperature

However:

- **51°C and 56°C** showed the fastest hydrolysis rates
- **61°C** → significantly lower kinetics

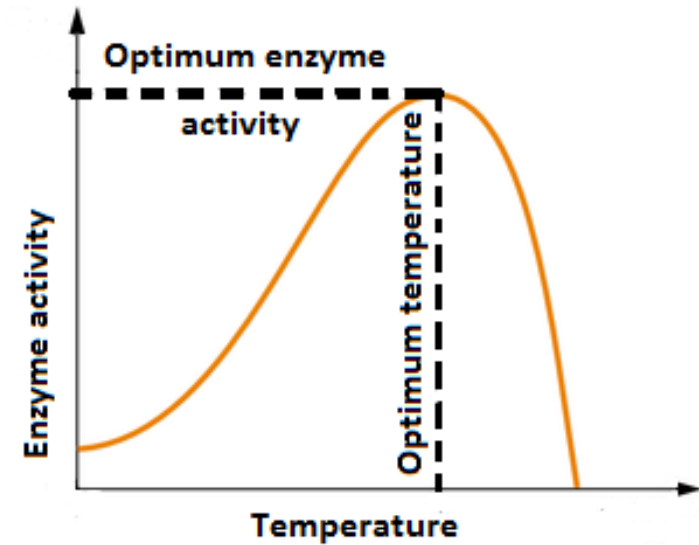
→ **Hydrolysis did not increase continuously with temperature in the thermophilic range, suggesting possible thermal limitations at higher temperatures**

Temperature Response of Enzymatic Reactions

Enzyme activity typically follows a **bell-shaped temperature response** (Daniel et al., 2010)

- Reaction rates increase with temperature
- Reach an optimum
- Decline due to **enzyme instability / denaturation**

But: Hydrolysis is fundamentally an **enzymatic process**

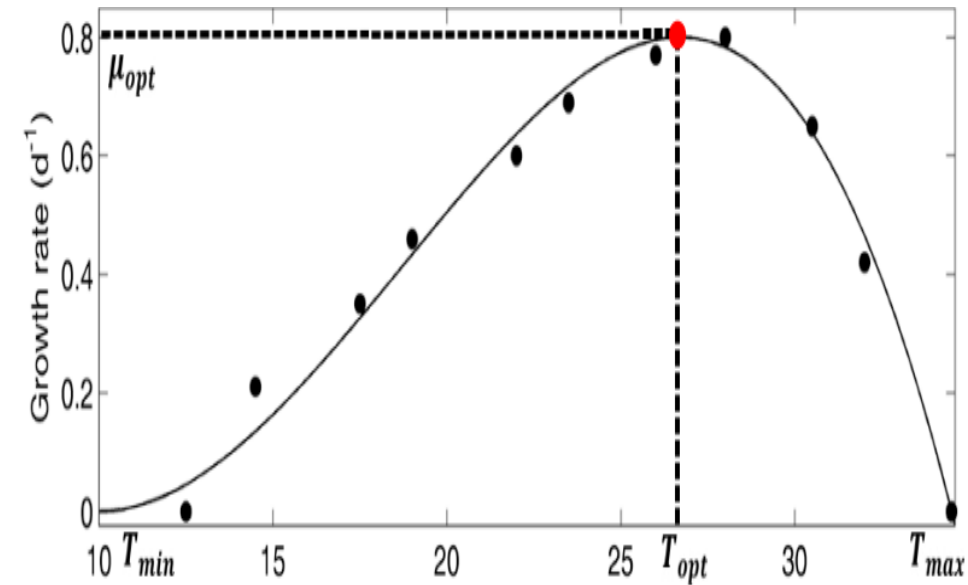


Conceptuel illustration

Daniel, R. M., Peterson, M. E., Danson, M. J., Price, N. C., Kelly, S. M., Monk, C. R., Weinberg, C. S., Oudshoorn, M. L., & Lee, C. K. (2010). *Biochemical Journal*. <https://doi.org/10.1042/BJ20091254>

Thermal Response of Microbial Systems

- Microbial processes often show **temperature optima**
- Example: **bacterial growth curve** characterised by T_{min} – T_{opt} – T_{max} (Ratkowsky et al., 1982)
- Growth rate increases with temperature until **enzyme denaturation and metabolic limitations** reduce activity
- Even complex biological systems exhibit **bell-shaped temperature responses**



Source: Grimaud et al. (2015)

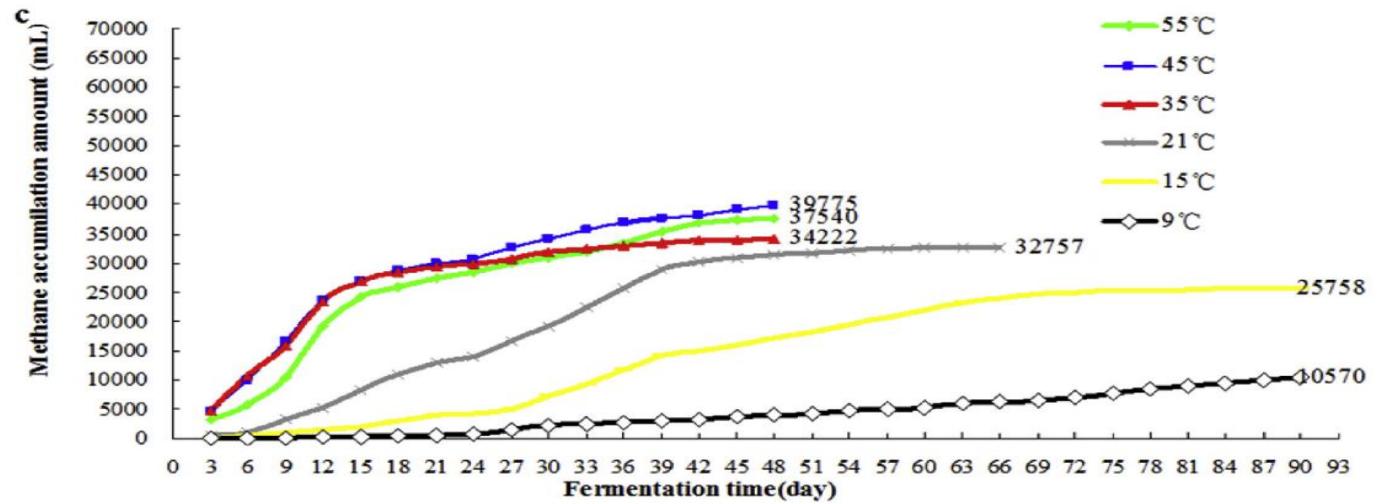
→ Hydrolysis in anaerobic digestion may follow similar behaviour

Ratkowsky, D. A., Olley, J., McMeekin, T. A., & Ball, A. (1982). *Journal of Bacteriology*. <https://doi.org/10.1128/jb.149.1.1-5.1982>

Grimaud, G. M., Le Guennec, V., Ayata, S.-D., Mairet, F., Sciandra, A., & Bernard, O. (2015). *IFAC-PapersOnLine*. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.059>

Emerging Evidence

- Several anaerobic digestion studies report performance optima across temperature ranges
- Hydrolysis or methane production often peaks around **intermediate temperatures (~45°C)** (Hupfauf et al., 2018; Tian et al., 2018; Pincam et al., 2026)
- Suggests **possible bell-shaped behavior**



Source: Tian et al. (2018)

Hupfauf, S., Hupfauf, B., & Insam, H. (2018). *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.120>
 Tian, H., Duan, N., Lin, C., Li, X., & Zhong, M. (2018). *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.094>
 Pincam, T., Liu, Y.-Q., Short, M., Guo, B., Sadhukhan, J., & Bywater, A. (2026). *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133609>

Important Limitation

Are temperature optima generic?

- Literature suggests hydrolysis may **not follow a continuous Arrhenius increase**

However, most studies rely on limited experimental systems:

- Single inoculum source
- Short adaptation periods
- Limited range of substrates

→ The **generality of the observed optima remains unclear**

Refining the Hypothesis

Initial hypothesis

Hydrolysis kinetics **increase continuously with temperature** following **Arrhenius behavior**.



Refined hypothesis

Hydrolysis kinetics may follow a **bell-shaped response to temperature**, with an optimum in the **moderate thermophilic range or lower** rather than a continuous Arrhenius increase.

However, the position and shape of this response may be **system-dependent**, reflecting:

- microbial diversity of the inoculum
- temperature-driven community adaptation
- substrate composition and enzyme requirements

Conclusions

Scientific relevance

- Hydrolysis kinetics show clear temperature dependence in AD of commercial food waste
- Results challenge the assumption that **higher temperature accelerates hydrolysis** with the highest hydrolysis constants observed at 51°C & 56°C and the lowest at 61°C

Industrial implications

- Operating near **~50°C** (compared to the typical 55°C) **may reduce heating demand without compromising performance**

Research perspective

- Results suggest hydrolysis may follow an **optimum-type temperature response**

Thank You For Your Attention

Acknowledgements

- SUEZ
- INRAE LBE
- GAIA Doctoral School – Institut Agro Montpellier
- Association Nationale de la Recherche et la Technologie.
- Supervisors: *Roman Moscoviz, Cyril Marcilhac, Jean-Philippe Steyer*

Contact



Elie NADER



SUEZ – CIRSEE - BioResourceLab



elie.nader@suez.com



Questions?



Inhibition de la digestion anaérobie des boues urbaines d'eaux usées par le propionate de sodium : production de biogaz et évolution de la communauté microbienne dans des réacteurs semi-continus

Joel Awinzure Agumah¹, Xiaojun Liu¹, Laura André², Camille Auneau³, Sophie Thibault³, Chrystelle Bureau³,
Sabrina Guérin⁴, Vincent Rocher⁴, Carlyne Lacroix⁴, Olivier Chapleur³, Ariane Bize³, Céline Roose-Amsaleg⁵,
André Paus¹, Thierry Ribeiro^{*,1}

¹Université de technologie de Compiègne, ESCOM, TIMR, Alliance Sorbonne Université, Compiègne, France

²Institut Polytechnique UniLaSalle, Université d'Artois, ULR 7519, Rue Pierre Waguet, 60026 Beauvais, France

³Université Paris-Saclay, INRAE, PROSE, 92160, Antony, France

⁴Direction Innovation SIAAP – Service public pour l'assainissement francilien, 82 avenue Kléber, 92700 Colombes, France

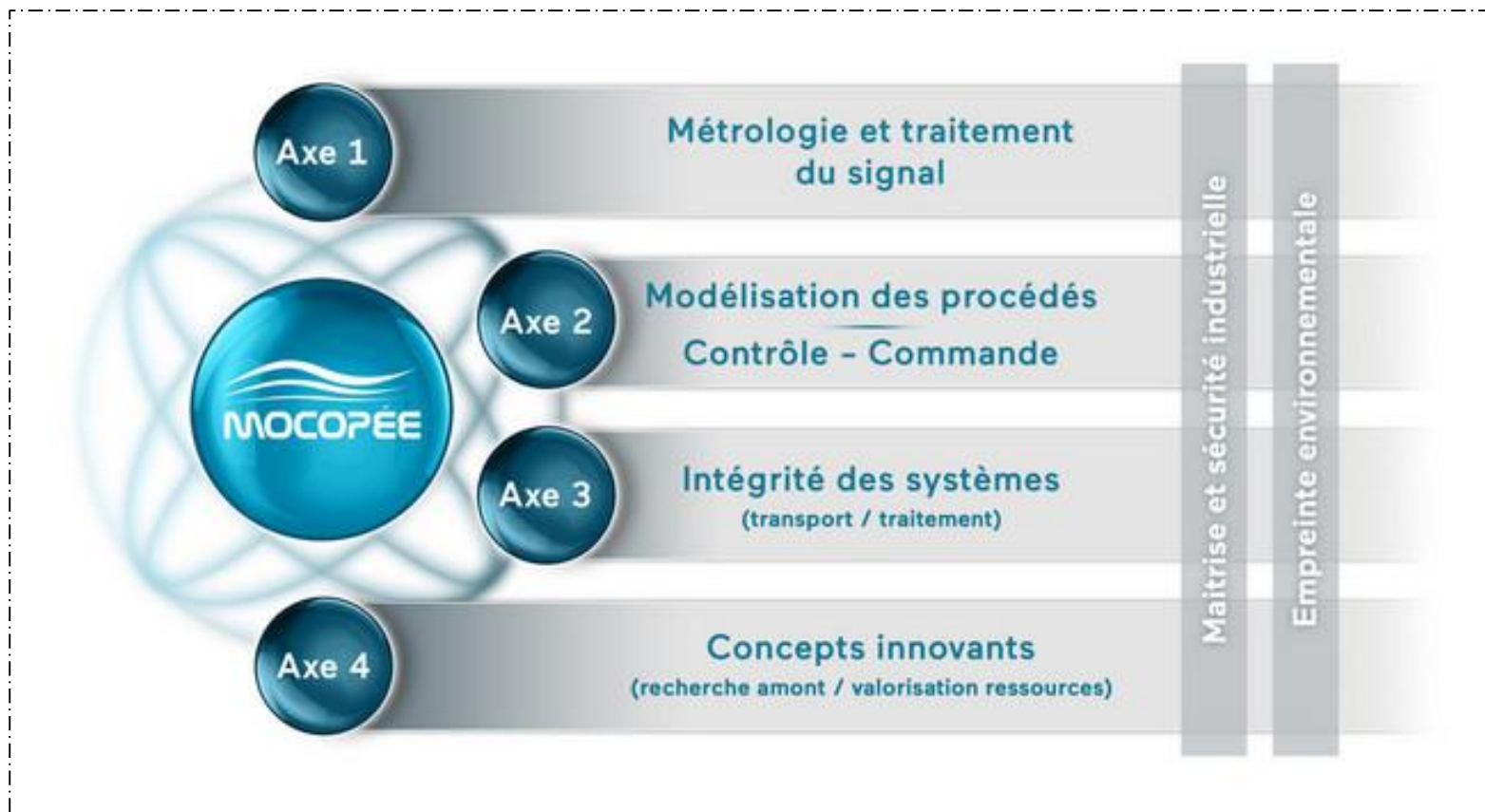
⁵CNRS, ECOBIO-UMR 6553, Université Rennes 1, 35000 Rennes, France



Cette étude a été effectuée dans le cadre du projet **MOCOPEE**



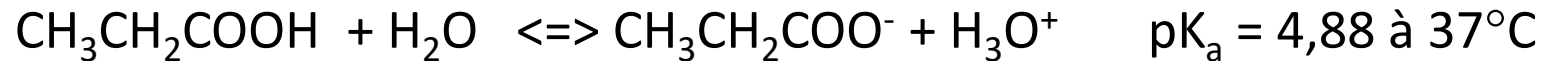
MOdélisation Contrôle et Optimisation des Procédés d'Épuration des Eaux



Le projet regroupe **environ 20 équipes**, dont des chercheurs, des acteurs opérationnels du secteur de l'eau et des partenaires industriels.

Contexte et Objectif

- ✓ Différentes communautés microbiennes impliquées dans la méthanisation
- ✓ Les **acides gras volatiles** (AGVs) jouent un rôle central, comme métabolites intermédiaires
- ✓ **L'acide propionique** est décrit comme un **inhibiteur important** à partir de $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($0,9 - 4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ dans la littérature)
- ✓ L'acide propionique est présent **sous forme de propionate** au pH de la méthanisation



- ✓ **Objectifs de cette étude:** identifier **l'évolution de la diversité** des communautés microbiennes lors de **l'inhibition de la méthanisation** des boues urbaines **par le propionate:** D'abord en mode batch, puis en semi-continu.

Tests en batch

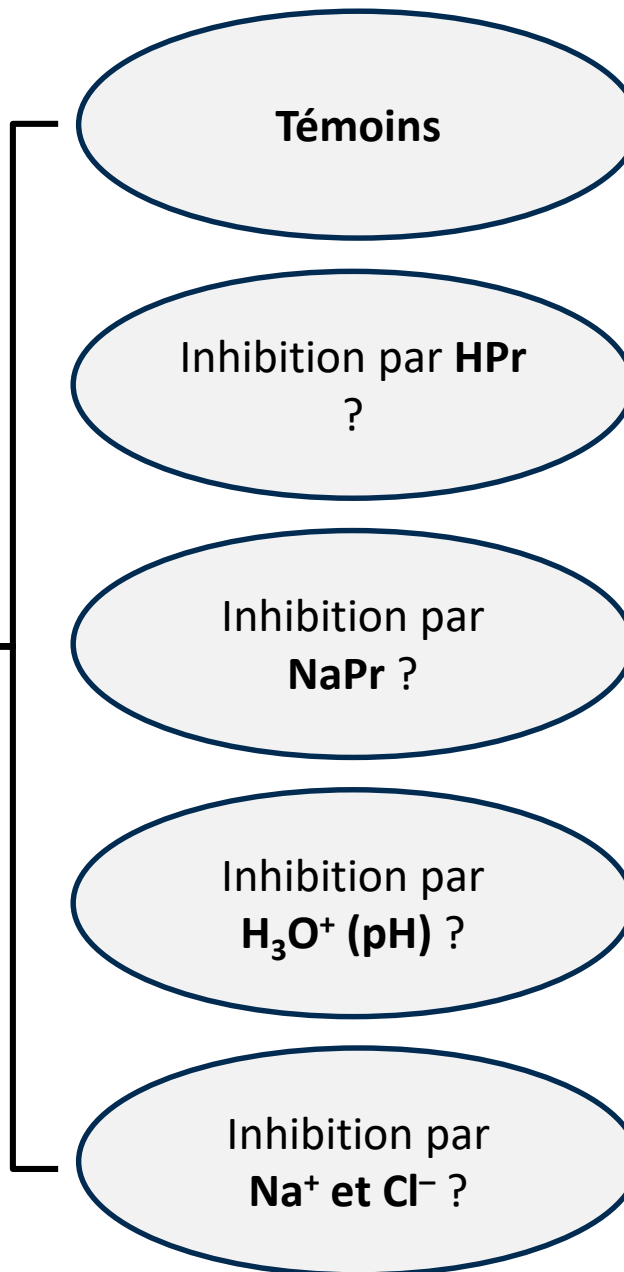
Première approche : AMPTS



Inoculum
(Boues digérées)

+

Substrats
(Boues non digérées)



20 mmol·L⁻¹ => [HPr] = 1500 mg·L⁻¹
81 mmol·L⁻¹ => [HPr] = 6000 mg·L⁻¹

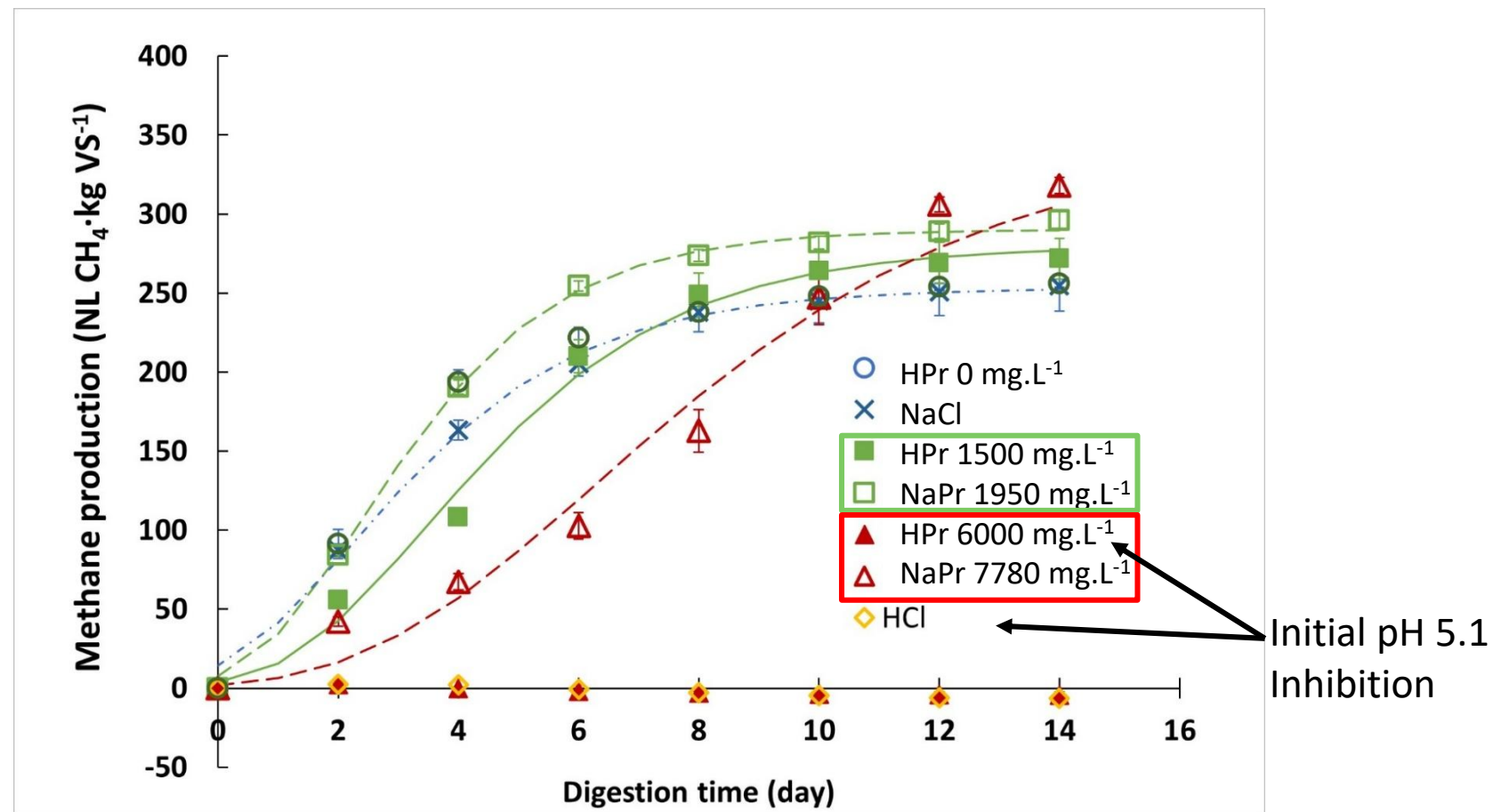
20 mmol·L⁻¹ => [NaPr] = 1950 mg·L⁻¹
81 mmol·L⁻¹ => [NaPr] = 7780 mg·L⁻¹

Ajout d'HCl pour obtenir le même pH₀
que celui avec [HPr] = 81 mmol·L⁻¹

[Na⁺] = 81 mmol·L⁻¹ par ajout de NaCl
[Cl⁻] proche de celle obtenue avec
l'ajout d'HCl

Tests en batch

Première approche : AMPTS



- ✓ Pas d'inhibition en présence de concentrations plus faibles de propionique ou de propionate éq. 1,5 g·L⁻¹ HPr ou 1,9 g·L⁻¹ NaPr
- ✓ Faible inhibition en présence de propionate de sodium à une concentration de 7,7 g·L⁻¹
- ✓ Toxicité immédiate en présence d'acide propionique à 6 g·L⁻¹, liée au pH
- ✓ Pas d'inhibition en présence de NaCl aux mêmes concentrations molaires

Tests en semi-continu

TSH : 20 jours – 5j/7j
 T° : 37 °C
 Volume : 5 L



R1

[NaPr]=0 g/L
 eq. [HPr]=0 g/L



R2

[NaPr]=1,95 g/L
 eq. [HPr]=1,5 g/L



R3

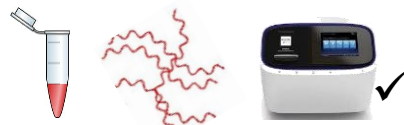
[NaPr]=7,78 g/L
 eq. [HPr]=6,0 g/L



R4

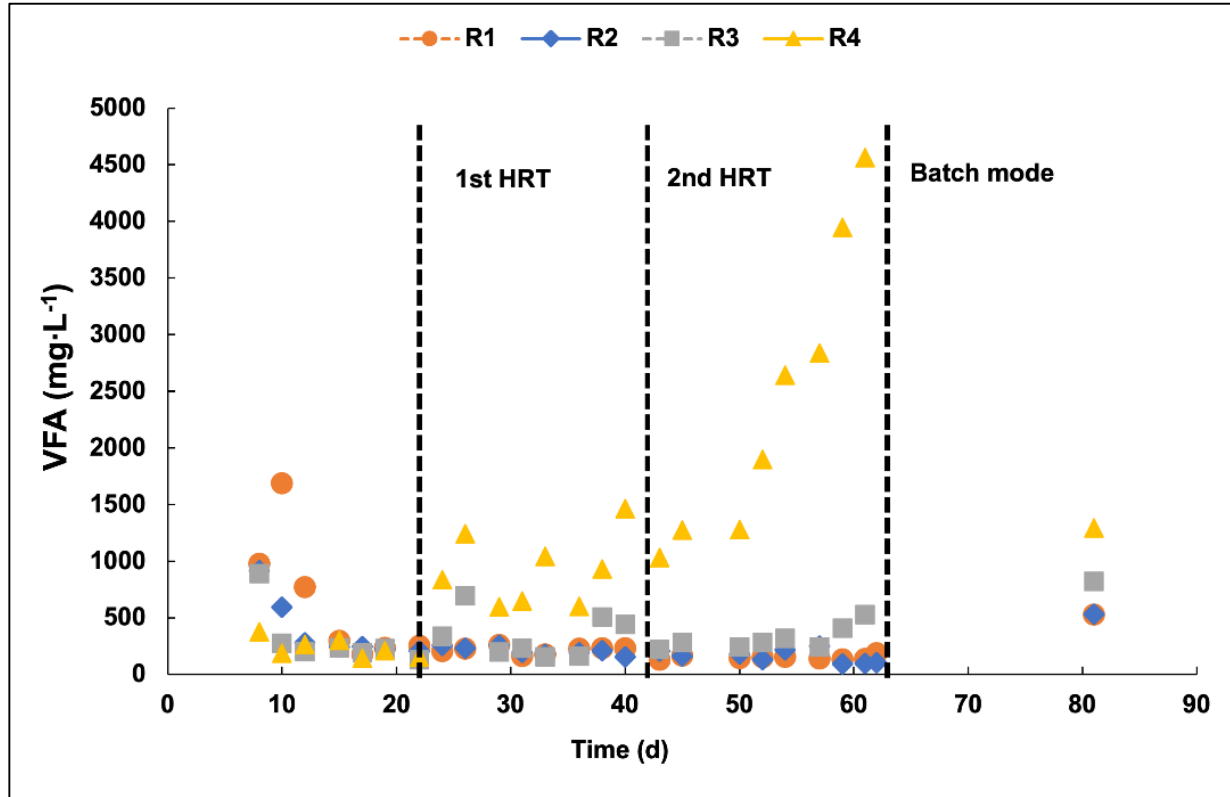
[NaPr]=13,0 g/L
 eq. [HPr]=10 g/L

Acclimatation	Jour 1 - 21	<p>Démarrage : inoculum (boues digérées) (MS 2,2 %, MV 64 % MS)</p> <p>Fonctionnement d'abord en mode batch, puis en semi-continu</p> <p>Acclimatation progressive des boues non digérées (MS 3,4%, MV 74 %MS)</p> <p>Au 21^e jour: Stabilisation des 4 réacteurs et Répétabilité des flores microbiennes et des performances</p>
Semi-continu	Jour 22 – 61	Alimentation en semi-continu des boues non digérées avec NaPr solide pendant 2 TSH (2 x 20 jours)
Batch	Jour 62 - 81	Arrêt des alimentations et du chauffage pour les 4 réacteurs



✓ Mesure de **pH, AGV, TAC, production et composition du biogaz** 3 fois/semaine
 ✓ Prélèvement pour la **population microbienne (16S rDNA)** à chaque début, milieu et fin de phase

Résultats – AGV



R1
[NaPr]=0 g/L
eq. [HPr]=0 g/L



R2
[NaPr]=1,95 g/L
eq. [HPr]=1,5 g/L



R3
[NaPr]=7,78 g/L
eq. [HPr]=6,0 g/L



R4
[NaPr]=13,0 g/L
eq. [HPr]=10 g/L

Stabilisation identique des 4 réacteurs après 21 jours

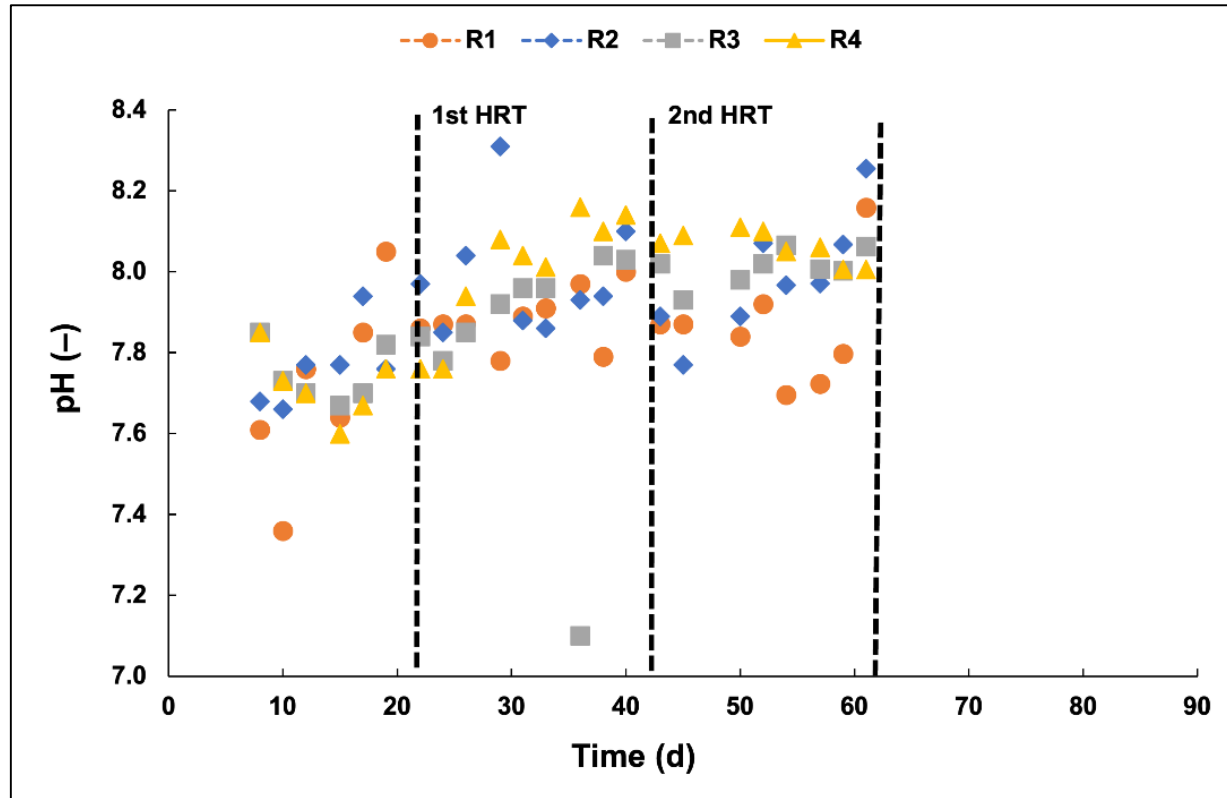
R1 et R2 demeurent relativement **stables**

R3 (éq.6 g.L⁻¹ HPr) commence à accumuler des AGV à la fin du 1^{er} TSH mais se stabilise ensuite

Accumulation d'AGV dans **R4** (éq. 10 g.L⁻¹ HPr) dès le début de l'introduction de NaPr

Les **AGV** sont largement dégradés dans **R4** durant la période batch

Résultats – pH



R1
[NaPr]=0 g/L
eq. [HPr]=0 g/L



R2
[NaPr]=1,95 g/L
eq. [HPr]=1,5 g/L



R3
[NaPr]=7,78 g/L
eq. [HPr]=6,0 g/L



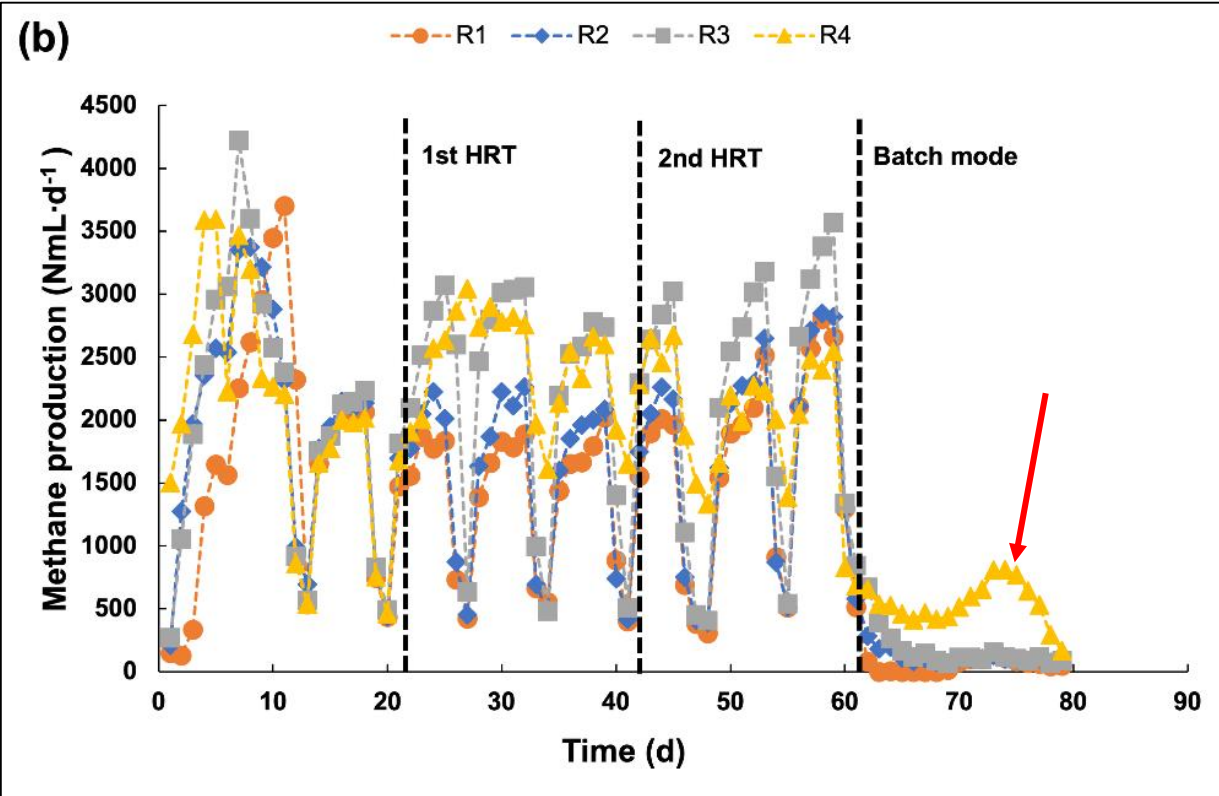
R4
[NaPr]=13,0 g/L
eq. [HPr]=10 g/L

Les teneurs en AGV ne modifient pas énormément les **pH**, qui se stabilisent entre **7,6** et **8,3**

Résultats – production de méthane



R1	R2	R3	R4
[NaPr]=0 g/L	[NaPr]=1,95 g/L	[NaPr]=7,78 g/L	[NaPr]=13,0 g/L
eq. [HPr]=0 g/L	eq. [HPr]=1,5 g/L	eq. [HPr]=6,0 g/L	eq. [HPr]=10 g/L



1^{er} TSH :

- Production de méthane: R3 > R4 > R2 > R1
- R4, malgré une alimentation de la matière organique plus importante, on produit moins de méthane, dû à **l'inhibition par propionate**

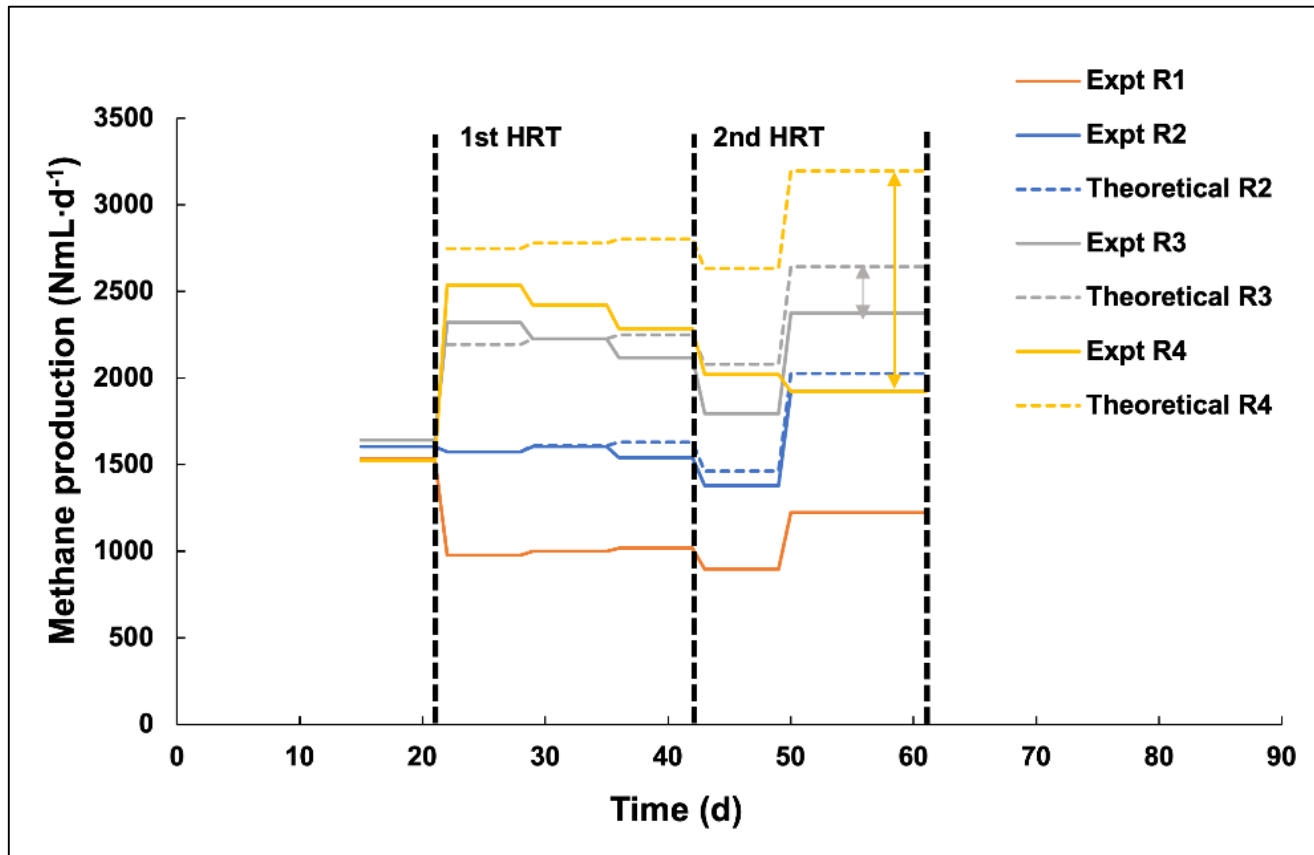
2^e TSH:

- R3 > R2 > R4 ≈ R1

Batch mode (sans alimentation, sans chauffage):

- Les AGV sont digérés, avec un pic notable pour R4 au jour 75

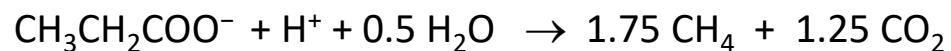
Résultats vs production théorique



Réacteur	Écart entre la production réelle et théorique de CH ₄
R1 (éq 0 g.L ⁻¹ HPr)	Témoin
R2 (éq. 1,5 g.L ⁻¹ HPr)	- 5,0 %
R3 (éq 6 g.L ⁻¹ HPr)	-10,2 %
R4 (éq 10 g.L ⁻¹ HPr)	- 40,0 %

$$Q_{\text{CH}_4 \text{ théorique}} = Q_{\text{CH}_4 \text{ Témoin}} + Q_{\text{CH}_4 \text{ surplus, NaPr}}$$

$$Q_{\text{CH}_4 \text{ surplus, NaPr}} = \dot{m}_{\text{NaPr}} \times 529$$

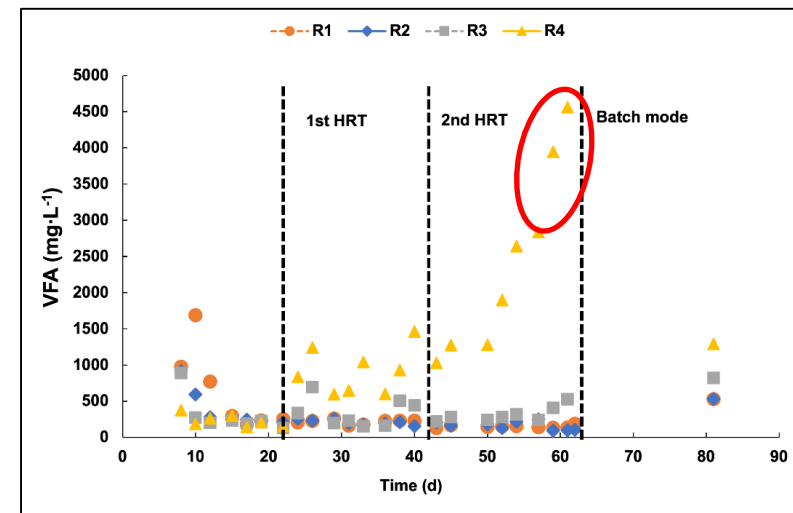
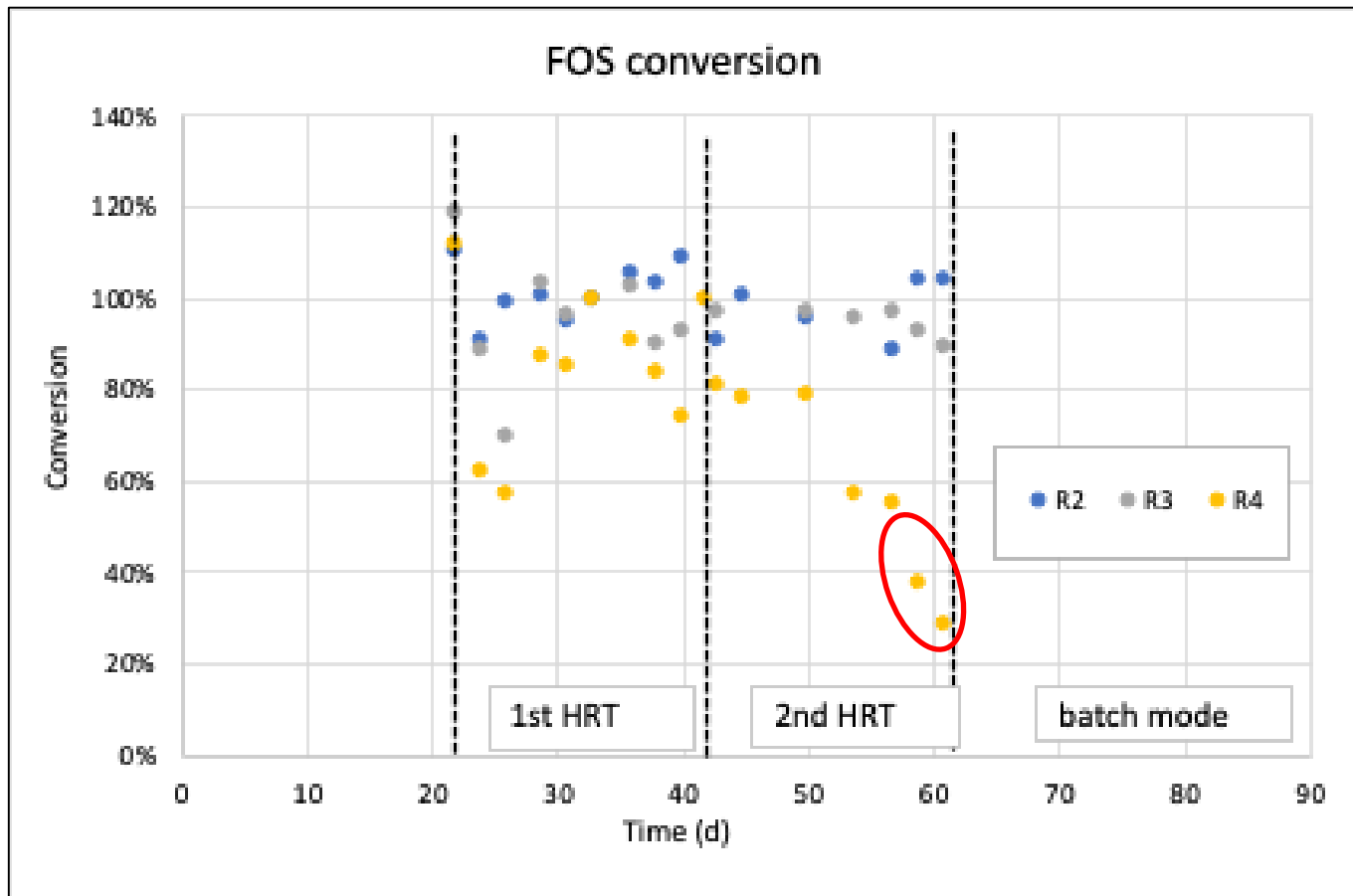


Production stœchiométrique de CH₄ à partir de NaPr

$$529 \text{ NmL CH}_4 \cdot \text{g Pr}^{-1}$$

$$\text{Ecart de production (\%)} = \frac{Q_{\text{CH}_4 \text{ théorique}} - Q_{\text{CH}_4 \text{ expérimental}}}{Q_{\text{CH}_4 \text{ théorique}}}$$

Résultats – conversion des AGV

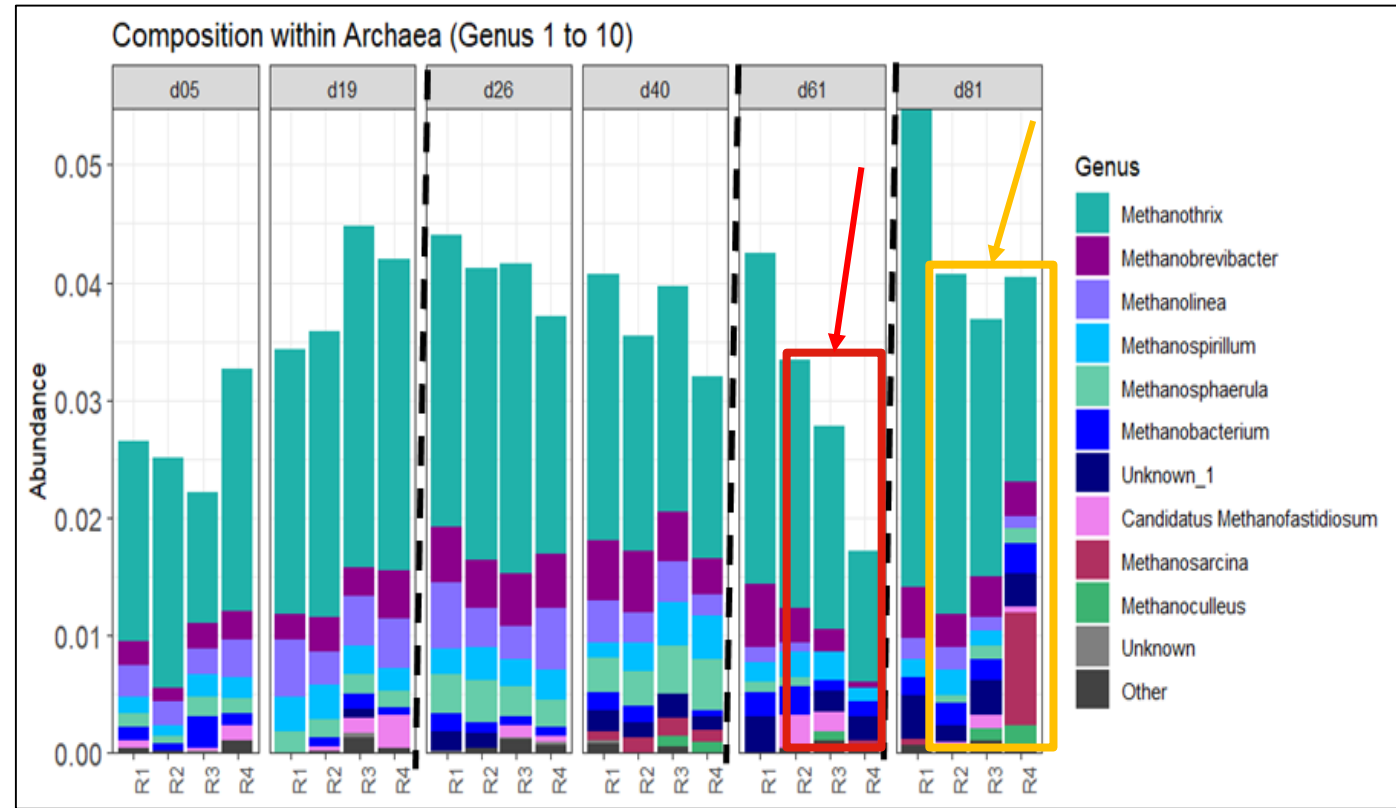
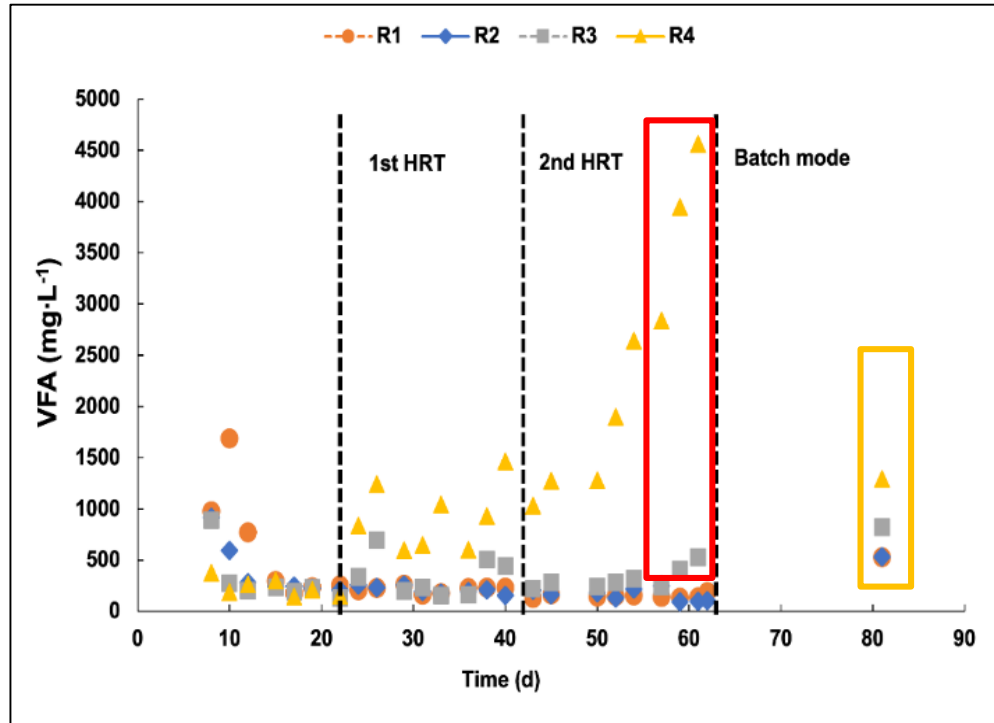


Réacteur	Taux de conversion des AGV (FOS)
R1 (éq 0 g.L ⁻¹ HPr)	Témoin
R2 (éq. 1,5 g.L ⁻¹ HPr)	≈100 %
R3 (éq 6 g.L ⁻¹ HPr)	≈88,0 %
R4 (éq 10 g.L ⁻¹ HPr)	≈24,0 %

Faible taux de conversion AGV de R4 à la fin du 2e TSH, ce qui correspond à un taux d'AGV élevé

$$\text{Taux de conversion (\%)} = \frac{AGV_{\text{introduits}} - AGV_{\text{exp, Ri-R1}}}{AGV_{\text{introduits}}} \times 100$$

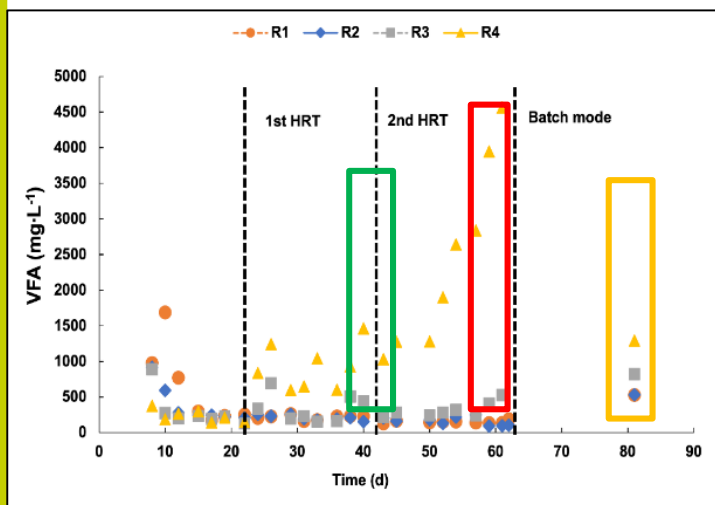
Résultats – communautés microbiennes



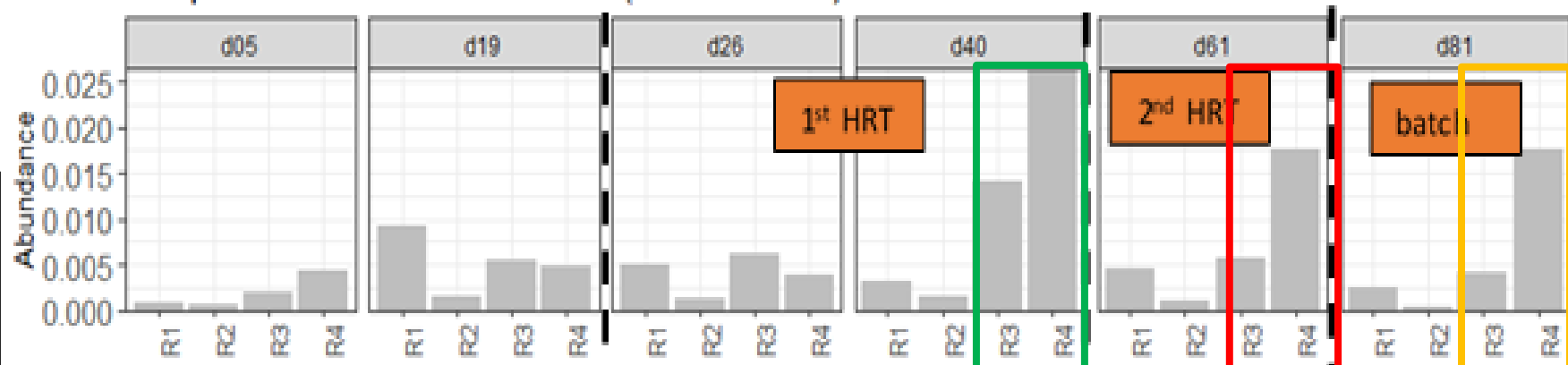
Methanothrix (méthanogènes acétoclastes) dominaient dans tous les réacteurs, suivis de *Methanobrevibacter* (hydrogénotrophes). Diminution de leur abondance à des concentrations élevées d'AGV.

Methanothrix et *Methanobrevibacter* augmentent durant la période batch

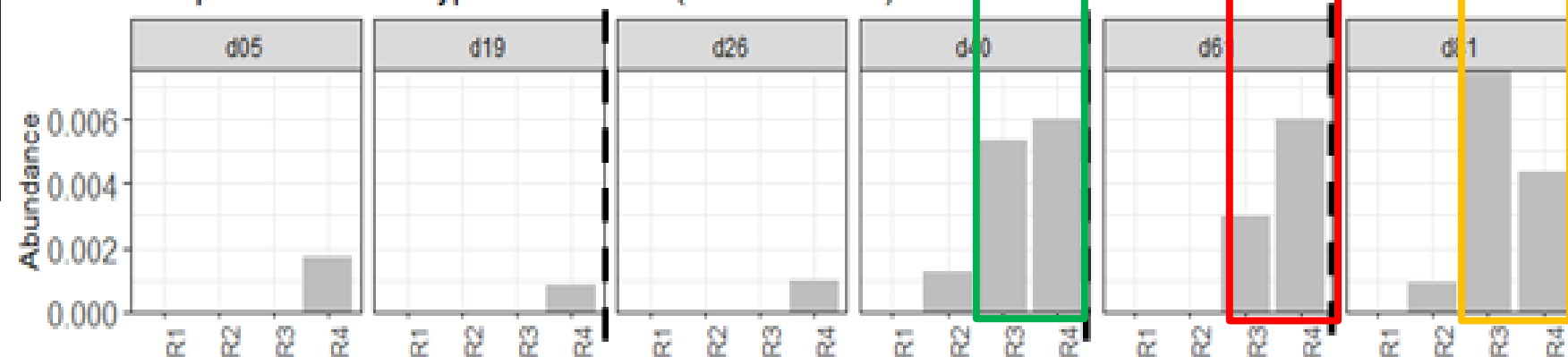
Résultats – communautés microbiennes (suite)



Composition within Pelotomaculum (Genus 1 to 10)



Composition within Cryptanaerobacter (Genus 1 to 10)



Apparition d'autres groupes bactériens (bactéries syntrophiques propionate-oxydantes) lorsque les niveaux d'AGV sont élevés et pendant la période discontinue

Conclusions

- **Aucune inhibition** n'a été observée à des concentrations allant jusqu'à **1,5 g·L⁻¹ éq. HPr**
- **Légère inhibition** à des concentrations allant jusqu'à **6 g·L⁻¹ éq. HPr**
- **Inhibition significative** pour des concentrations de **10 g·L⁻¹ éq. HPr**, réduction de **40 %** du Q_{CH_4}
- Bien que la concentration inhibitrice de HPr dans cette étude ait dépassé les valeurs indiquées dans la littérature (généralement **< 2 g·L⁻¹**), les expériences concordent en batch et en semi-continu
- ***Methanotherix*** et ***Methanobrevibacter***, méthanogènes, ont diminué pour les fortes concentrations en AGV
- **L'émergence d'autres groupes microbiens**, tels que *Pelotomaculum* et *Cryptanaerobacter*, nécessite des études complémentaires

Merci pour votre attention



Merci à tous les partenaires du projet et plus spécifiquement à John Cockerill et Sources ainsi qu'au Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) pour le financement de thèse de Joel Agumah

TRAITEMENT DE L'H₂S DANS LE BIOGAZ SANS NÉCESSITÉ D'O₂ VIA LAVEUR PAR LIQUIDE CATALYTIQUE



M. BRISAUD^{1,*}, Z. BARNEA², M. SAID², B. GUILLOT³, M. MZOUGH³, J. ESTIENNE, V. BOUCHER³, N. HOURIZADEH¹

¹.CH₄PROCESS – 61 rue Albert Dhalenne, 93400 SAINT OUEN, France.

².CLAIRION - Ha Aluf Yakov Peri 1 Beit Shira Rehovot 7639304 Israel.

³. NATRAN R&I, 1-3 rue du commandant D'Estienne d'Orves, 92390 Villeneuve-la-Garenne, France

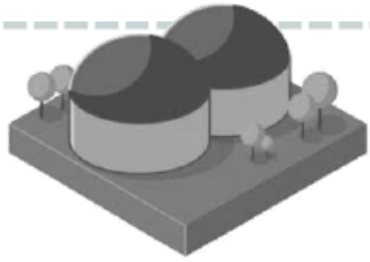
REVICO, 2 Rue des Fossés de Jarnouzeau, 16100 Saint-Laurent-de-Cognac, France



La problématique O₂ dans les réseaux gaziers

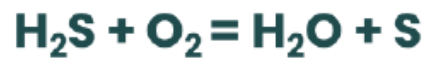
Situation actuelle

Origine et remontée de l'O₂ sur le réseau



Apparition d'O₂ dans le process de production du biométhane :

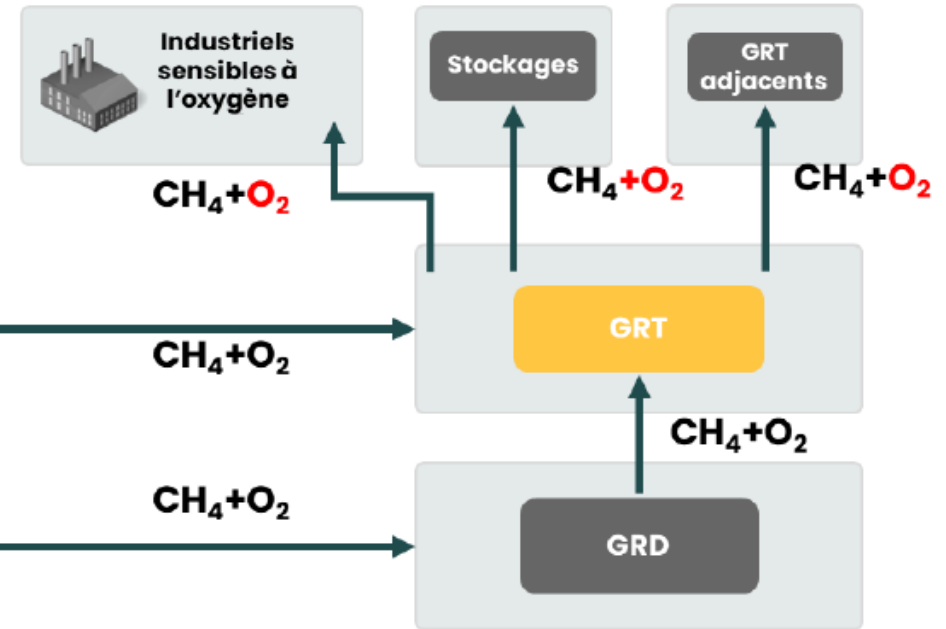
Ajout d'O₂ pour abattre l'H₂S (désulfuration) :



En sortie de méthaniseur :



L'O₂ remonte sur le réseau, jusqu'à certaines interfaces (stockages, GRT adjacents)...



... qui sont sensibles à l'O₂.

Seuil de sensibilité variant de 10 à 1000ppm

Un programme de R&D partagé au sein d'un GT O₂ inter-opérateurs

Deux façons de réduire le taux d'O₂

H₂S **1 – Désulfurer de manière alternative**
Éviter l'injection d'O₂ côté producteur

Actuellement : oxydation biologique

Méthode alternative :

Solutions en développement, avec l'appui de NaTran R&I :

- Lavage**
- Sels ferriques**
- Régulation automatique**
- Optimisation des process producteurs**

O₂ **2 – Désoxygéner le biométhane**
Éliminer l'O₂ injecté en divers points du réseau

Désoxygéner le gaz avant qu'il n'atteigne les interfaces sensibles :

Solution disponible/en développement :

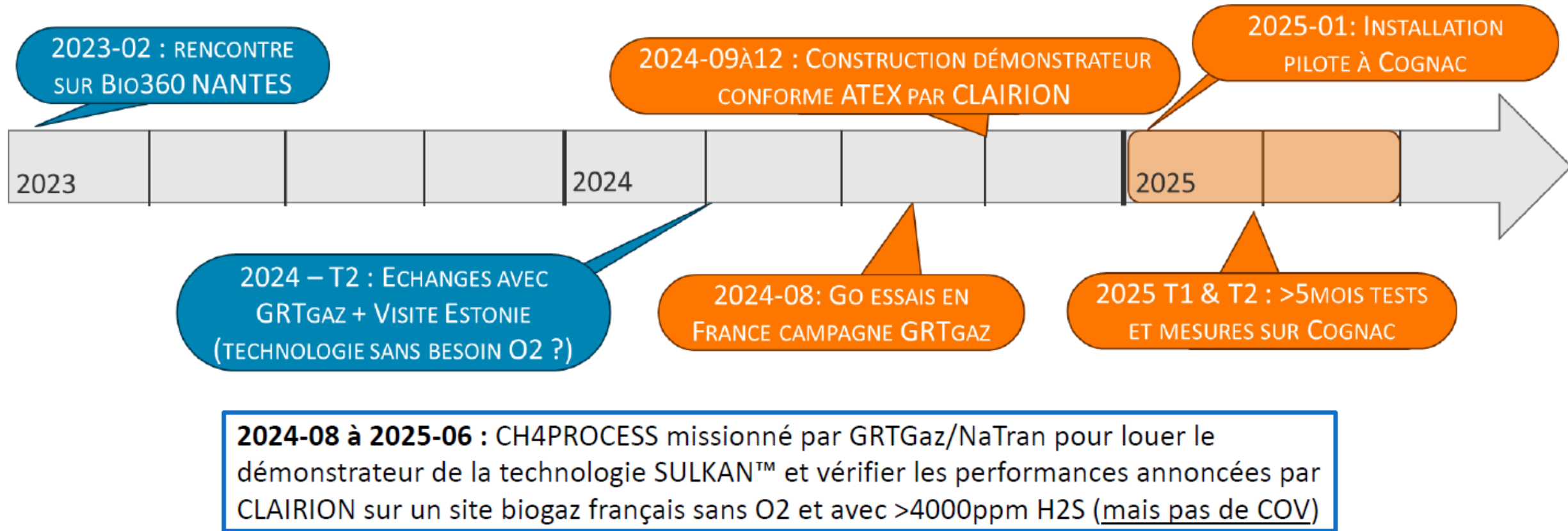
Désoxygénation catalytique



Mission de vérification des performances

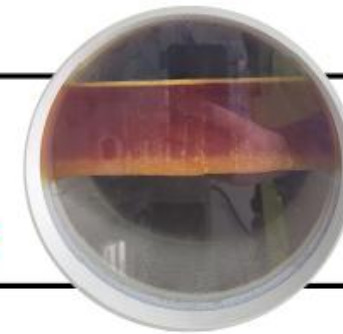


Chronologie



Test de la solution CLAIRION – SULKAN™
 Campagne NaTran sur un site sans injection O2 dans les ciels gazeux

=> **Les performances annoncées sont-elles réelles et possibles sur applications biogaz ?**



Brochure commerciale
CLAIRION



Clairion's SULKAN™ combined biogas treatment system offers a **one stage solution** for removing H₂S and Siloxanes

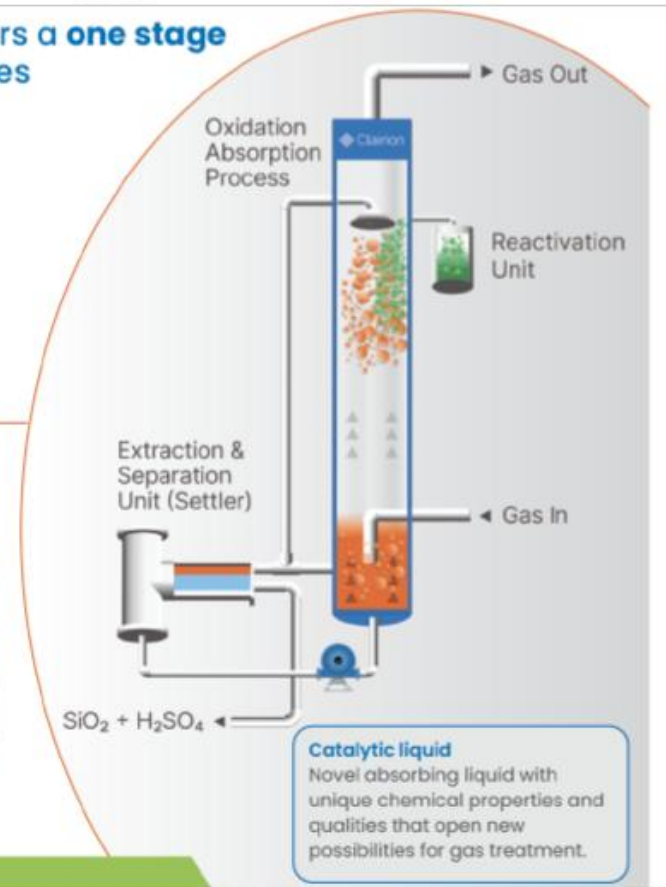
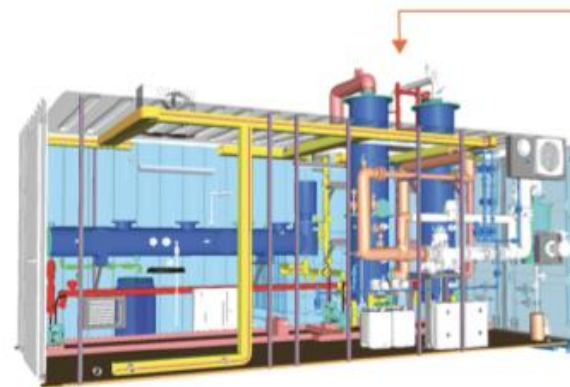
The System

The SULKAN™ system uses a disruptive biogas cleaning technology, based on a proprietary Catalytic Liquid platform and a dedicated designed wet scrubbing mechanism. Within the scrubber H₂S & Siloxane compounds are absorbed, converted, and further separated from the biogas using an extraction and separation unit.

The standard systems range cover flow rates up to 5,500 Nm³/h, while systems for higher flow rates are tailor made.

H₂S removal
 from 5,000 ppm to below 5 ppm

Siloxanes removal
 from 200 mg/m³ to below 1 mg/m³

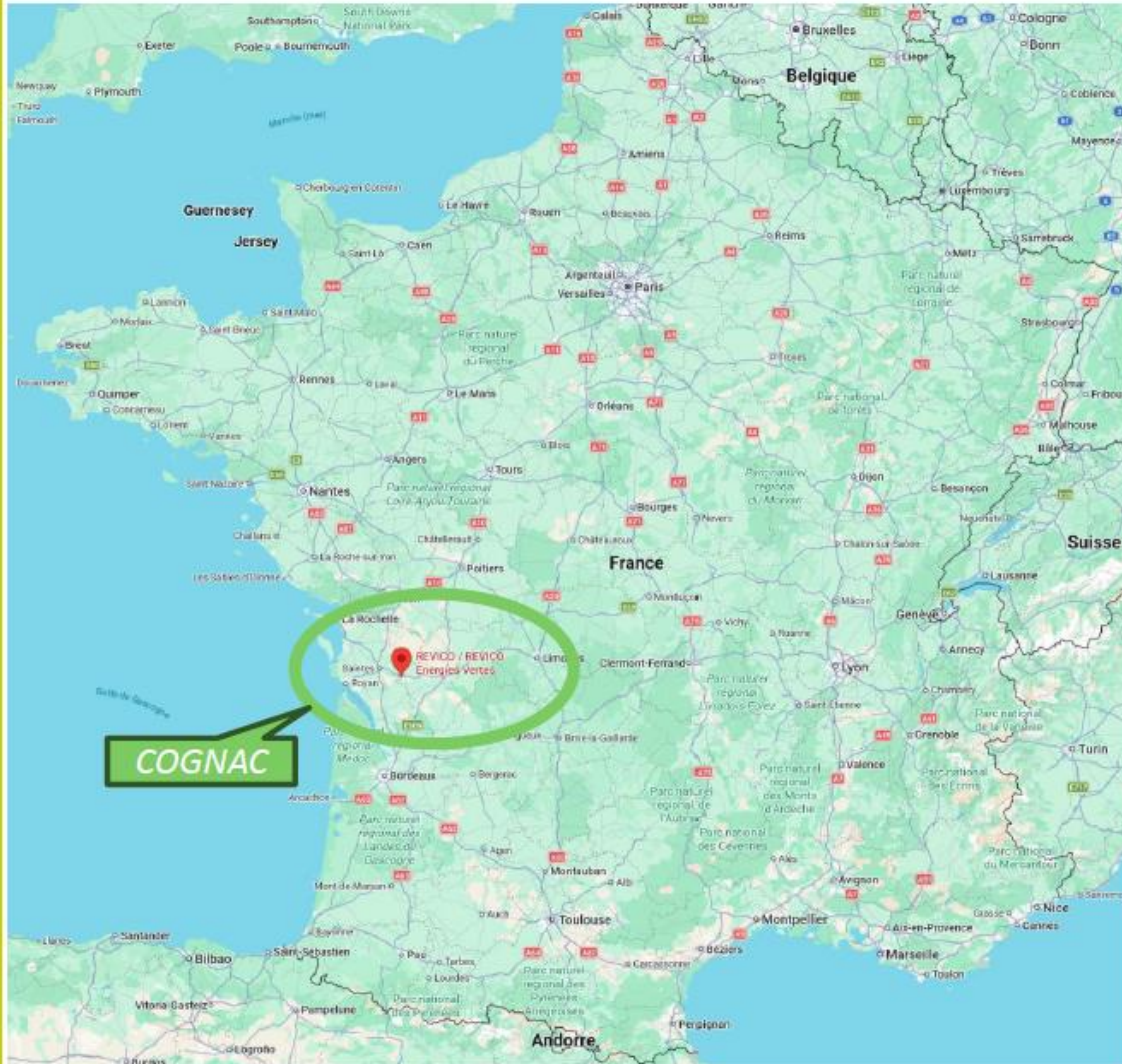




- Où trouver un site avec d'importantes teneurs en H₂S qui n'injecte pas d'air ou d'O₂ dans ses ciels gazeux pour des essais sur plusieurs mois ?!

(et qui serait prêt à accueillir un pilote de démonstration...)

Site de REVICO



Traitement actuel du biogaz sur REVICO

- Méthanisation des vinasses du cognac. Production de biogaz depuis 1986.
- Tours de lavage à la soude avec système intégré de séchage
 - ⇒ Abattement de 4000-5000ppm à 200ppm de H₂S
 - ⇒ Consommation de NaOH proportionnelle à la quantité d'H₂S à traiter
- Injection d'air au niveau des tours de lavage pour permettre un mélange et une concentration suffisante en O₂ pour le traitement de finition par charbons actifs
 - ⇒ pas d'injection d'air dans les ciels gazeux des digesteurs (toits rigides acier)
- Cuves mobiles de charbons actifs
 - ⇒ Abattement jusqu'à 0ppm H₂S et COV
- Valorisation en chaudières et moteurs





Résumé de la campagne de vérification des performances

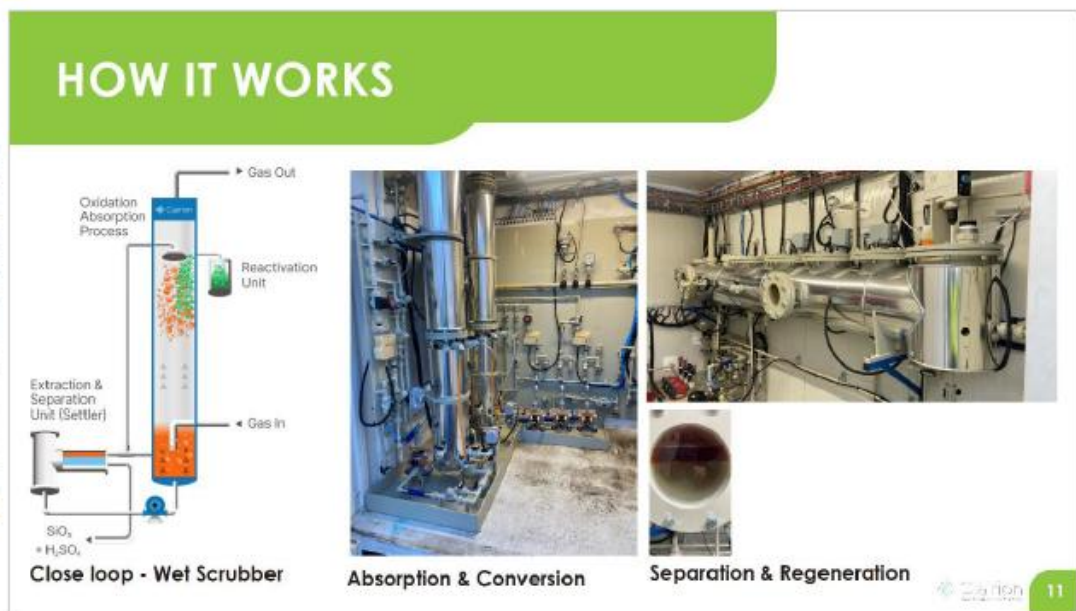
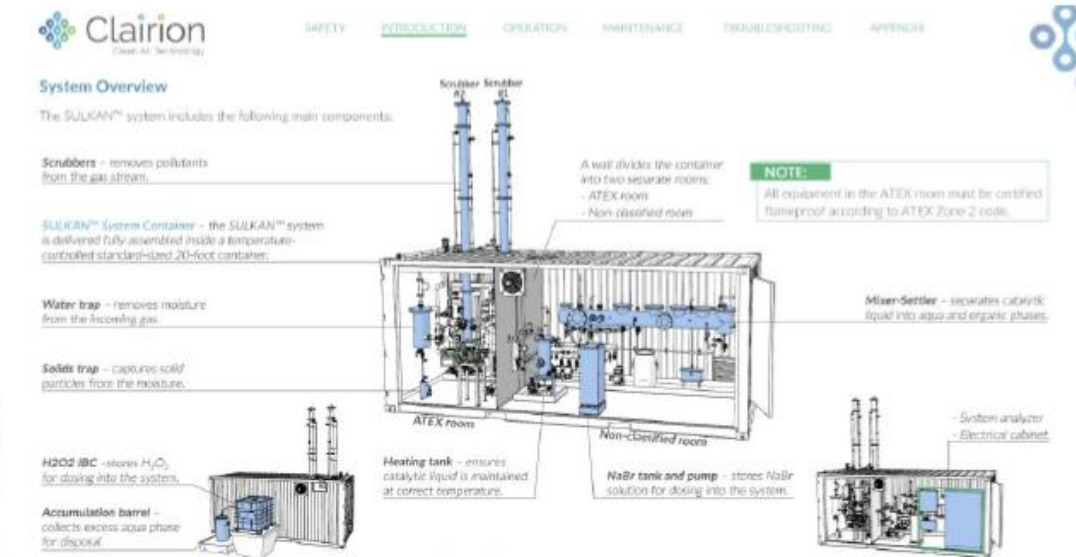


Descriptif rapide du container laveur « SULKAN » testé à Cognac

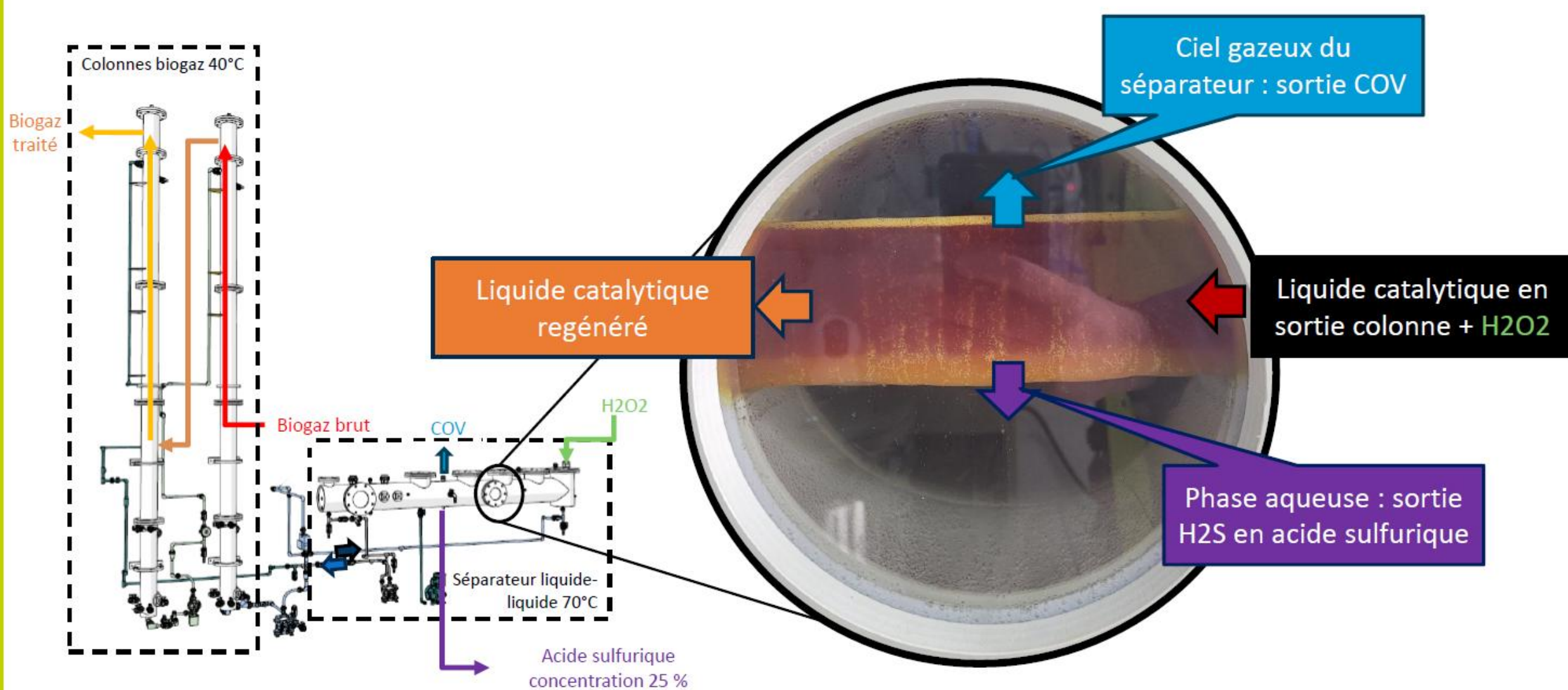
Vérification de l'abattement de l'H₂S sur un biogaz brut (10-20m³/h) contenant entre 4000 et 5000ppm d'H₂S

=> teneur en O₂ dans le biogaz brut :100-150ppm

(aucune injection, O₂ provient des flux entrants)



Cycle de régénération du liquide de lavage



Importance de la sécurité (produits chimiques & ATEX)



Suivi qualité biogaz (enjeux H2S et O2)

Analyseur automatique SWG100
MRU (continue) :
Voie 1 : biogaz brut
Voie 2 : sortie colonne 1
Voie 3 : sortie colonne 2



Mesures biogaz brut
avec analyseur portatif
(exploitant)



μ GC sur site par EXPLORAIR (une
journée) :
Contrôle au ppm près des
concentrations IN et OUT



μ GC en laboratoire par
EXPLORAIR (via échantillons
poches Tedlar biogaz
IN/OUT/EVENT)

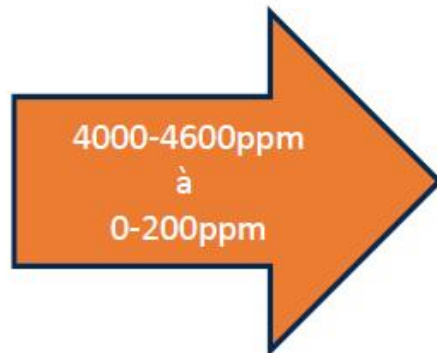


Mesures biogaz lavé
avec analyseur portatif
(exploitant)



MERCI AUX EQUIPES DE REVICO !!

Performances et consommations H2O2 confirmées lors des essais (H2S et O2)



Intéressant à partir de 15kgS/j



Σ COV : <10mg/m3 dans le biogaz brut sur ce site. Performances non confirmées

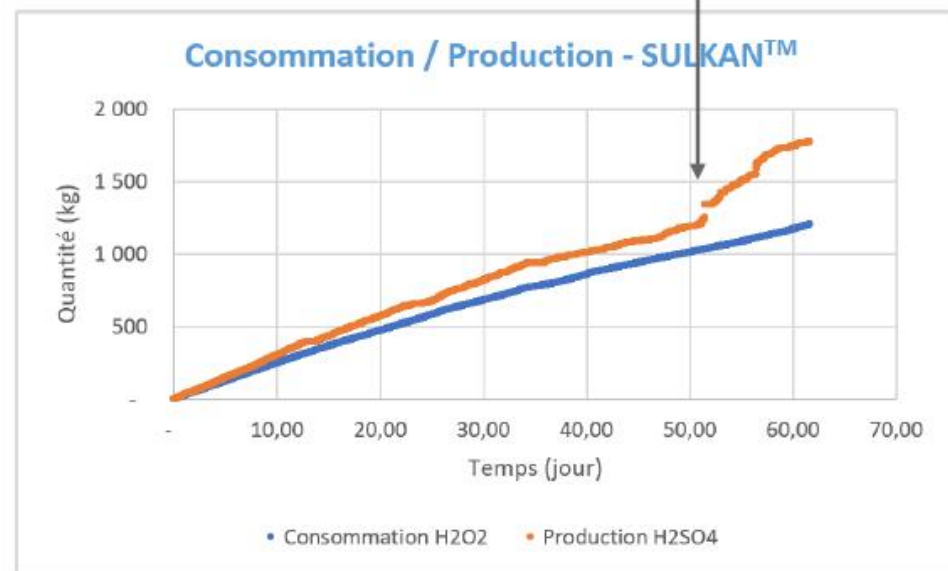
Bilan sur les 76 jours de fonctionnement représentatif



**Taux moyen d'abattement
H₂S : >98%**

Débit biogaz moyen:
11,5 Nm³/h

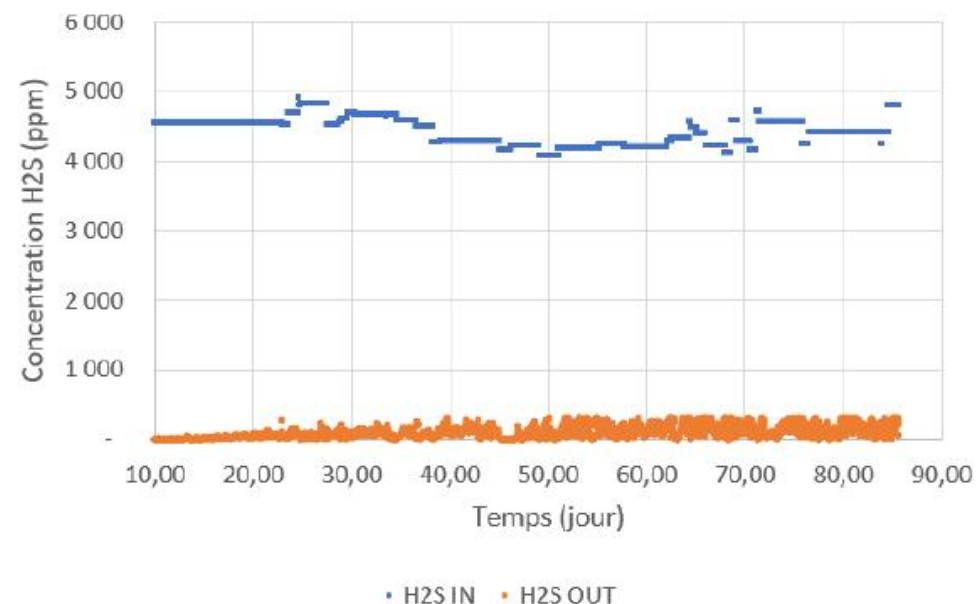
Essais complémentaires CLAIRION
(dont φ [NaBr])



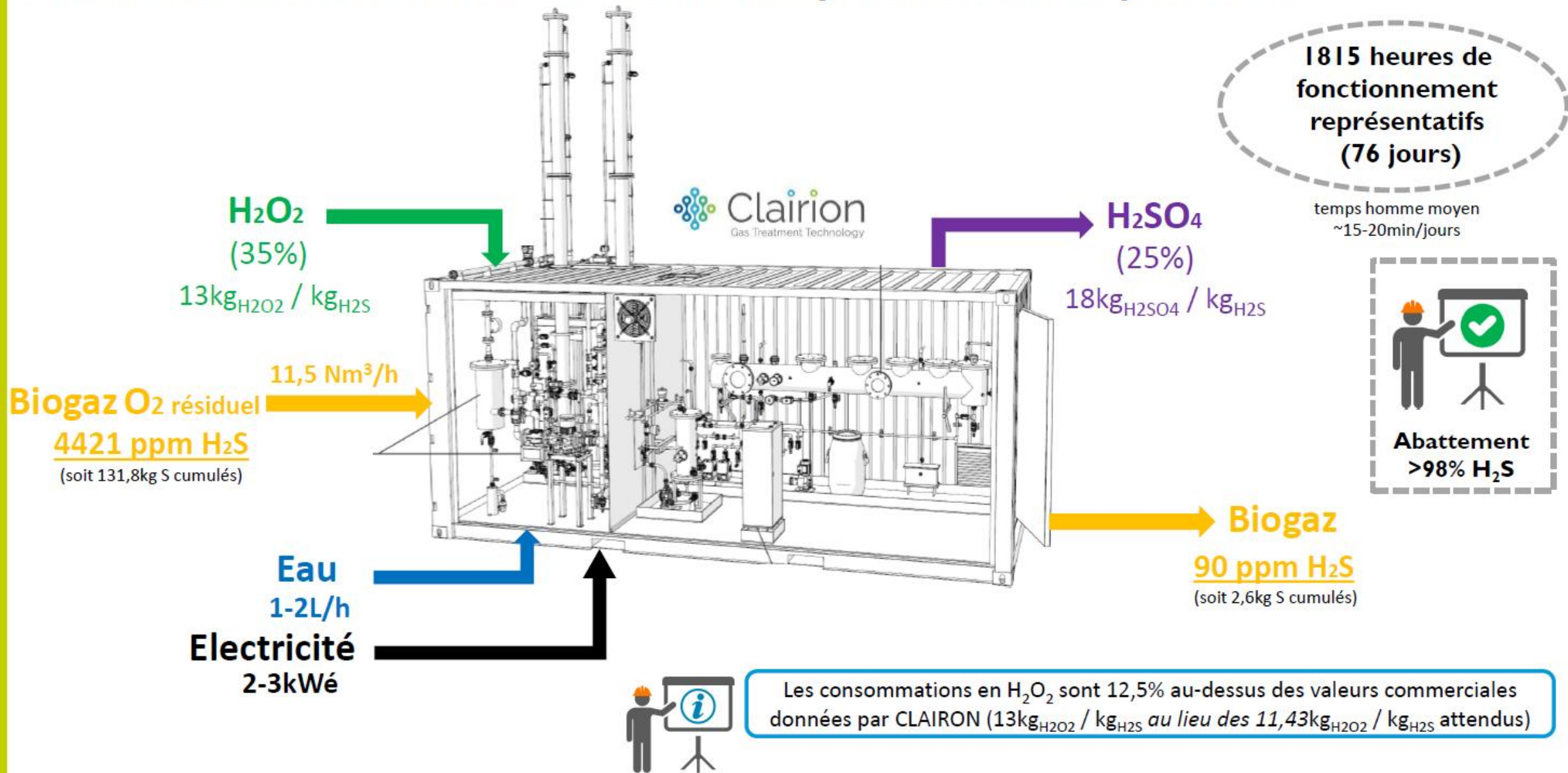
Consommation H₂O₂ :
**11,7 kg H₂O₂/kg H₂S traité
(20,7 litres/jour)**

Production H₂SO₄:
**18 kg H₂SO₄/kg H₂S traité
(26,6 litres/jour)**

Concentration H₂S Inlet/Outlet - SULKAN™

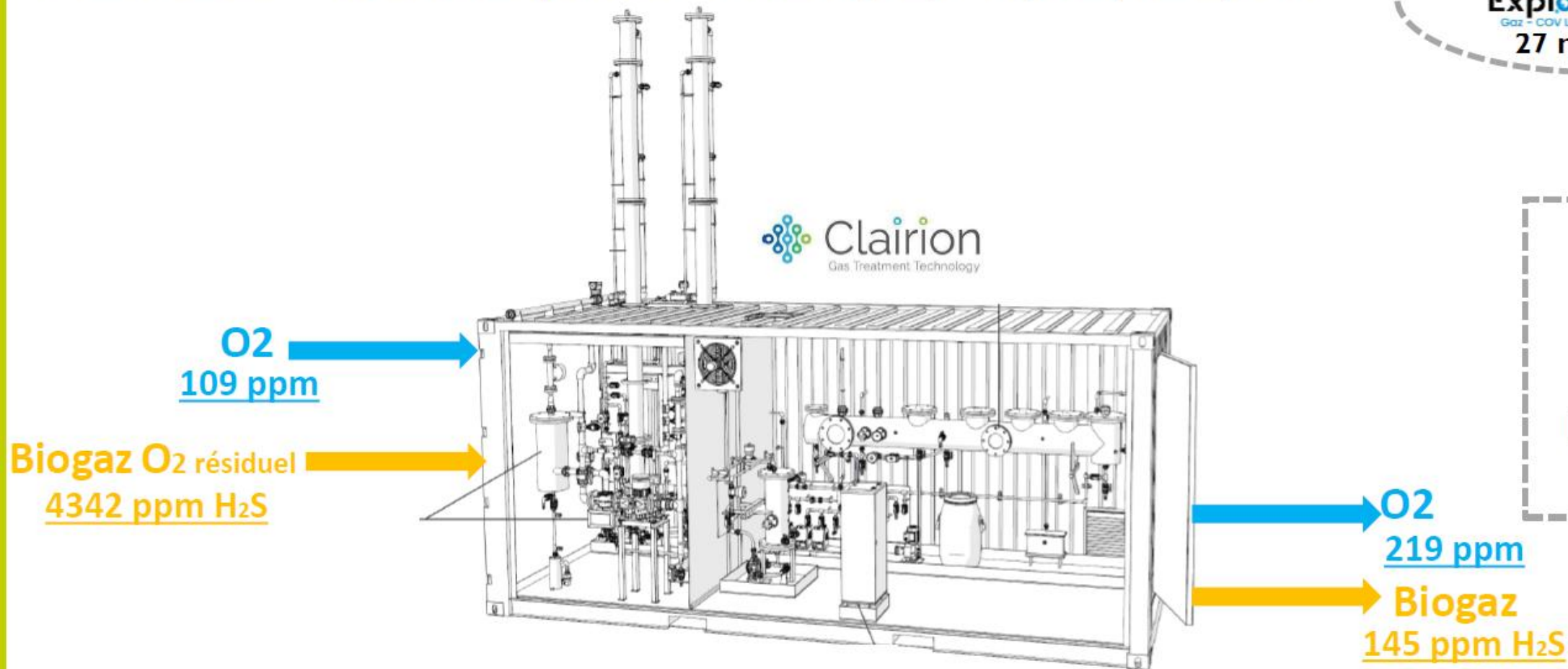


Bilan abattement H₂S – valeurs moyennes sur la période



Focus O2 – mesure par chromatographe μ GC/TCD/MS

Mesures effectuées par
ExplorAir le
Gaz - COV Lab
27 mai 2025



Le process ne consomme pas d' O_2 et il n'augmente qu'entre 100 et 150ppm la teneur en O_2 dans le biogaz traité

Une meilleure régulation de l'injection H_2O_2 peut aider à réduire encore cette valeur.



Résumé des performances

• Traitement H₂S :

Réactions chimiques sans ajout ou nécessité O₂

⇒ Consommation H₂O₂

➤ 4kg par kg H₂S traité

soit 8kg_{H₂O₂} / kg_{H₂S} si H₂O₂ à 50%

ou 11,43kg_{H₂O₂} / kg_{H₂S} si H₂O₂ à 35%

⇒ Production H₂SO₄ entre 20 et 30%

➤ de 15 à 20 kg par kg H₂S traité (18 en moyenne)

Plus stable si toujours à 25% avec mesure automatique ?

➤ Qualité compatible avec plan d'épandage ou autoconso

Les consommations électriques ne sont pas proportionnelles aux débits traités ! (<10kWé)

Les consommations thermiques dépendent des température et humidité du biogaz brut

Temps moyens passés en contrôle et suivi : 15min sur jours ouvrés (contrôles chimiques automatisables)

Pertes de charges limitées à 30mbars



• Traitement Composés Organo-Volatils (COV)

processus physique non vérifié pendant la campagne

⇒ Absorption à 40°C puis désorption à 70°C

➤ augmentation consommation électrique de l'ordre <5kWé

➤ campagne complémentaire à réaliser car pas de COV dans le biogaz du site pilote !

ENTRE 4 ET 5 €/KGS
(charbons actifs entre 8 et 12€/kgS)

>2x moins cher en OPEX
mais CAPEX plus élevé !

- A Si le débit augmente, le diamètre des colonnes augmente
- B Si la concentration en H₂S augmente, la hauteur des colonnes augmente
- C Avec ou sans nécessité de traiter les COVs, le liquide catalytique passe par une phase à 70°C pour être régénéré



Perspectives et développements envisagés



Industrialisation de la solution et fabrication en France






Depuis juillet 2025, CH4PROCESS est le distributeur exclusif de la technologie en France avec pour conditions :

- ☑ Fabrication en France dans ses ateliers rémois
- ☑ Programmation et accès à l'automate pour faciliter le SAV et le support distant
- ☑ Support CLAIRION pour les mises en service et la fourniture du liquide catalytique

- Solution pour les sites avec plus de **15-20kgS à traiter par jour**
 - ⇒ installation en container 20 pieds, tuyauteries et tour en PP
- Essais en cours sur ISDND
 - ⇒ Performances sur abattement COV
 - ⇒ Alternatives ou compléments aux charbons actifs
 - ⇒ Interfaces avec le traitement lixiviats ?
- Fabrication **conforme CE** bénéficiant du retour d'expérience de CH4PROCESS sur la fabrication de machines spéciales, dont tours de lavage pour biogaz

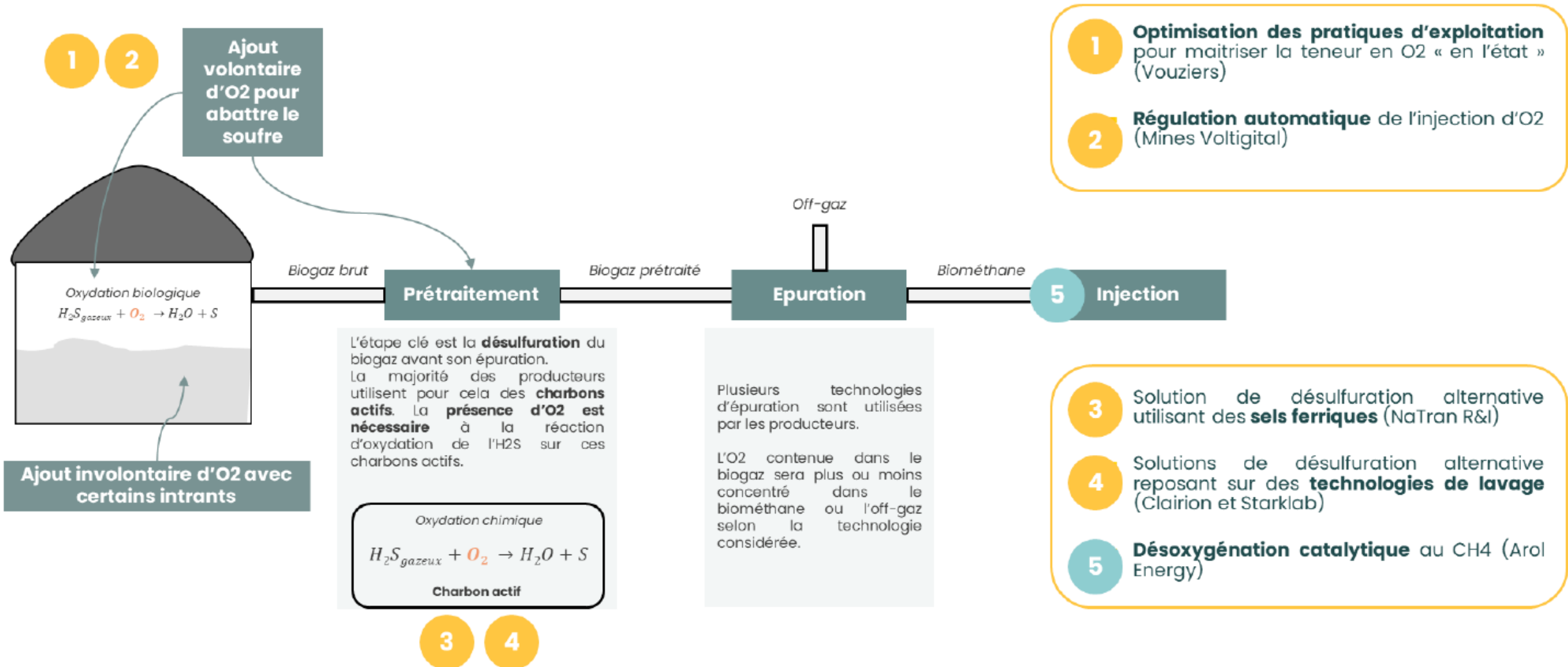
⇒ Atelier à Reims



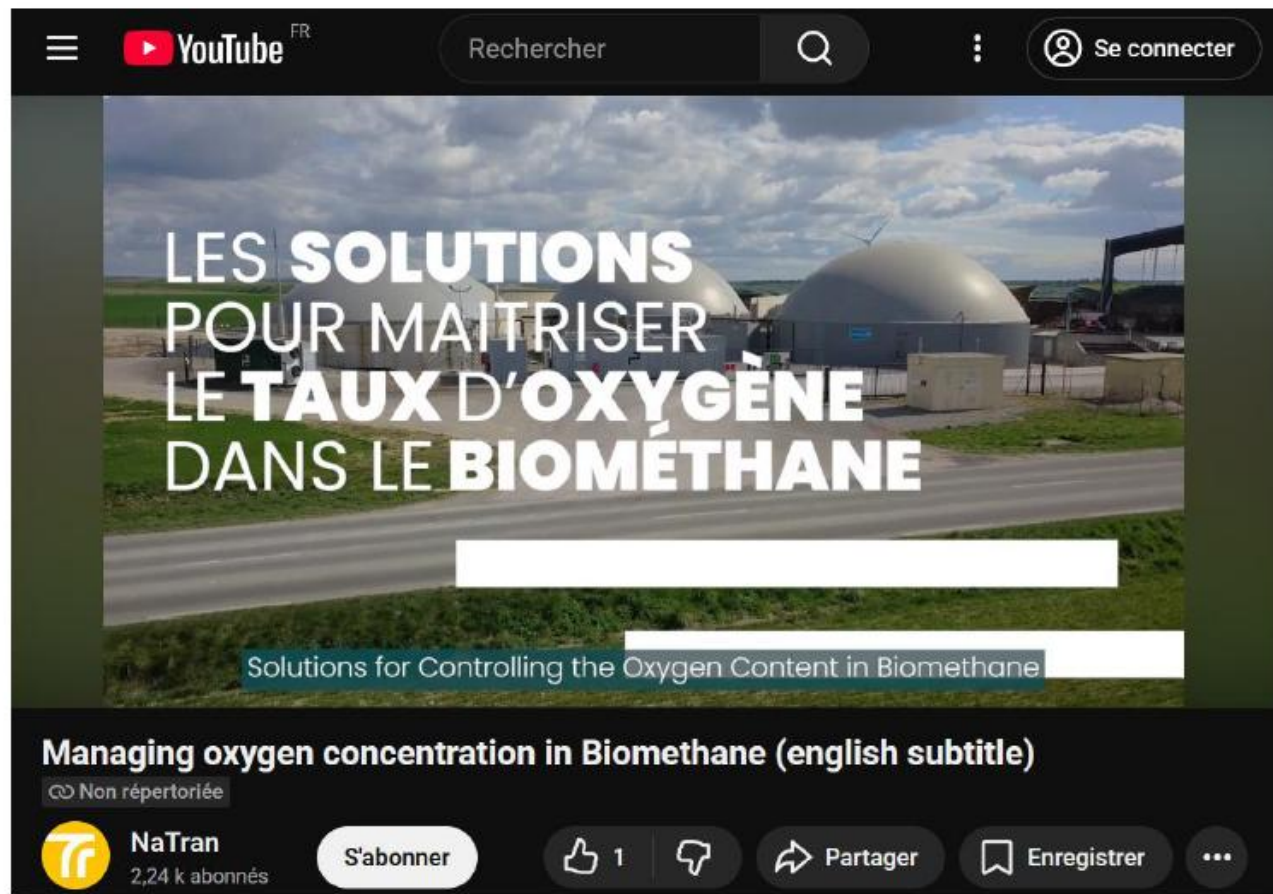
Maitrise de la solution selon les types de sites biogaz		Abattement H2S sans O2	Conso H2O2	Abattement COV	Qualité acides H2SO4	Intérêt économique
 <p>Site de Agrifyl's Energy Commune de Chaumont (Haut-Marne)</p>	<p>► AGRICOLE AUTONOME</p> <ul style="list-style-type: none"> porté par un ou plusieurs exploitants agricoles ou par une structure agricole méthanisant plus de 90% des matières agricoles issues des exploitations agricoles 	✓	✓	?	✓ <i>Plan d'épandage</i>	✗
 <p>Site de Valois Energie Commune de Senlis (Oise)</p>	<p>► AGRICOLE TERRITORIAL</p> <ul style="list-style-type: none"> porté par un agriculteur, un collectif d'agriculteurs ou par une structure agricole méthanisant plus de 50% (en masse) de matières issues de la ou des exploitations agricoles intégrant des déchets du territoire (industrie, STEP, autres...) 	✓	✓	?	✓ <i>Plan d'épandage</i>	? <i>Si >20kgS/jour</i>
 <p>Site de Bioloie Commune des Essarts en Bocage (Vendée)</p>	<p>► INDUSTRIEL TERRITORIAL</p> <ul style="list-style-type: none"> porté par un développeur de projet ou par un ou plusieurs industriels intégrant des déchets du territoire (industrie, STEP, autres) méthanisant des matières issues ou non d'exploitations agricoles 	✓	✓	?	✓ <i>Plan d'épandage</i>	✓ <i>Si >20kgS/jour</i>
 <p>Site de Grange David Commune de Tours et La Riche (Indre-et-Loire)</p>	<p>► BOUES DE STATIONS D'ÉPURATION (STEP)</p> <ul style="list-style-type: none"> installations de méthanisation associées à un processus de traitement des eaux usées urbaines ou industrielles 	✓	✓	?	✓ <i>STEP aval</i>	✓ <i>Si >20kgS/jour</i>
 <p>Site ISDND St-Maximin Commune de Saint-Maximin (Oise)</p>	<p>► INSTALLATION DE STOCKAGE DES DÉCHETS NON DANGEREUX (ISDND)</p> <ul style="list-style-type: none"> les ISDND éliminent les déchets non dangereux qui ne peuvent être valorisés par ailleurs captage du méthane produit par la décomposition des déchets 	✓	✓	?	? <i>Traitement lixiviats?</i>	✓ <i>Si >20kgS/jour</i>

Conclusion et autres essais

Positionnement des solutions étudiées



Plus d'informations sur la campagne de vérification des performances du laveur CLAIRION et sur les autres essais de technologies soutenus par NaTran



<https://www.youtube.com/watch?v=1HIYyXOspPQ>

(vidéo non référencée!)



Toulouse Biotechnology Institute
Bio & Chemical Engineering



Etude financée par le programme OPENLAB du groupe INSA

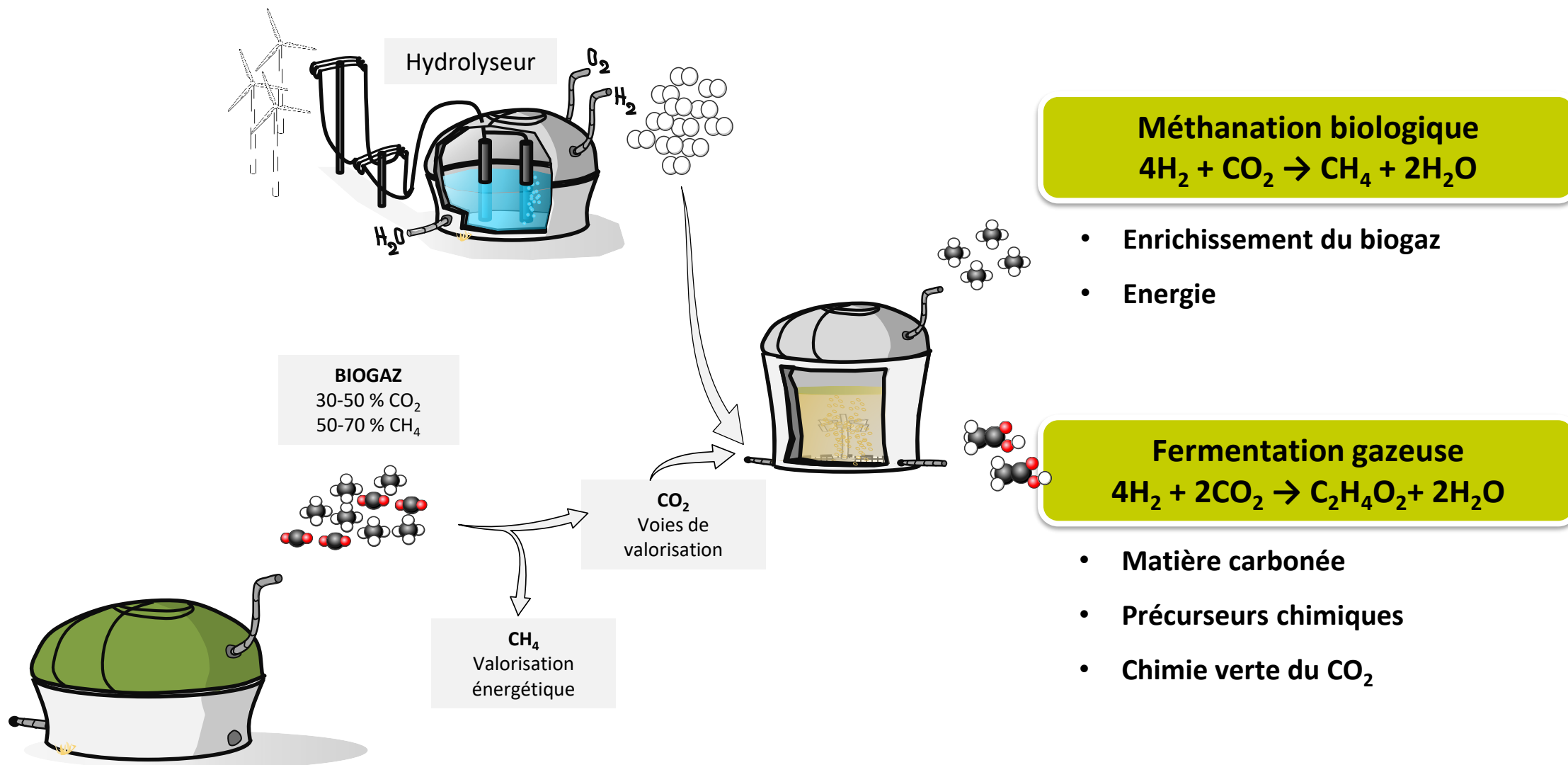
Optimisation de la méthanation biologique : effet de la source de soufre sur les activités biologiques de consortia alimentés en H_2/CO_2

M. Grad, L. Charewicz, L. Laguillaumie, C. Dumas

TBI, Université de Toulouse, CNRS, INRAE, INSA, Toulouse, France



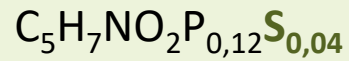
Valorisation du CO₂ contenu dans le biogaz



Effet de différentes sources de soufre sur les activités biologiques ?

Besoins pour la croissance ?

Formule brute admise d'une cellule microbienne



Ratio molaire C/S = 125

Effet sur le pouvoir redox du milieu ?

Na₂S : -400

Cys-HCl : -400 à -370 mV

Na₂SO₄ : > -300

Besoin pour le métabolisme énergétique ?

sulfoxydants

sulfato-réducteurs

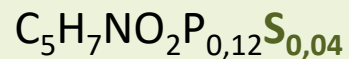
Quelles conséquences sur les compétitions microbiennes ?

Et sur la gestion du procédé ?

Effet de différentes sources de soufre sur les activités biologiques ?

Besoins pour la croissance ?

Formule brute admise d'une cellule microbienne



Ratio molaire C/S = 125

Élément important chez les microorganismes autotrophes anaérobies

- Clusters Fe-S
- Fonctions thiol et ponts S-S

Peu de méthanogènes utilisent les sulfates

La plupart utilisent HS⁻

La Cystéine peut-être utilisée par la plupart pour la production de HS⁻

La méthionine n'est pas utilisée

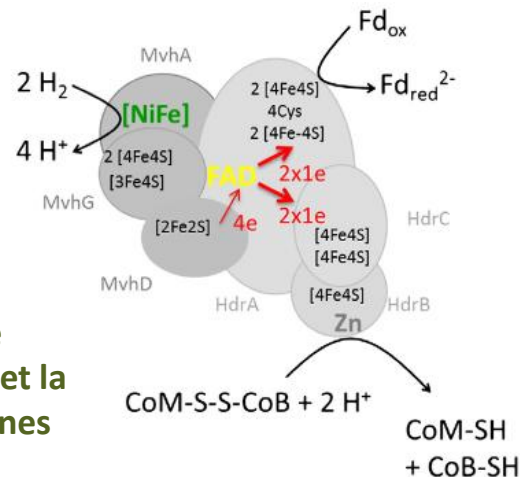
Les acétogènes sont très versatiles

La cystéine a un effet bénéfique sur les performances de *C. thermoaceticum*
Koesnandar et al., 1990

Methanothermococcus thermolithotrophicus

Methanobrevibacter ruminantium
Liu et al., 2012

Enzyme clé dans la production de méthane
Methanothermobacter et la plupart des méthanogènes
Buckel et Thauer 2013



Effet de différentes sources de soufre sur les activités biologiques ?

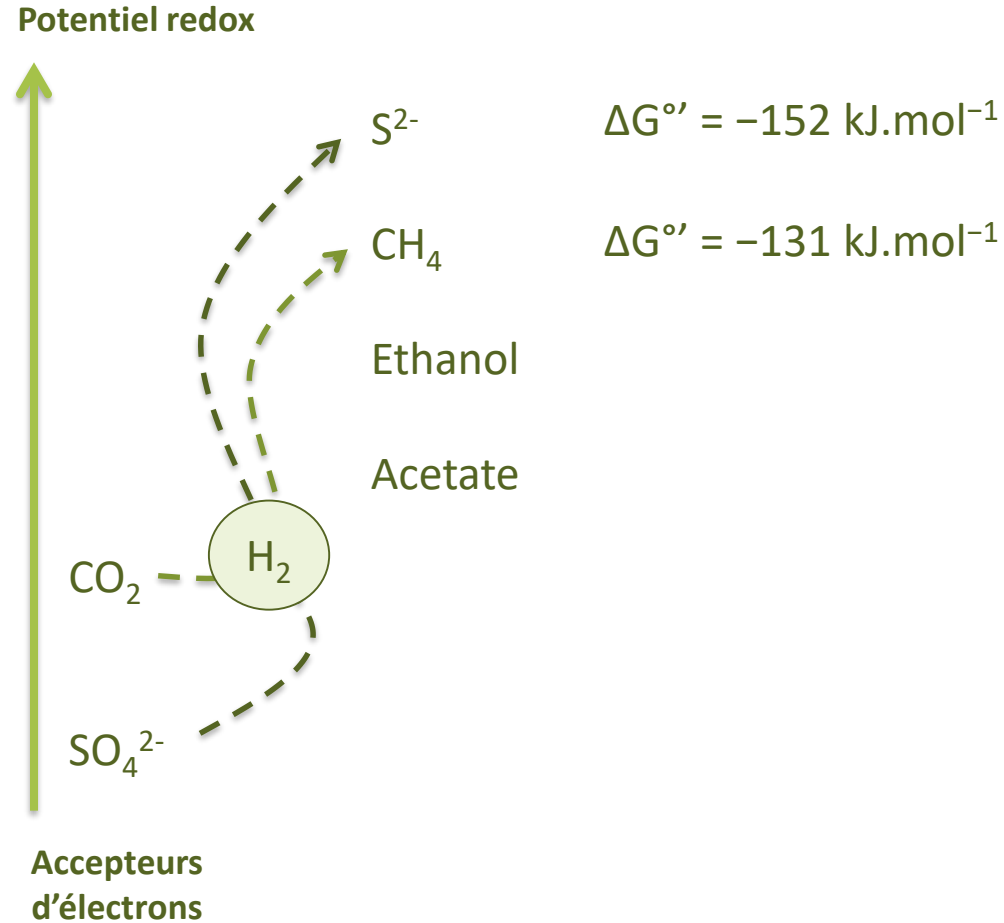
Effet sur le pouvoir redox du milieu ?

Na_2S : < -400
Cys-HCl : -400 à -300 mV
 Na_2SO_4 : > -300

Koesnandar et al., 1990
Khanal et Huang, 2003
Jee et Nishio, 1987

Différent accepteur d'électrons en fonction du pouvoir redox du milieu

Lever, 2012



Effet de différentes sources de soufre sur les activités biologiques ?

Effet sur le pouvoir redox du milieu ?

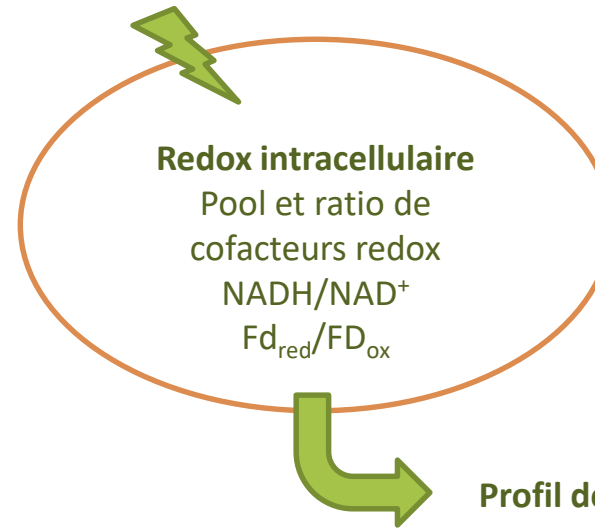
Na_2S : < -400
Cys-HCl : -400 à -300 mV
 Na_2SO_4 : > -300

Koesnandar et al., 1990
Khanal et Huang, 2003
Jee et Nishio, 1987

Différent accepteur d'électrons en fonction du pouvoir redox du milieu

Lever, 2012

Redox extracellulaire



Profil de produits

Composés réduits si stress oxydatif
Grimalt alemany et al., 2021

Effet de différentes sources de soufre sur les activités biologiques ?

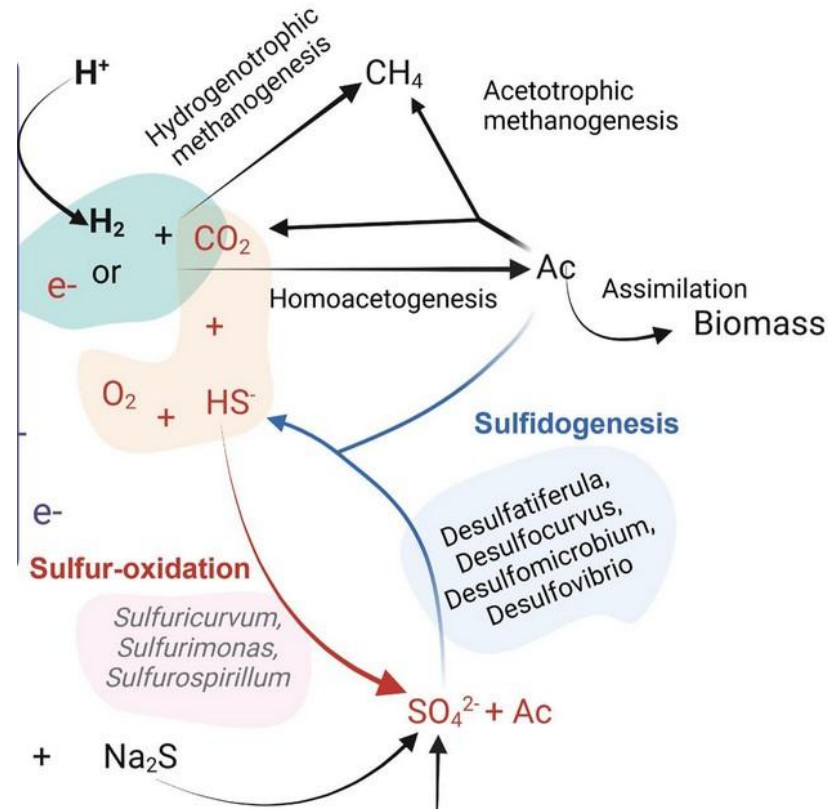
Besoin pour le métabolisme énergétique ?

sulfoxydants

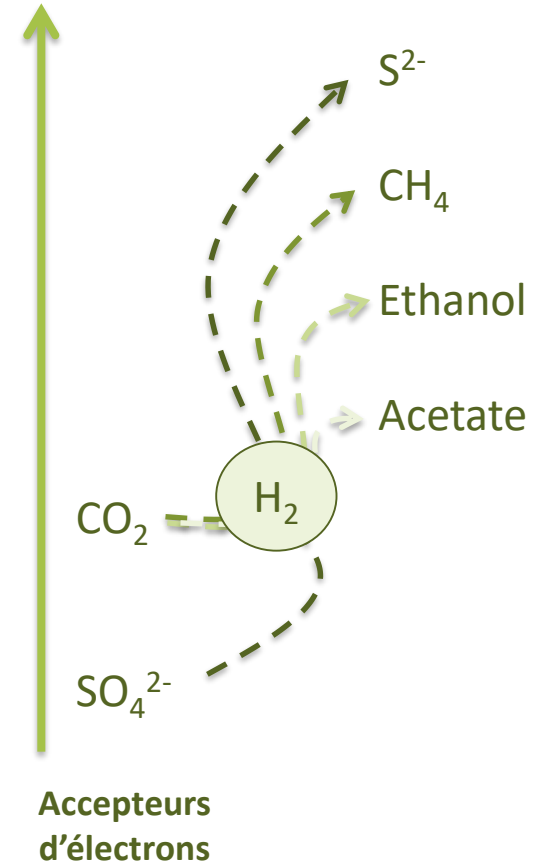
sulfato-réducteurs

Puits d'électrons (H₂)

Mais peuvent être bénéfiques en cas de syntrophie

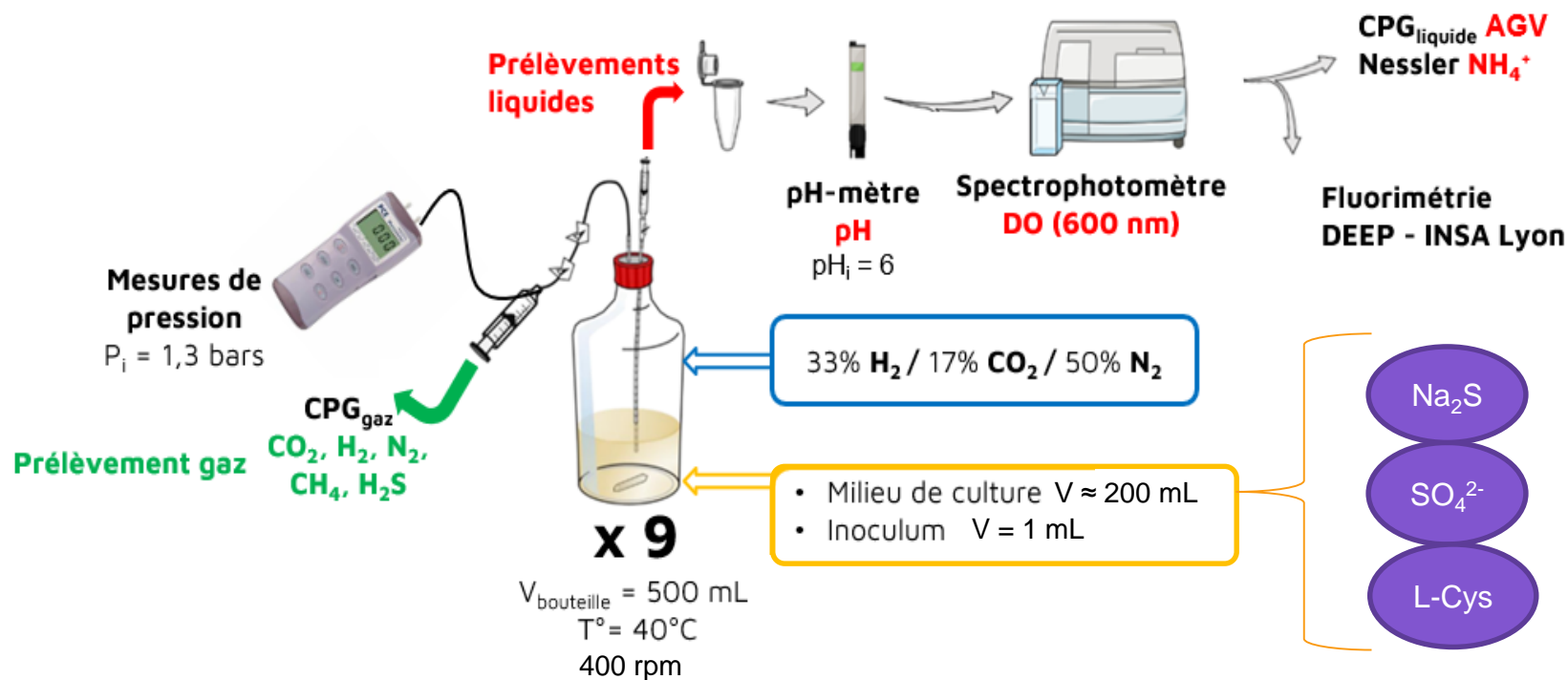


Potentiel redox



Rigaud et al., 2025

Plan d'expérience : effet de la source de S en fermentation gazeuse / méthanation biologique

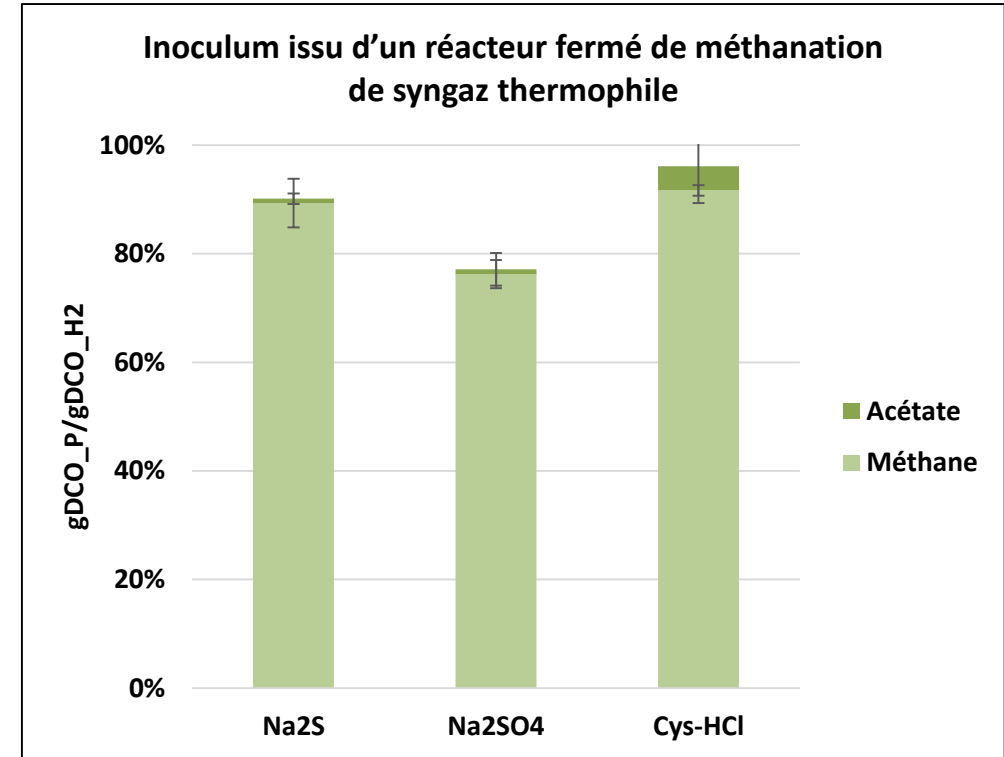
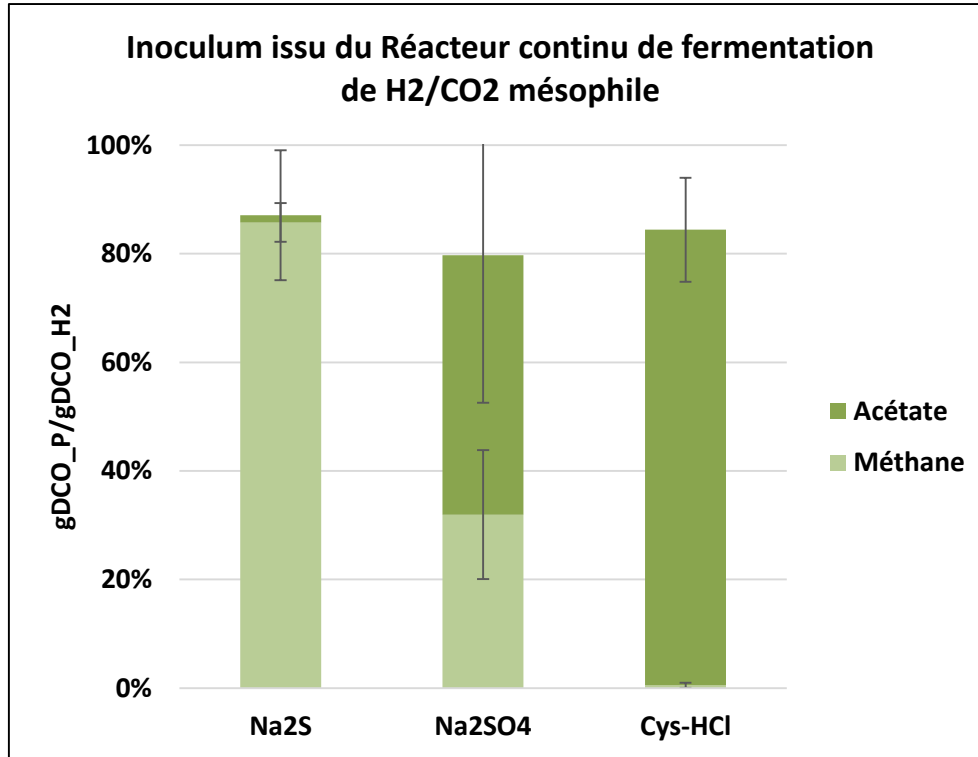


Plan d'expérience : effet de la source de S en fermentation gazeuse / méthanation biologique

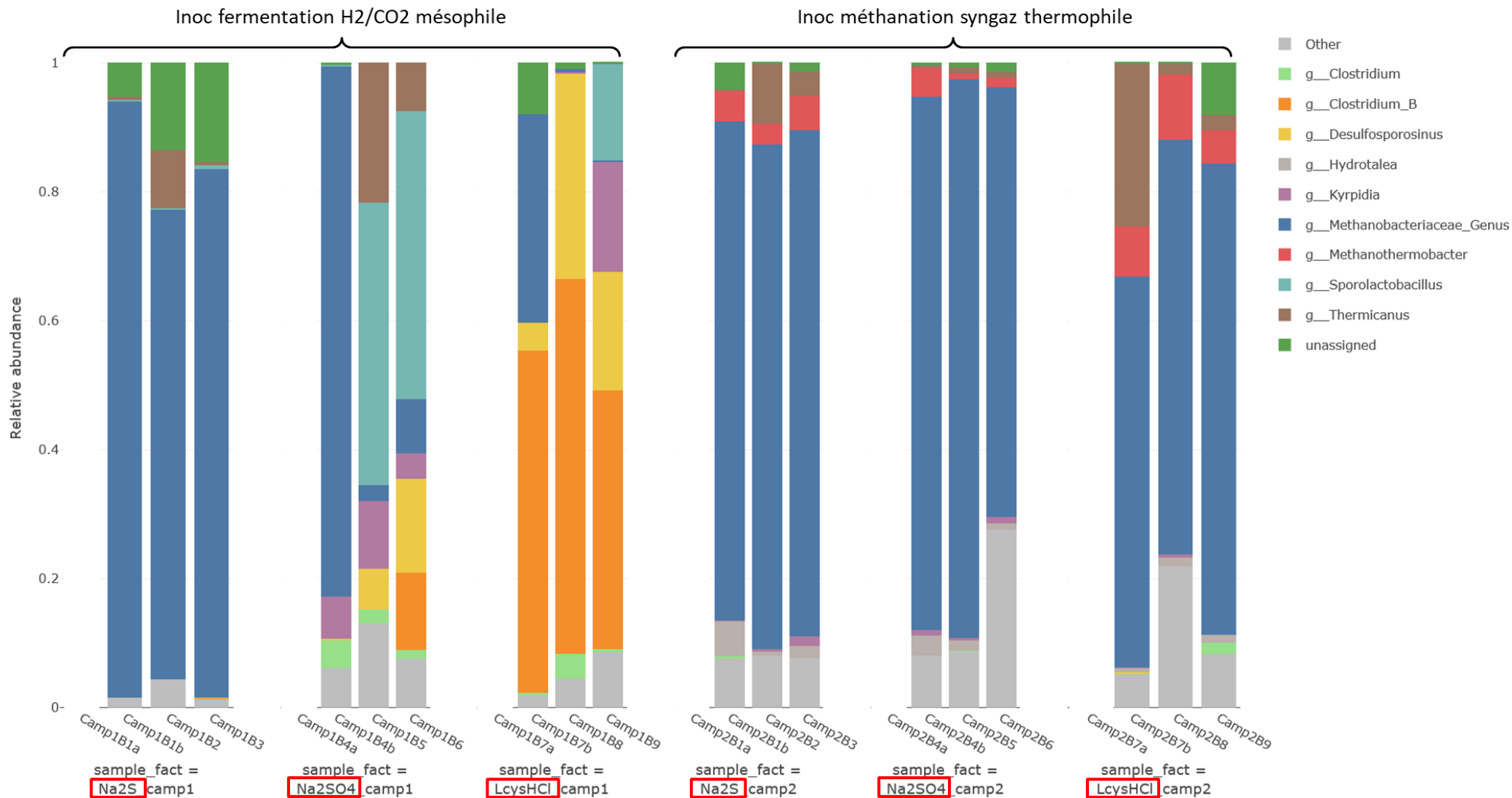


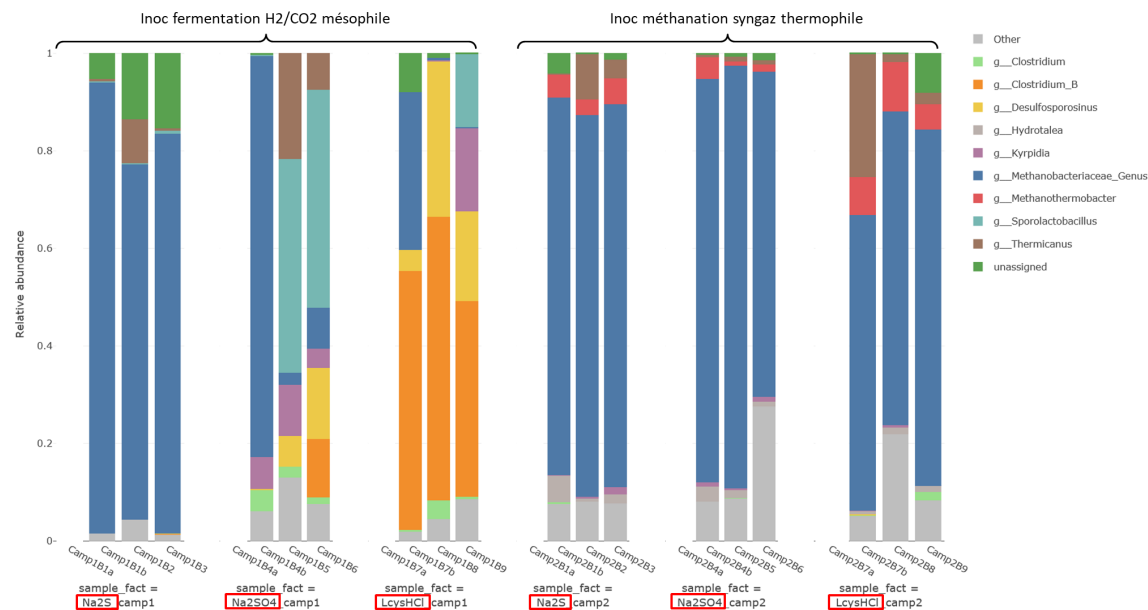
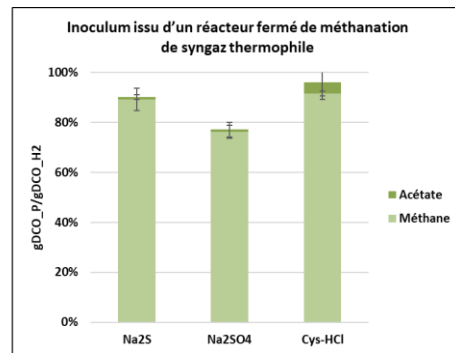
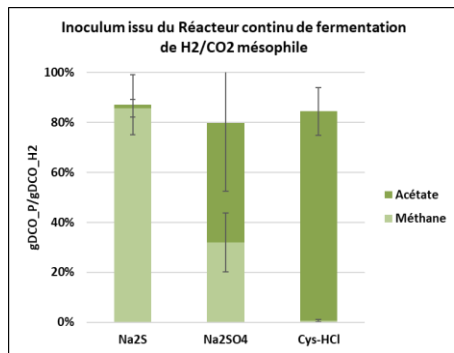
Source de S	mg/L	mgS/L	mg/L	mgS/L	mg/L	mgS/L	mg/L	mgS/L
Na ₂ S, 9 H ₂ O	800	107	172	23	172	23	172	23
Na ₂ SO ₄	250	56,4	100	23	100	23	100	23
L-Cys-HCl-H ₂ O	500	91,3	125	23	125	23	125	23
Inoc	Fermentation continue H ₂ /CO ₂ mésophile		Méthanation fermée syngaz thermophile		Fermentation continue H ₂ /CO ₂ mésophile		Fermentation continue H ₂ /CO ₂ mésophile	
Tampon phosphate	100 mM		50 mM		50 mM		100 mM	
pHi	6,03 ± 0,14		5,97 ± 0,04		5,89 ± 0,11		6,00 ± 0,04	
%i H ₂	37 ± 2		33 ± 1		37 ± 3		30 ± 1	
%i CO ₂	16 ± 1		17 ± 0		19 ± 1		16 ± 0	
Pi (bar)	1,35 ± 0,12		1,41 ± 0,09		1,09 ± 0,09		1,45 ± 0,15	

Activités biologiques mesurées : rendements en produits



Composition des consortia en fin de tests d'activité





Conclusions

- Choix des nutriments important pour l'orientation du procédé
- Compétition forte acétogènes/méthanogènes
- Synergies microbiennes avec les bactéries du cycle du soufre
- Bilan global sur sulfate plus faible → sulfato-réduction

Perspectives

- Méthodes d'analyse pour les composés soufrés
- Bilans sur l'élément S
- Analyse microbiologique des populations actives → ARN



Toulouse Biotechnology Institute
Bio & Chemical Engineering



Etude financée par le programme OPENLAB du groupe INSA

Merci pour votre attention

M. Grad, L. Charewicz, L. Laguillaumie, C. Dumas

TBI, Université de Toulouse, CNRS, INRAE, INSA, Toulouse, France



JRI, 17-19 mars 2026

Sessions Procédés et Valorisation



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

