

COLLOQUE SCIENTIFIQUE
"CHLORDÉCONE, COMPRENDRE & AGIR"
23 • 24 • 25 juin 2026

Avancées et limites de la méthanisation comme outil de remédiation de déchets contaminés à la chlordécone

Guillaume HENRY, Tiffany SCHERRER, Perla ALNAJJAR, Déborah MARTIN, Claire SOLIGOT-HOGNON, Sébastien CHAUSSONNERIE, Delphine MUSELET, Agnès FOURNIER, Pierre-Loïc SAAIDI, **Yves LE ROUX.**

Sommaire

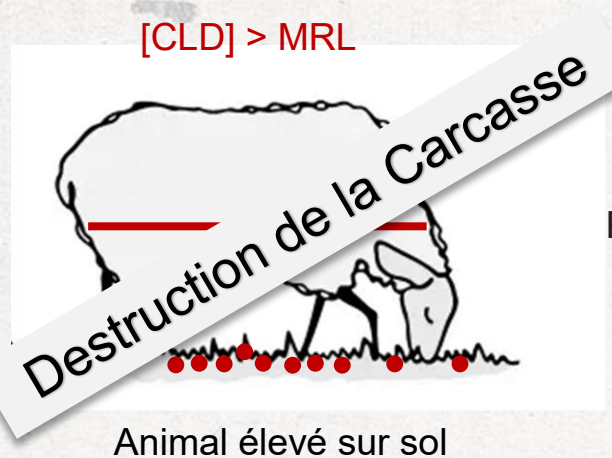
- **Chlordécone (CLD) et Méthanisation**
- **Méthanisation en batch et continue : quels résultats ?**
- **Métagénomique : un nouvel éclairage**
- **Quelle mise en œuvre opérationnelle**

Chlordécone (CLD) et Méthanisation

CLD x Métha : genèse du concept (2020)

Animal Non Conforme

[CLD] > MRL



Animal élevé sur sol contaminé à la CLD

Contrôle qualité après abattage

LABORATOIRE ANIMAL ET AGROÉCOSYSTÈMES

Période de décontamination

Avant abattage

Animal Conforme

[CLD] < MRL



Animal déplacé sur sol non contaminé ou placé en bâtiment ou stales d'élevage

89+ % de la CLD est éliminé par les fèces (86 %) et urines (3,6%) sous forme CLD, CLDOH ou CLDOH-C

Saint-Hilaire et al., 2021

Importance de trouver un exutoire des effluents d'élevages contaminés pour limiter la dissémination de la CLD

➔ Valorisation courante des effluents d'élevage par méthanisation

CLD x Métha : pourquoi cela peut fonctionner ?

Méthanisation = Digestion Anaérobie (AD)

⮌ Action d'un consortium de microorganismes (bactéries + archées) afin de **dégrader la matière organique**

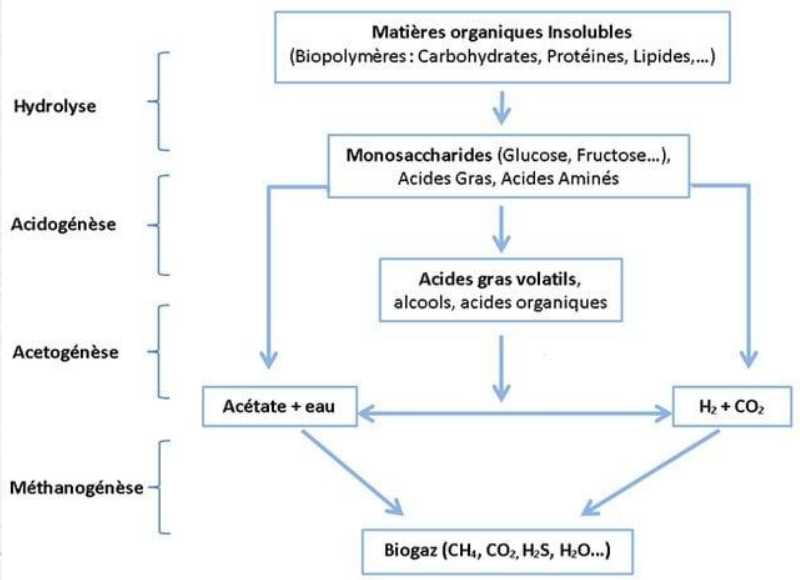


Schéma des étapes de l'AD (Gourdon, 2022)

⮌ Dégradation abiotique connues pour la chlordécone nécessite un milieu réducteur

⮌ Résultats existants mais à confirmer : l'archée Methanosarcina Thermophila dégraderait la chlordécone (*Jablonski et al., 1996*), une expérience de méthanisation continue a permis de former des traces de produits de transformation (*Macarie et al. 2017*)

⮌ Les cofacteurs vitamine B12 et cofacteur F430 dans un milieu réducteur catalysent la dégradation de la chlordécone (*Jablonski et al., 1996, Chevallier et al., 2019*)

⮌ Les coronoïdes (vitamine B12) produits par *Citrobacter* sp 86 sont impliqués dans la dégradation de la CLD par cette bactérie (Barbance et al 2020)

➔ La digestion anaérobie se produit naturellement dans un milieu réducteur (-300 mV) et implique des micro-organismes produisant des corrinoides (vitamine B12) et le facteur 430

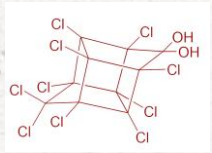
Méthanisation en batch et continue : quels résultats ?

Devenir de la CLD au contact du consortium thermophile (55℃) d'AD en batch

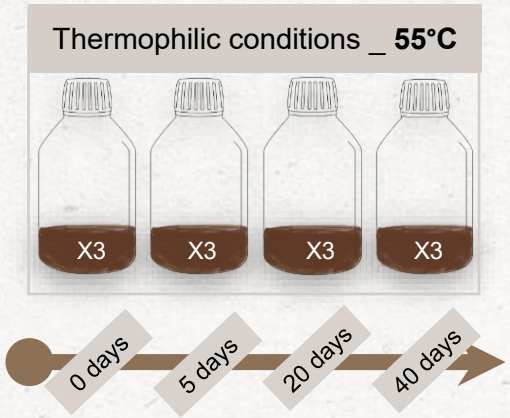


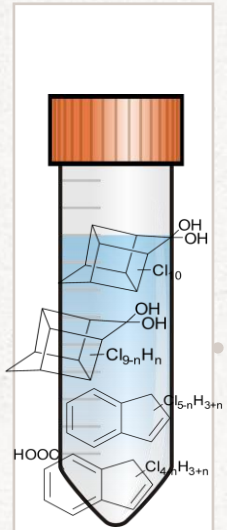
Conditions Thermophiles
Ration base déchets verts
Temps de séjour = 40 jours

Digestat d'origine végétale



CLD
20 mg.L^{-1}





QuEChERS Extraction

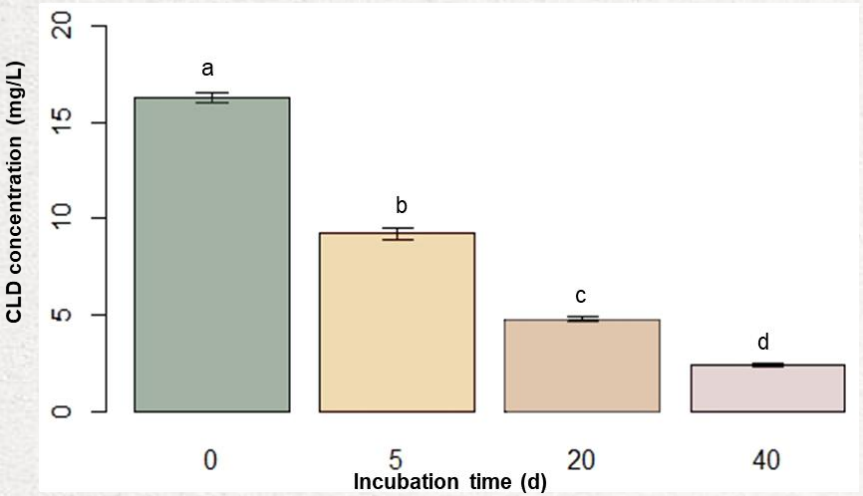


Analyses GC-MS & LC-HRMS

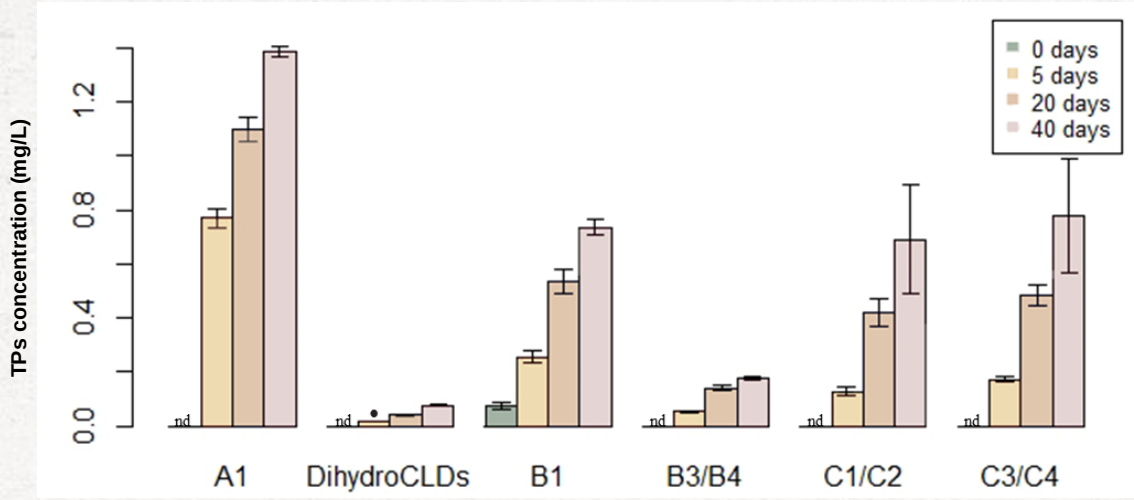
Protocole détaillé Martin*, Alnajjar* et al (2023)
**** Autrices principales***

UMR GENOSCOPE
METABOLIC GENOMICS

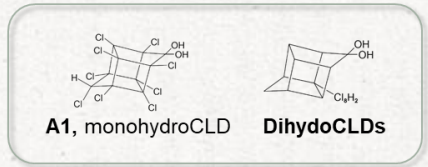
Devenir de la CLD au contact du consortium thermophile (55 °C) d'AD en batch

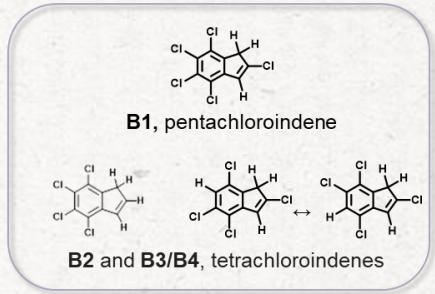


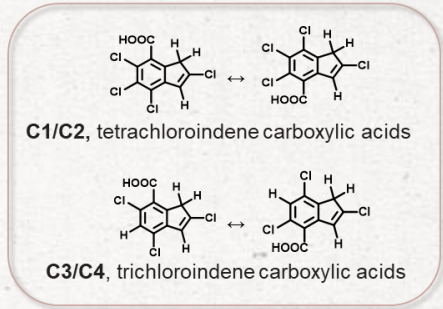
La concentration de la CLD dans le digestat a diminué **85 ± 5%** en conditions thermophiles (55°C)



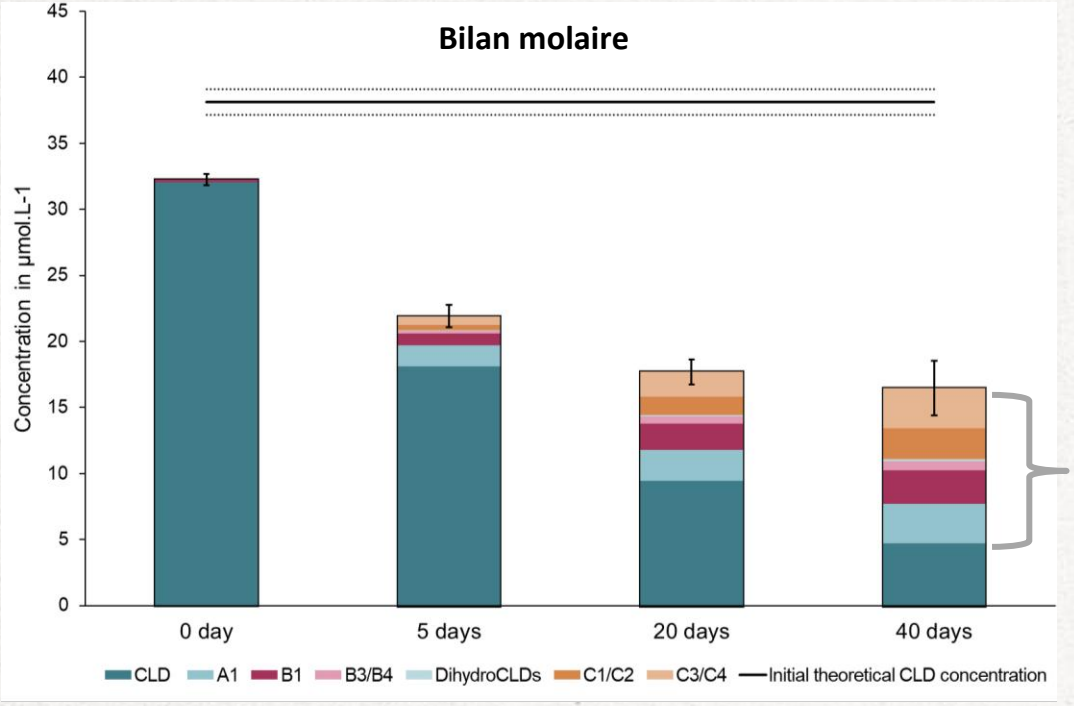
Les Produits de Transformation (PT) issus de la CLD ont été produits en conditions thermophiles (55°C) et ce tout au long de l'expérience



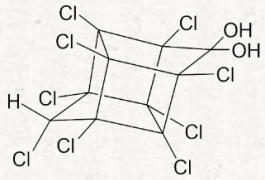




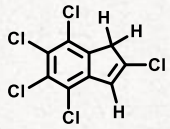
Devenir de la CLD au contact du consortium thermophile (55 °C) d'AD en batch



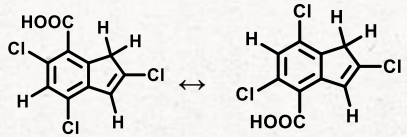
Les PTs majoritaires quantifiés après 40 jours représentent **30 %** de la concentration molaire initiale de la CLD



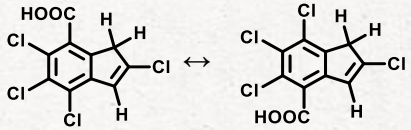
A1



B1



C3/C4



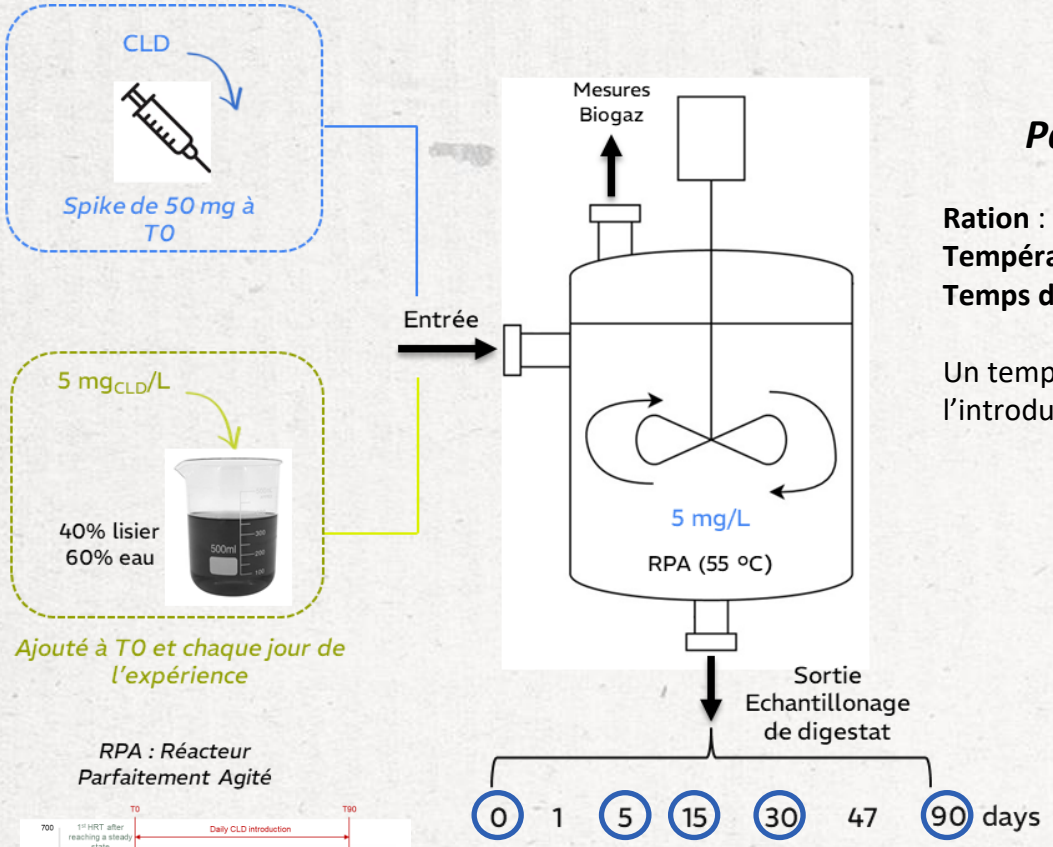
C1/C2

La décroissance de la CLD est concomittante à l'apparition des PT

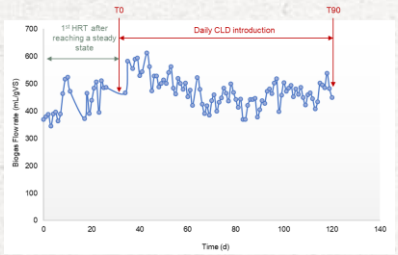
Martin, Alnajjar et al., 2023
STOTEN

Une forte dégradation de la CLD a été observée en conditions thermophiles

Méthanisation continue thermophile (55 °C) d'une ration contaminée à la CLD



RPA : Réacteur Parfaitement Agité



Production de Biogaz

Paramètres opératoires

Ration : Lisier bovin tamisé 5 mm
Température de digestion : 55 °C
Temps de séjour : 30 jours

Un temps de séjour de stabilisation avant l'introduction de la CLD

Schéma réactionnel considéré

$$\begin{cases} CLD \xrightarrow{k'_{CLD}} A1, B1, B3/B4, B2 \dots \\ CLD \xrightarrow{k_{A1}} A1 \\ A1 \xrightarrow{k'_{A1}} X \\ CLD \xrightarrow{k_{B1}} B1 \\ B1 \xrightarrow{k'_{B1}} Y \end{cases}$$

Bilans matière sur le RPA

$$\frac{dC_{CLD}}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(C^{in}_{CLD} - C_{CLD}\right) - k'_{CLD} * C_{CLD} \qquad Eq.1$$

$$\frac{dC_{A1}}{dt} = \left(k'_{A1} - \frac{1}{\tau}\right) C_{A1} + k_{A1} C_{CLD} \qquad Eq.2$$

$$\frac{dC_{B1}}{dt} = \left(k'_{B1} - \frac{1}{\tau}\right) C_{B1} + k_{B1} C_{CLD} \qquad Eq.3$$

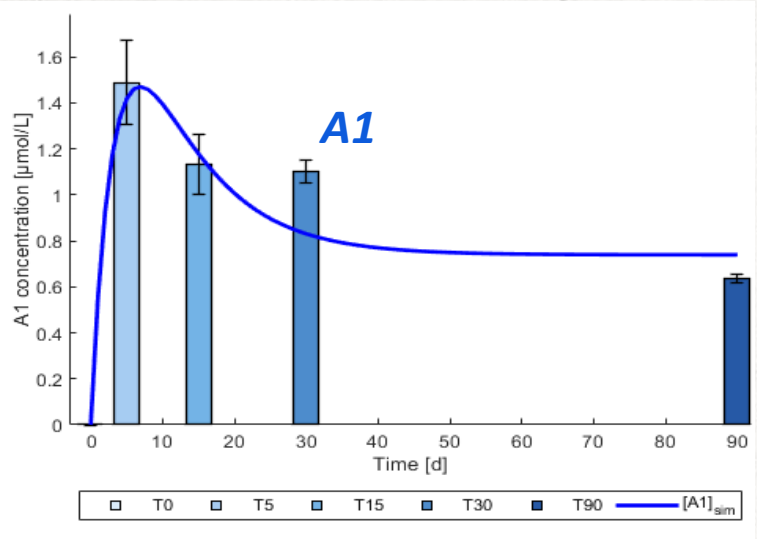
$$\mathbf{K} = [k'_{CLD}, k_{A1}, k'_{A1}, k_{B1}, k'_{B1}]$$

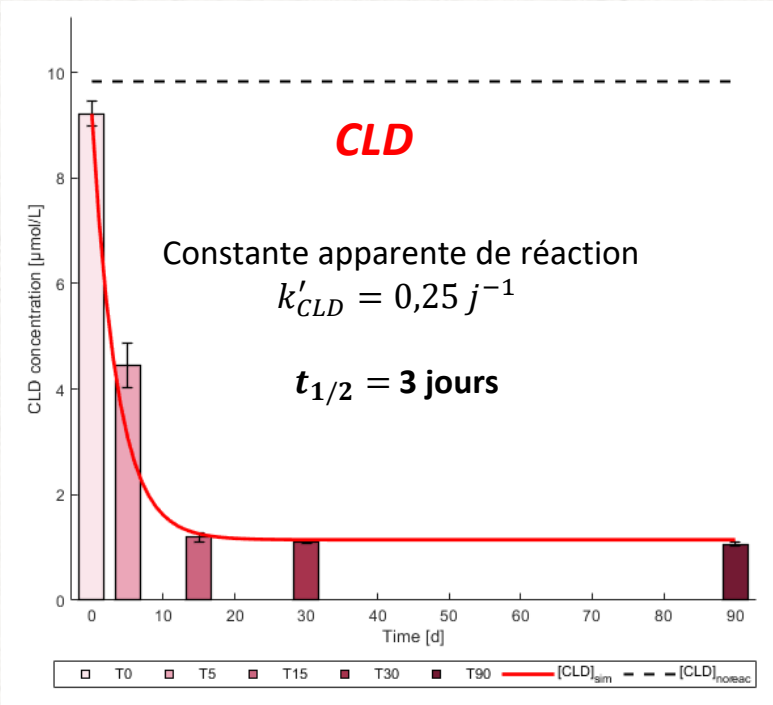
Hypothèses

- Réactions d'ordre 1
- Constantes cinétiques apparentes
- Pas de volatilisation CLD/PT
- Pas d'adsorption

Méthanisation continue thermophile (55 °C) d'une ration contaminée à la CLD

- ➢ Première tentative de modélisation
- ✓ **Modèle significatif pour la CLD**
- ▪ A1 et B1 : apparition et dégradation des PTs

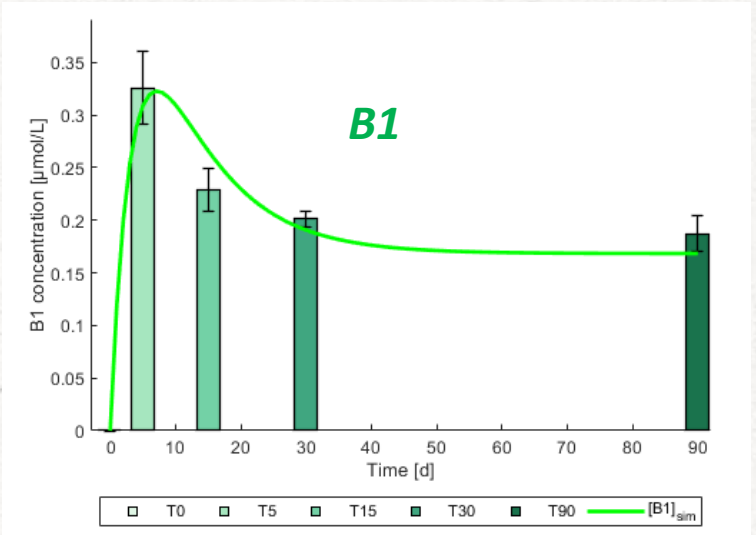




La concentration de la CLD a été diminuée dans le digestat de **87 %** et ce dès 15 jours d'expérience

➔ Besoin de plus de points expérimentaux

➔ Nécessité d'analyser les autres PT
- ➢ Mieux comprendre la dégradation
- ➢ Améliorer le bilan molaire



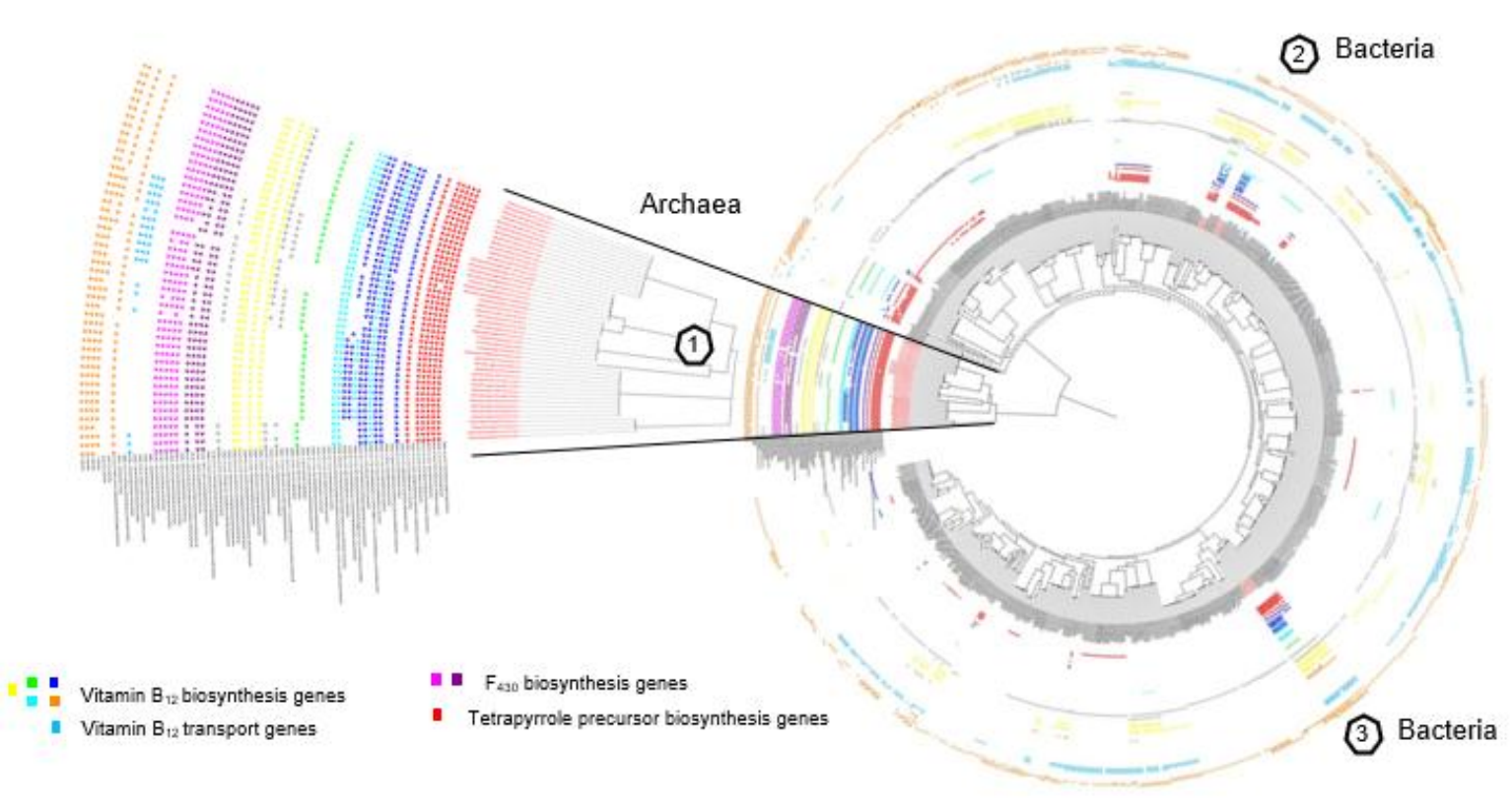
Métagénomique : un nouvel éclairage

La métagénomique : une voie pour identifier les microorganismes clés de la dégradation de la CLD ?

☑ Production de biogaz maintenue dans toutes les expériences de dégradation en présence de CLD.

☑ Pas d'effet majeur de la CLD sur les populations de micro-organismes

⮌ Le groupe des Archées méthanogènes présentes exclusivement l'intégralité des gènes de la synthèse de la Vitamine B12 et du co-facteur F430



Plus d'informations sur le poster « *Dégradation de la chlordécone en méthanisation thermophile : génomes, dynamiques et rôle des archées* »

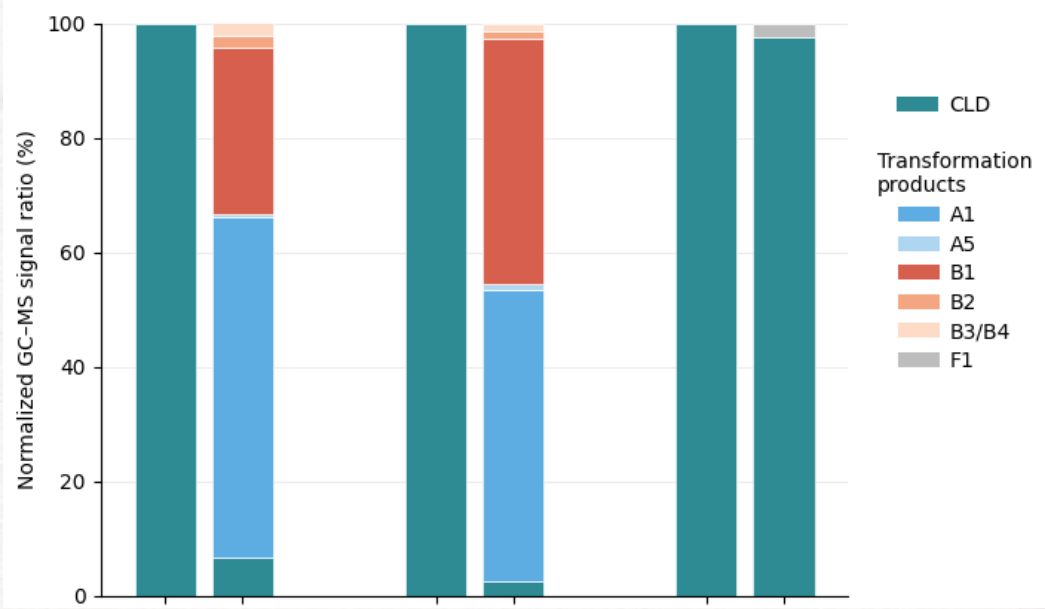
Confirmation de la capacité des archées à dégrader la chlordécone

- **Souche d'archée méthanogène commerciale *Methanosarcina thermophila* DSM 1825** (n'ayant jamais été exposée à la chlordécone)

- **Identique à 99,7% (ANI) à *M. thermophila*** identifiée dans les digestats thermophiles (expérience précédente en batch)

- Chlordécone : **1 mg/L**
- Incubation statique à **56 °C**

- Conditions testées :
  - **réplicas biologiques** + chlordécone
  - **Contrôle abiotique** : Chlordécone sans archée



Pour chaque molécule, pourcentage obtenu par rapport aux aires normalisées avec standard interne 13C-CLD

Réplicas biologiques ***M. thermophila*** **Contrôle**

Après 14 jours : La chlordécone représente < 10 % des composés chlorés détectés dans les deux réplicas biologiques (Niveau de transformation comparable à celui observé dans les digestats thermophiles)

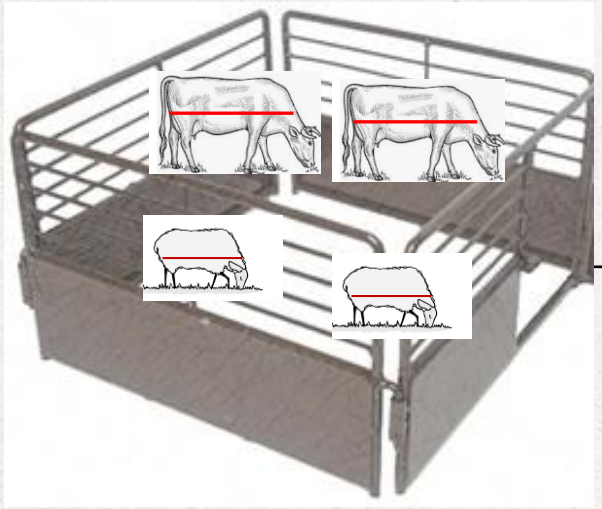
Produits de transformation détectés (GC-MS): 10-Monohydrochlordécone et dihydrochlordécone (A1, A5) Polychloroindènes (B1, B3/B4)
Produits compatibles avec une transformation dépendante des corrinoïdes (vitamine B12/F430)

L'archée thermophile *Methanosarcina thermophila* DSM 1825 est capable de dégrader la chlordécone. Les archées méthanogènes apparaissent comme des acteurs crédibles de la biodégradation de la chlordécone dans les systèmes anaérobies thermophiles.

Quelle mise en œuvre opérationnelle à ce jour ?

Animaux en décontamination

(OAD, Fournier et al.)



Fumier contaminé CLD 3 $\mu g/kg_{MS}$

(analyses 2022)



Méthanisation continue thermophile sur une ration à base 100% effluents contaminés

Concentrations extrapolées du digestat sur la base des résultats présentés :

[CLD] <0,3 $\mu g/kg_{MS}$

[PTs] <0,1 $\mu g/kg_{MS}$

Proche ou en dessous des limites de quantifications actuelles dans cette matrice

Optimiser les méthodes analytiques et en particulier les techniques d'extraction dans des matrices environnementales complexes

Mise en œuvre un démonstrateur territorial pour valider les hypothèses

CONCLUSIONS et PERSPECTIVES

Conclusions

☑ La **digestion anaérobie en conditions thermophiles** continue à 55 °C permet la **dégradation de plus de 87 % de la CLD** entrante dans un digesteur en une quinzaine de jours

☑ Plusieurs PT ont pu être identifiés dans les digestats.

☑ Une première modélisation de la dégradation de la CLD a pu être proposée

☑ Les archées méthanogènes ont été identifiées comme très bonnes candidates potentielles pour la dégradation de la CLD

Perspectives

➡ Elargir le périmètre des PT en analytique pour conforter le bilan molaire de la dégradation de la CLD

➡ Confirmer les constantes cinétiques de la dégradation de la CLD et l'apparition des PT

➡ Approfondir la dégradation de la CLD en présence des archées

- Milieu simplifié
- Confirmer les performances de dégradation avec les archées
- Améliorer le bilan molaire
- Identifier le profil des PT formés

➡ Mise en œuvre d'un démonstrateur territorial avec suivi complet



Merci de votre attention.