



Rapport intermédiaire du 4 février 2026

CONRAD II

Enrichissement en CO₂ de digesteurs anaérobies – Optimisation préalable à l'implémentation à grande échelle





Prestataire de subvention :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.recherche-energetique.ch

Cofinancement :

Association suisse de l'industrie gazière (ASIG)
Grüttlistrasse 44
CH-8027 Zürich
FOGA-Sekretariat
Bettina Bordenet
b.bordenet@svgw.ch

Fonds Vitale Innovation SIG
CP 2777 1211 Genève 2
Raphael Domjan
raphael@domjan.ch

Bénéficiaires de la subvention :

HEIG-VD
Avenue des Sports 20,
CH-1401 Yverdon-les-Bains
www.heig-vd.ch

Auteur(s) :

Juliette SAINT, juliette.saint@heig-vd.ch
Roger RÖTHLISBERGER, roger.roethlisberger@heig-vd.ch

Suivi du projet à l'OFEN :

Vanessa Burg, vanessa.burg@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/502908-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Résumé

Le projet vise à évaluer l'intérêt d'un procédé d'enrichissement en CO_2 pour améliorer la production de méthane en digestion anaérobie de boues de STEP, tout en garantissant des conditions représentatives d'une exploitation industrielle. Deux approches complémentaires sont étudiées : (i) l'enrichissement du substrat en amont du digesteur, solution simple et peu intrusive ne nécessitant pas de modification majeure des installations, et (ii) l'injection directe de CO_2 dans le digesteur en fonctionnement, potentiellement plus performante mais impliquant des contraintes techniques et opérationnelles plus importantes.

Un travail important a été consacré à la conception, l'instrumentation et la mise en service de l'unité TANDEM de digestion et d'enrichissement, permettant un suivi en continu des paramètres clés (pH, ORP, température, CO_2 dissous, composition du biogaz) et la comparaison de deux réacteurs opérés en parallèle. Les efforts se sont ensuite concentrés sur l'analyse critique des pratiques expérimentales afin de réduire les écarts avec les conditions observées à la STEP d'Yverdon-les-Bains, objectif central pour la transférabilité des résultats.

Cette démarche a notamment conduit à une caractérisation approfondie de la matière entrante, mettant en évidence l'impact déterminant du stockage des boues sur leur composition, en particulier la perte de CO_2 par dégazage et les phénomènes de vieillissement biologique (libération d'ions NH_4^+). Des adaptations des protocoles de stockage et d'alimentation ont permis de limiter ces biais, d'alimenter les digesteurs avec des boues présentant des teneurs en CO_2 dissous et des valeurs de pH proches de celles de la STEP, et d'obtenir des conditions de fonctionnement stables et suffisamment représentatives.

Ces ajustements, ainsi que la mise en place de mesures visant à standardiser l'alimentation ont permis d'atteindre un niveau satisfaisant de cohérence entre les digesteurs TANDEM. La prochaine étape sera la réalisation d'une première campagne expérimentale d'une durée de trois mois, consacrée à l'évaluation l'enrichissement du substrat en CO_2 et à son impact sur la production de méthane et la stabilité du procédé.

Zusammenfassung

Das Projekt zielt darauf ab, den Nutzen eines CO_2 -Anreicherungsverfahrens zur Verbesserung der Methanproduktion bei der anaeroben Vergärung von Klärschlamm zu bewerten und dabei Bedingungen zu gewährleisten, die für den industriellen Betrieb repräsentativ sind. Es werden zwei sich ergänzende Ansätze untersucht: (i) die Anreicherung des Substrats vor dem Fermenter, eine einfache und wenig invasive Lösung, die keine größeren Änderungen an den Anlagen erfordert, und (ii) die direkte Injektion von CO_2 in den laufenden Fermenter, die potenziell leistungsfähiger ist, aber mit größeren technischen und betrieblichen Einschränkungen verbunden ist.

Es wurden umfangreiche Arbeiten zur Konzeption, Instrumentierung und Inbetriebnahme der TANDEM-Einheit für die Vergärung und Anreicherung durchgeführt, die eine kontinuierliche Überwachung der Schlüsselparameter (pH-Wert, ORP, Temperatur, gelöstes CO_2 , Zusammensetzung des Biogases) und den Vergleich von zwei parallel betriebenen Reaktoren ermöglicht. Anschließend konzentrierten sich die Bemühungen auf die kritische Analyse der Versuchspraktiken, um die Abweichungen von den in der Kläranlage von Yverdon-les-Bains beobachteten Bedingungen zu verringern, was für die Übertragbarkeit der Ergebnisse von zentraler Bedeutung ist.

Dieser Ansatz führte insbesondere zu einer eingehenden Charakterisierung des Eingangsmaterials, wobei der entscheidende Einfluss der Lagerung der Schlämme auf deren Zusammensetzung, insbesondere der CO_2 -Verlust durch Entgasung und biologische Alterungsprozesse (Freisetzung von NH_4^+ -Ionen), deutlich wurde. Durch Anpassungen der Lagerungs- und Zufuhrprotokolle konnten diese



Verzerrungen begrenzt, die Faulbehälter mit Schlamm versorgt werden, dessen Gehalt an gelöstem CO_2 und dessen pH-Werte denen der Kläranlage nahekommen, und stabile und ausreichend repräsentative Betriebsbedingungen erreicht werden.

Diese Anpassungen sowie die Einführung von Maßnahmen zur Standardisierung der Beschickung haben zu einer zufriedenstellenden Kohärenz zwischen den TANDEM-Fermentern geführt. Der nächste Schritt wird die Durchführung einer ersten dreimonatigen Versuchskampagne sein, die sich mit der Bewertung der Anreicherung des Substrats mit CO_2 und deren Auswirkungen auf die Methanproduktion und die Stabilität des Prozesses befasst.

Summary

The project aims to evaluate the benefits of a CO_2 enrichment process to improve methane production in anaerobic digestion of WWTP sludge, while ensuring conditions representative of industrial operation. Two complementary approaches are being studied: (i) substrate enrichment upstream of the digester, a simple and minimally intrusive solution that does not require major modifications to the facilities, and (ii) direct injection of CO_2 into the digester during operation, which is potentially more efficient but involves greater technical and operational constraints.

Significant work has been devoted to the design, instrumentation, and commissioning of the TANDEM digestion and enrichment unit, enabling continuous monitoring of key parameters (pH, ORP, temperature, dissolved CO_2 , biogas composition) and comparison of two reactors operating in parallel. Efforts then focused on critically analyzing experimental practices in order to reduce discrepancies with the conditions observed at the Yverdon-les-Bains wastewater treatment plant, a key objective for the transferability of results.

This approach led to an in-depth characterization of the incoming material, highlighting the decisive impact of sludge storage on its composition, in particular the loss of CO_2 through degassing and biological aging phenomena (release of NH_4^+ ions). Adjustments to storage and feeding protocols have made it possible to limit these biases, feed the digesters with sludge with dissolved CO_2 contents and pH values close to those of the WWTP, and achieve stable and sufficiently representative operating conditions..

These adjustments, along with the implementation of measures to standardize feeding, have made it possible to achieve a satisfactory level of consistency between the TANDEM digesters. The next step will be to conduct an initial three-month experimental campaign to evaluate CO_2 enrichment of the substrate and its impact on methane production and process stability.



Table des matières

Résumé.....	3
Zusammenfassung.....	3
Summary	4
Table des matières	5
Liste des abréviations.....	6
1 Introduction.....	7
1.1. Contexte et motivation	7
1.2. Analyse des options	9
1.3. Objectifs du projet.....	11
1.4. Bénéfices attendus	12
2 Activités, méthodes, résultats et discussions	12
2.1. Méthodologie	12
2.2. Activités	13
2.3. Résultats et discussion.....	16
3 Conclusions et perspectives.....	24
4 Coopération nationale et internationale.....	25
5 Publications et autres communications	25
6 Bibliographie.....	25
7 Annexe.....	27
7.1. Représentation schématique détaillée de l'installation de digestion anaérobie tandem.	27
8 Contrôle interne du projet (confidentiel).....	Erreur ! Signet non défini.
9 Plan de gestion des données et stratégie open access/data/model interne (confidentiel)	Erreur ! Signet non défini.



Liste des abréviations

AGV	Acide gras volatile
DCO	Demande chimique en oxygène
FOS/TAC	Rapport FOS/TAC mesure la quantité d'acides organiques (Free Organic Acids, FOS) par rapport à l'alcalinité inorganique totale (Total Alkalinity Carbon ou Total Anorganic Carbon, TAC)
MF	Matière fraîche
MS	Matière sèche (équivalent aux solides totaux ST)
OFEN	Office fédéral de l'énergie
ORP	Oxydo-Réduction Potentiel (potentiel rédox)
sDCO	Demande chimique en oxygène fraction soluble
SV	Solides volatiles
ST	Solides totaux
STEP	Station d'épuration des eaux usées
UASB	Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket



1 Introduction

1.1. Contexte et motivation

Ce projet a pour objectif d'optimiser les performances de la digestion anaérobie (DA) des boues de stations d'épuration (STEP) en augmentant la production de biométhane grâce à l'enrichissement en CO_2 des digesteurs. Ce procédé constitue une approche simple et prometteuse pour améliorer l'efficacité du fonctionnement des réacteurs anaérobies, tout en valorisant le CO_2 généré lors de la production de biogaz. Son déploiement à grande échelle pourrait ainsi contribuer de manière significative à renforcer la production d'énergie renouvelable issue des boues et à réduire l'empreinte carbone globale du procédé de traitement.

Enrichir consiste à injecter du CO_2 gazeux qui passera ensuite en phase liquide par dissolution avant d'être absorbé par les processus de la digestion anaérobie (métabolisation). Depuis plusieurs décennies, différents groupes de recherche ont rapporté une augmentation des rendements en méthane des digesteurs anaérobies grâce à l'injection de CO_2 , allant de 13% à plus de 100%, selon les matières premières (Bajon Fernandez et al., 2017).

Dans ces études, des combinaisons de différentes configurations de digestion anaérobie (c'est-à-dire monophasique, biphasique, UASB), de différents substrats de digestion anaérobie (boues d'épuration primaires, secondaires et digérées, déchets alimentaires et de cuisine, solutions synthétiques), de volumes allant de 0,03 L à 630 L et de températures allant de 25 à 40 °C, soit une très large gamme de conditions opératoires, ont été utilisées.

Par ailleurs, différentes techniques d'injection de CO_2 peuvent être envisagées :

1. La dissolution initiale dans le substrat avant son entrée dans le digesteur (Alimahmoodi et Muligan, 2008, Žalys et al., 2023)
2. L'injection continue ou pulsée dans les boues en cours de digestion (parfois à l'aide d'une colonne de transfert de masse) (Salomoni et al, 2011 ; Bajon Fernandez et al., (2012, 2014, 2015) ; Al-mashhadani et al., 2016 Muntau et al., (2021))
3. L'injection dans l'espace de tête (Ochi et al., 1992, Koch et al. (2015, 2016))

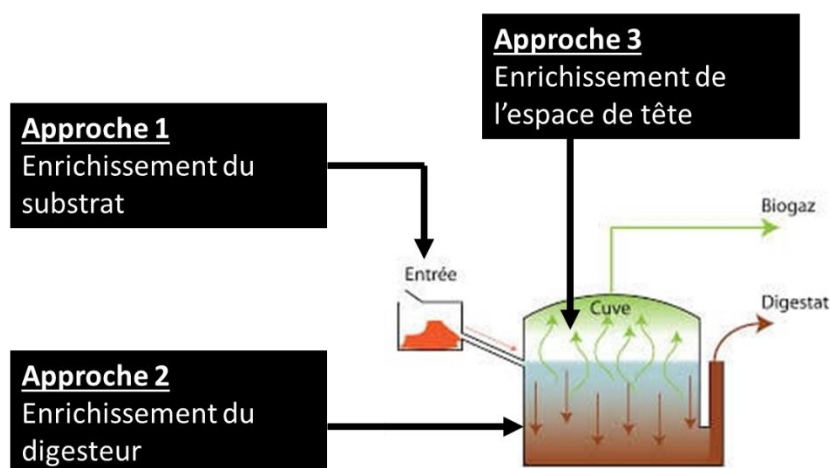


Figure 1 – Protocoles possibles pour l'enrichissement en CO_2



Chacune des études mentionnées ci-dessus rapportent une augmentation du rendement en méthane après un enrichissement en CO₂ (Sato et Ochi, 1994 ; Alimahmoodi et Mulligan, 2008 ; Salomoni et al, 2011 ; Bajon Fernandez et al., (2012, 2014, 2015) Bajon; Koch et al., 2015 ; Mohd Yasin et al., 2015 ; Koch et al, 2016 ; Al-mashhadani et al., 2016 ; Muntau et al., 2021 ; Žalys et al., 2023, Bardi et al., 2025).

Dans plusieurs de ces travaux, l'amélioration du rendement global en méthane ne s'est pas toujours accompagnée d'une augmentation de la teneur en CH₄ dans le biogaz. Dans certains cas, une légère diminution de cette teneur a même été observée, suggérant que l'effet du CO₂ sur la composition du biogaz dépend fortement des conditions opératoires. Plusieurs facteurs peuvent intervenir, notamment le débit et la durée d'injection du CO₂, la charge organique appliquée, le brassage ou encore l'équilibre entre les populations méthanogènes et acidogènes. Par ailleurs, il est probable qu'il existe une limite au-delà de laquelle l'apport de CO₂ devient contre-productif, entraînant une dilution du biogaz plutôt qu'une conversion supplémentaire efficace (Castel et al., 2025). Ces observations mettent en évidence la nécessité de déterminer expérimentalement la quantité optimale de CO₂ pouvant être injectée dans le système, afin de maximiser la production de méthane sans altérer la qualité du biogaz produit.

En raison de la large gamme de conditions opératoires (type de substrat, charge organique, température, temps de séjour, mode de brassage, type et volume du réacteur) et des diverses modalités de mise en œuvre du procédé d'enrichissement lui-même, les mécanismes expliquant l'amélioration des performances peuvent également varier considérablement selon les études, allant d'une stimulation de l'activité microbienne à une meilleure accessibilité de la matière organique ou à des effets physico-chimiques spécifiques.

L'analyse de l'ensemble des travaux disponibles met en évidence que les résultats les plus convaincants concernant l'amélioration du rendement en méthane ont été obtenus à l'échelle laboratoire, pour des volumes de réacteurs généralement inférieurs à 10 L. Dans ces conditions contrôlées, les paramètres opératoires peuvent être ajustés avec une grande précision, favorisant une meilleure homogénéité du milieu, une maîtrise fine des apports et une réponse rapide du système aux modifications expérimentales. En revanche, les études menées sur des installations de plus grande échelle (V > 50 L) restent plus rares et présentent des résultats plus contrastés. À ces échelles, les phénomènes d'hétérogénéité, les limitations de transfert (gaz, substrats, chaleur) et la complexité du brassage peuvent atténuer les effets positifs observés en laboratoire. Ces observations suggèrent que, bien que le procédé présente un potentiel réel d'amélioration du rendement méthanogène, son transfert à l'échelle pilote ou industrielle nécessite une compréhension approfondie des mécanismes impliqués et une adaptation fine des conditions opératoires.

Projet CONRAD I (<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=50064>)

L'étude de faisabilité menée à la HEIG-VD (projet CONRAD I) a été réalisée dans un digesteur de 70 L enrichi en CO₂ par injection pulsée dans les boues en cours de digestion.

Les performances du digesteur sous enrichissement (teneur moyenne en CH₄ du biogaz : 66.8 ± 0,5%, rendement en méthane : 209 ± 17 L_{CH4}/g_{SV}) se sont révélées supérieures à celles obtenues dans le digesteur en fonctionnement normal (teneur moyenne en CH₄ du biogaz : 62.7 ± 0.3%, rendement en méthane : 151 ± 15 L_{CH4}/g_{SV}). Ces améliorations ont été attribuées à des phénomènes thermodynamiques liés à la baisse d'alcalinité à pH constant dans le digesteur sous enrichissement. L'augmentation du rendement en méthane observée avec l'enrichissement (+38 %) dépasse celle rapportée dans la



littérature pour des digesteurs de volume comparable, principalement parce que nous avons contrôlé avec précision la quantité de CO₂ injectée. En contrepartie, notre taux de réutilisation du CO₂ — estimé à 12 % — reste inférieur à celui de la plupart des études.

Lors de la phase de démonstration de faisabilité, les conditions opératoires : sélection stricte de substrat (absence de cosubstrats), congélation des substrats, charge organique, brassage pneumatique ont entraîné l'augmentation progressive du pH de 7,5 à 8 (janvier 2023 – juillet 2023)

Un pH de 8 n'est pas optimal pour la digestion anaérobie en particulier pour la phase d'hydrolyse, étape limitante dans la digestion de substrats à forte teneur en protéines comme les boues de digestion. Dans de telles conditions, il semblerait que l'ajout de CO₂ permette d'augmenter la cinétique de l'hydrolyse probablement par les baisses de pH localisées qui se créent. Ainsi, d'après cette hypothèse, plus le pH du digesteur est élevé plus l'effet de l'enrichissement en CO₂ serait bénéfique. Cette influence du pH est confirmée par une autre étude réalisée à partir de différents substrats mais un pH typique de la digestion anaérobie n'est pas incompatible avec une amélioration des performances de la digestion anaérobie grâce à l'enrichissement (Bajón Fernández et al., 2014, section résultats et discussions).

Les sondes que nous avons utilisées ont enregistré une baisse progressive des niveaux de CO₂ dissous dans le digesteur nourri avec des boues de STEP au fur et à mesure que la digestion progresse et nous avons alors émis l'hypothèse que dans de telles conditions les digesteurs pourraient venir à manquer de CO₂ pour la réalisation des processus de digestions anaérobies. Ainsi, l'injection de CO₂ pourrait aussi simplement garantir une meilleure disponibilité et accessibilité du CO₂.

1.2. Analyse des options

Dans le cadre du procédé d'enrichissement en CO₂, deux stratégies principales sont envisagées : l'enrichissement du substrat avant son introduction dans le digesteur et l'injection directe dans le digesteur en fonctionnement (Figure 1). Ces deux approches présentent des avantages et des contraintes distincts, tant du point de vue du contrôle du procédé que de sa mise en œuvre à l'échelle industrielle.

L'enrichissement préalable du substrat constitue une solution techniquement simple et économiquement attractive, ne nécessitant aucune modification majeure du digesteur existant. Cette approche permet un meilleur contrôle des conditions physico-chimiques avant l'entrée dans le réacteur, notamment en termes d'équilibres carbonatés, et contribue à réduire les risques d'acidification ou de dilution du biogaz. En revanche, la quantité de CO₂ injectable peut être limitée par la solubilité du gaz, la capacité tampon du substrat et les conditions de stockage, ce qui pourrait restreindre l'intensité de l'enrichissement atteignable. Par ailleurs, en fonction de la manière dont cette approche est mise en œuvre un dégazage non maîtrisé peut survenir depuis la fin de l'enrichissement jusqu'à l'intégration de la boue entrante dans digesteur.

À l'inverse, l'injection directe de CO₂ dans le digesteur offre, en théorie, une disponibilité accrue du CO₂ pour les microorganismes méthanogènes, mais s'accompagne de contraintes opérationnelles plus importantes. En particulier, dans les digesteurs non équipés de brassage pneumatique — configuration majoritaire en Suisse — la mise en place de systèmes d'injection et de diffusion du gaz nécessite généralement un arrêt temporaire du digesteur, pour modification après vidange partielle ou complète, ce qui représente un frein significatif en termes d'exploitation. De plus, cette approche implique un risque accru d'instabilité du procédé si le dosage, la diffusion et la gestion des équilibres gaz-liquide ne sont pas finement maîtrisés.



Dans ce contexte, l'analyse comparative de ces deux stratégies vise à identifier l'approche offrant le meilleur compromis entre efficacité du procédé, robustesse opérationnelle, coûts de mise en œuvre et transférabilité à l'échelle industrielle (Tableau 1).

Critère	Enrichissement du substrat (avant digesteur)	Injection directe dans le digesteur
Principe	Dissolution du CO ₂ dans les boues avant l'entrée dans le digesteur	Injection de CO ₂ directement dans le digesteur en fonctionnement
Complexité technique	Faible	Élevée
Modifications du digesteur	Aucune ou très limitées	Souvent nécessaires
Continuité d'exploitation	Maintenue	Arrêt du digesteur souvent requis (hors brassage pneumatique déjà présent)
Compatibilité avec les STEP suisses	Élevée	Limitée (brassage mécanique majoritaire)
Coûts d'investissement	Faibles	Élevés
Contrôle des équilibres physico-chimiques	Bon (en amont du digesteur)	Plus délicat (in situ)
Risque d'acidification / dilution du biogaz	Limité	Plus élevé si le dosage est mal contrôlé
Quantité de CO ₂ injectable	Potentiellement limitée (solubilité, capacité tampon)	Plus élevée en théorie
Robustesse opérationnelle	Élevée	Plus sensible aux conditions opératoires
Transférabilité industrielle	Très favorable	Conditionnelle

Tableau 1 : Comparaison des approches choisies pour l'enrichissement en CO₂



1.3. Objectifs du projet

Sur la base des résultats de la littérature et ceux obtenus durant CONRAD I nous avons identifié les points clés du procédé d'enrichissement des digesteurs. Ces observations ont servi de fondement à l'élaboration de nouvelles stratégies expérimentales, conçue pour répondre plus efficacement aux objectifs initiaux. La présente phase du projet s'inscrit donc dans une logique de continuité, en mettant en œuvre un protocole mieux approprié, destiné à améliorer l'évaluation des performances et à généraliser son application.

1) Transférabilité à d'autres conditions de digestion anaérobie

L'objectif principal ici est de réaliser des tests dans des conditions proches, notamment en terme du pH, de celles des installations suisses (STEP).

Type de brassage

Le premier point concerne l'application du procédé d'enrichissement en CO₂ dans le cas d'un digesteur à brassage mécanique équipé de pâles rotatives. Ce type de brassage étant le plus couramment utilisé dans les digesteurs à grande échelle en Suisse, il convient de s'assurer que nous pourrions obtenir des résultats similaires dans ce type de digesteur. La difficulté ici est liée à la stabilité du CO₂ dissous et à un risque de dégazage du CO₂ exogène si le brassage mécanique est trop intense.

Le choix d'un type de brassage influence les conditions hydrodynamiques et physico-chimiques internes au digesteur, notamment en ce qui concerne la distribution du gaz, le transfert de masse et les gradients locaux de concentration et potentiellement le pH.

Nous allons donc comparer les performances du procédé d'enrichissement dans des digesteurs TAN-DEM à brassage mécanique et avec celles obtenus dans un digesteur à brassage pneumatique. L'objectif est de comparer l'influence du mode de brassage sur le comportement du procédé d'enrichissement en CO₂, et plus largement sur la stabilité et la performance de la digestion anaérobie, afin d'identifier les conditions les plus favorables à l'optimisation du rendement méthanogène.

2) Transférabilité à grande échelle

A partir des points mentionnés précédemment et de la reproduction des résultats sur le long terme, nous pourrions finalement étudier la question de la transférabilité à grande échelle. L'approche privilégiée ici est une approche centrée sur les STEP du canton de Vaud : STEP d'Yverdon-les bains et de Cossonay-Penthaz (brassage mécanique), STEP de Lausanne (brassage mécanique et par recirculation du biogaz).

3) Valorisation du digestat

Un objectif complémentaire du projet est d'examiner dans quelle mesure le procédé d'enrichissement en CO₂ influence la composition chimique du digestat et ses propriétés en vue de sa valorisation. En particulier, le projet vise à analyser si l'injection de CO₂ est susceptible de modifier les équilibres physico-chimiques, notamment la spéciation de l'azote, et d'évaluer son potentiel à contribuer à une stabilisation de la forme ammoniacale (NH₄⁺), en limitant la formation de NH₃. Cette approche se veut exploratoire et permettra d'apprécier si, au-delà de ses effets sur la production de méthane, l'enrichissement en CO₂ peut également jouer un rôle dans la stabilisation du digestat et dans l'amélioration de sa robustesse vis-à-vis des étapes de gestion et de valorisation ultérieures.



1.4. Bénéfices attendus

Le principal bénéfice attendu du procédé d'enrichissement en CO_2 est une augmentation significative de la production de méthane, estimée à environ 5 %, obtenue soit par une augmentation de la teneur en CH_4 du biogaz, soit par une amélioration du rendement en méthane de la matière organique traitée. Cette amélioration reposerait sur une meilleure disponibilité du CO_2 pour les voies méthanogènes, une optimisation des équilibres physico-chimiques au sein du digesteur et une stimulation ciblée de l'activité microbienne. Un tel gain, bien que modéré en valeur relative, représente un levier important à l'échelle industrielle, où une augmentation de quelques pourcents de la production de biométhane se traduit par des bénéfices énergétiques, économiques et environnementaux significatifs, si elle n'est pas accompagnée de modification majeure de l'infrastructure existante.

2 Activités, méthodes, résultats et discussions

2.1. Méthodologie

2.1.1. Gestion et caractérisation des substrats

Les boues utilisées pour alimenter les digesteurs anaérobies sont prélevées une fois par semaine à la STEP d'Yverdon-les Bains. Les échantillons, mélanges de boues primaires et secondaires, sont collectés dans la cuve où les boues sont stockées avant leur entrée dans le digesteur.

Lors du projet CONRAD I, les boues utilisées pour les essais de digestion anaérobie étaient systématiquement prélevées le lundi matin, à un moment où le fonctionnement de la station était exempt de tout apport externe (graisses industrielles, boues externes ou autres cosubstrats). Cette stratégie visait à garantir un substrat aussi stable et représentatif que possible de la ligne biologique seule, afin de limiter les variations de composition initiale susceptibles d'affecter la dynamique de digestion. Les boues prélevées étaient ensuite conservées par congélation avant utilisation. Ce mode de conservation, bien que pratique pour des raisons logistiques, a eu un effet non négligeable sur la composition des substrats : la congélation/décongélation a entraîné une lyse cellulaire partielle, se traduisant par une augmentation du taux d'ions ammonium (NH_4^+) dans les boues. Cette libération d'azote minéral a contribué à un empoisonnement progressif du digesteur par surcharge ammoniacale, affectant son fonctionnement et la stabilité du procédé.

Dans le cadre de ce projet, afin d'éviter cet artefact et de mieux refléter les conditions réelles d'exploitation, nous travaillons désormais uniquement avec des boues fraîches, sans congélation préalable. Les prélèvements sont toujours effectués le matin (du mardi au vendredi), avant l'arrivée des apports externes, afin de garantir une composition stable et reproductible, exempte de cosubstrats, et spécifiquement représentative des boues issues du traitement biologique interne.

Les lots de substrats utilisés pour alimenter le digesteur ont été caractérisés et analysés à partir des paramètres suivants :

- Taux de solides total (ST)
- Le taux de solides volatiles (SV)
- La demande chimique en oxygène (DCO)
- L'azote ammoniacal (Taux d'ion NH_4^+),
- pH



- Taux d'acide gras volatiles (AGV)

2.1.2. Evaluation des performances de la digestion anaérobie

Les performances du procédé de digestion anaérobie sont évaluées à partir du suivi des paramètres suivants :

- Réduction de la DCO
- Réduction des SV
- Le taux d'acide gras volatiles (AGV)
- L'alcalinité et le rapport FOS/TAC
- L'azote ammoniacal (NH_4^+ - N)
- La production de biogaz et rendement en méthane

Pour réaliser cette analyse, nous suivons quotidiennement la production de biogaz (volume, composition) et analyser le digestat en sortie : taux de solides total (ST), taux de solides volatiles (SV), la demande chimique en oxygène (DCO), l'azote ammoniacal (taux d'ion NH_4^+), pH, conductivité, alcalinité, taux d'acide gras volatiles (AGV).

2.2. Activités

2.2.1. Tests d'enrichissement en CO_2

Au cours de cette première phase du projet, nos efforts se sont concentrés sur la mise au point du procédé d'enrichissement en CO_2 appliqué aux boues fraîches de STEP. Cela a impliqué la définition d'un protocole expérimental robuste, incluant le choix des conditions d'injection, des points de prélèvement et des paramètres de suivi. Parallèlement, une caractérisation systématique du substrat avant et après enrichissement a été réalisée afin d'évaluer l'impact réel du CO_2 sur les propriétés physico-chimiques des boues. Cette étape exploratoire nous a permis d'identifier les limites des paramètres initialement suivis, de valider la faisabilité de l'enrichissement, et de préparer les fondations méthodologiques pour les phases ultérieures du projet.

Les tests d'enrichissement ont été réalisés à partir d'un protocole simple (réacteur équipé d'un distributeur de gaz). Notre choix pour le réacteur s'est porté sur une cuve identique (géométrie, volume, système de brassage mécanique) aux digesteurs TANDEM utilisés pour les tests de digestion anaérobie. Cette cuve a ensuite été équipée d'un distributeur de gaz (diffuseur en titane cylindrique, TOPTITECH) de taille et géométrie adaptés à la cuve d'enrichissement. La cuve d'enrichissement est, par ailleurs, équipée d'une sonde à CO_2 dissous afin de mesurer la concentration en temps réel (Figure 2).

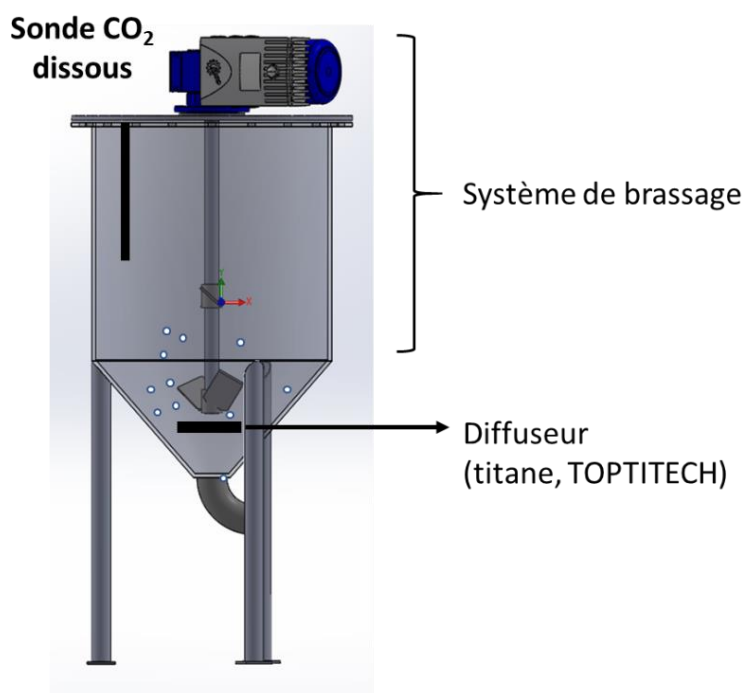


Figure 2 – Schéma du réacteur utilisé pour l'enrichissement en CO₂

Ce choix s'explique par l'efficacité de l'enrichissement effectué dans cette cuve comparé à d'autres protocoles (*Anna Nicolli, travail de Master*) et parce qu'il nous permet de travailler à la fois sur l'approche 1 (enrichissement du substrat) et sur l'approche 2 (enrichissement du réacteur).

Durant cette première partie du projet, nous avons ainsi mis au point la stratégie d'enrichissement du substrat pour atteindre les niveaux visés pour les tests de digestion anaérobie.

2.2.2 Tests de digestion anaérobie

La première phase du projet a également été consacrée à l'adaptation des digesteurs TANDEM afin de les rendre pleinement compatibles avec les objectifs expérimentaux. Pour cela, ils ont été équipés de nouvelles sondes de suivi – notamment des capteurs de CO₂ dissous, de potentiel redox (ORP) et de niveau – permettant un contrôle plus précis des conditions opératoires. La modification la plus significative a toutefois consisté en l'installation d'un système d'alimentation automatique, rendant possible un apport semi-continu de substrat, quotidien et régulier, sur l'ensemble de la semaine. Ce mode d'alimentation constitue un atout majeur pour assurer la stabilité du procédé et garantir la fiabilité des tests, en particulier lors de l'évaluation de nouveaux prétraitements ou procédés innovants (Figure 3).



Figure 3 – Evolution des digesteurs Tandem avant (photo de gauche) et après (photo de droite) mise à jour

Une représentation schématique détaillée de l'installation de digestion anaérobie est présentée en Annexe 1.

Les réacteurs ont étéensemencés avec de l'inoculum de la STEP d'Yverdon-les-Bains le 3 juin 2025. Durant la période de stabilisation (de juillet à la mise en service du système d'alimentation automatique (6 octobre 2025), nous avons évalué la cohérence des digesteurs entre eux, point essentiel pour la réalisation de tests en parallèle, et nous avons caractérisé les taux de CO₂ endogène et exogène dans les digesteurs afin de déterminer dans quelle mesure l'enrichissement du substrat en CO₂ peut être réalisé sans risque pour le digesteur (dilution du biogaz, acidification).

Critères de stabilité et de cohérence des digesteurs TANDEM

Divers critères peuvent être établis pour déterminer l'égalité des performances et les conditions d'équilibre des expériences de digestion anaérobie en continu ou semi-continu. Sur la base des travaux de Lippert et al., (2020), Muntau et al., (2021), qui travaillent également sur l'enrichissement en CO₂ pour améliorer le rendement en méthane de la matière organique, ont établi les critères suivants :

- 1) Un écart-type relatif maximal de 15 % de tous les paramètres mesurés pour chacun des réacteurs pris individuellement, et
- 2) Une différence moyenne journalière en pourcentage entre le réacteur essai et le réacteur contrôle inférieure à 10 % pour tous les paramètres mesurés.
- 3) Les critères définis sont testés pour toutes les variables mesurées, à savoir dans le cadre de ce projet : l'ORP, le pH, la température, le taux de CO₂ dissous, l'élimination des solides volatiles, la teneur en CH₄ dans le biogaz et le rendement en méthane.



Conformément à l'approche suivie dans le projet CONRAD I, nous avons choisi, dans le cadre du projet CONRAD II, d'appliquer des critères différenciés pour les différents paramètres que nous mesurons. Les critères minimaux d'équilibre suivants ont ainsi été définis pour la phase de stabilisation et devront prévaloir pendant au moins un temps de rétention hydraulique (Tableau 2).

	Digesteur individuel	Comparaison essai/contrôle
pH	5%	5%
ORP	10%	10%
T (°C)	5%	5%
CO₂ dissous (mg/L)	10%	10%
Teneur en méthane (%)	5%	5%
Volume de méthane (L)	10%	10%
rendement en méthane (L)	10%	10%
Réduction des solides volatiles	10%	10%

Tableau 2 : Critères de stabilité interne et de cohérence inter digesteurs.

En pratique, de tels critères ne peuvent être utilisés et respectés qu'une fois l'alimentation en mode semi-continu, 7/7 jour mise en place mais ils nous ont également guidés dans la phase d'alimentation discontinue (5/7 jours). Par ailleurs, l'application de ces critères implique un contrôle rigoureux de la matière organique qui entre et sort du digesteur.

2.3. Résultats et discussion

2.3.1. Importance de la stabilité du substrat en entrée pour les essais de digestion anaérobie

Pour garantir la fiabilité et la reproductibilité des essais de digestion anaérobie, il est essentiel de disposer d'un substrat d'alimentation dont la composition reste la plus constante possible. En effet, la stabilité des paramètres physico-chimiques en entrée du digesteur conditionne directement la stabilité des processus microbiens internes, notamment l'hydrolyse, l'acidogénèse et la méthanogénèse. Des variations importantes de la matière entrante (teneur en matière sèche, charge organique, présence de cosubstrats ou de graisses) peuvent entraîner des fluctuations de performance, des phénomènes d'inhibition — en particulier vis-à-vis de l'ammoniac — ou des instabilités du pH ou du rapport FOS/TAC. Ainsi, la maîtrise de la qualité et de l'homogénéité du substrat constitue un prérequis indispensable pour évaluer de manière rigoureuse l'effet de conditions opératoires ou de prétraitements dans le cadre d'un protocole expérimental en digestion anaérobie.

Depuis le début du projet, 31 lots de boues fraîches ont été prélevés à la STEP afin d'évaluer leur composition et leur aptitude à l'enrichissement en CO₂ et à la digestion anaérobie. L'analyse de ces lots a mis en évidence une variabilité importante, en particulier pour les prélèvements réalisés le lundi, qui présentaient fréquemment une faible concentration en matière organique digestible. À partir de septembre, et afin d'assurer une meilleure stabilité du substrat, nous avons donc décidé de ne plus réaliser



de prélèvements le lundi et de privilégier d'autres jours de la semaine garantissant une qualité de boues plus constante et réduisant le nombre de lots non conformes pour les tests de digestion anaérobie (Tableau 3). En éliminant les lots non conformes (25%), il serait encore possible de réduire encore le coefficient mais la charge de travail et la logistique que cette pratique impose est difficilement gérable. Cette variabilité de la matière entrante a des conséquences pour la digestion anaérobie qui seront discutées à la section suivante.

Date de prélèvement	MS (%)	SV (%)	gSV/100g _{MF}
10.06.2025	4,40	63,20	2,8
16.06.2025	5,70	66,50	3,8
23.06.2025	7,30	68,70	5,0
30.06.2025	6,80	71,80	4,9
07.07.2025	3,20	69,40	2,2
14.07.2025	5,20	71,70	3,7
21.07.2025	2,00	68,20	1,4
22.07.2025	4,60	70,10	3,2
28.07.2025	6,20	67,60	4,2
04.08.2025	5,60	70,00	3,9
11.08.2025	5,50	71,30	3,9
18.08.2025	3,50	70,10	2,5
26.08.2025	3,50	72,70	2,5
28.08.2025	5,20	70,10	3,6

Moyenne 3,4
Ecart type 1,1
Coefficient de variation 31%

Date de prélèvement	MS (%)	SV (%)	gSV/100g _{MF}
01.09.2025	5,60	71,60	4,0
08.09.2025	5,40	68,00	3,7
11.09.2025	4,90	68,80	3,4
15.09.2025	6,60	71,20	4,7
23.09.2025	5,50	70,90	3,9
29.09.2025	5,40	70,10	3,8
03.10.2025	5,20	71,70	3,7
07.10.2025	6,00	70,40	4,2
14.10.2025	5,30	72,50	3,8
17.10.2025	6,10	72,30	4,4
24.10.2025	5,80	68,30	4,0
28.10.2025	4,30	69,20	3,0
05.11.2025	5,50	63,30	3,5
11.11.2025	4,30	67,80	2,9
14.11.2025	6,10	66,40	4,1
21.11.2025	7,00	71,00	5,0

Moyenne 3,9
Ecart type 0,5
Coefficient de variation 13%

6	Lots à faible concentration en VS	43%
1	Lots à forte concentration en VS	7%
7	Lots conformes	50%

3	Lots à faible concentration en VS	19%
1	Lots à forte concentration en VS	6%
12	Lots conformes	75%

Tableau 3 : Suivi de la teneur en matière sèche (MS) et en solide volatiles (SV) des substrats

Importance du pH initial des boues pour l'enrichissement en CO₂

Le pH initial des boues est un paramètre déterminant pour l'efficacité de l'enrichissement en CO₂. Comme l'acidification induite par le CO₂ dépend de la valeur de pH de départ et de la capacité tampon du milieu, des boues déjà acides réagissent peu, tandis que des boues au pH plus élevé montrent une réponse plus marquée. Le pH d'entrée doit donc être pris en compte pour interpréter correctement l'impact du CO₂ sur les propriétés des boues. Durant les sept premiers mois de prélèvements (avril-octobre), les boues présentaient un pH faible et stable (≈5,6). À partir d'octobre, une augmentation du pH a été observée, pour atteindre en moyenne 6,3 (Figure 4). Cette variabilité du pH a déjà été mise en évidence lors du projet CONRAD I mais les échanges avec la STEP d'Yverdon-les-Bains n'ont, pour l'heure, pas permis d'en identifier la cause. Avec des boues présentant déjà un pH faible, la marge d'acidification induite par le CO₂ est restée limitée, ce qui a peut atténuer l'ampleur des effets observés.

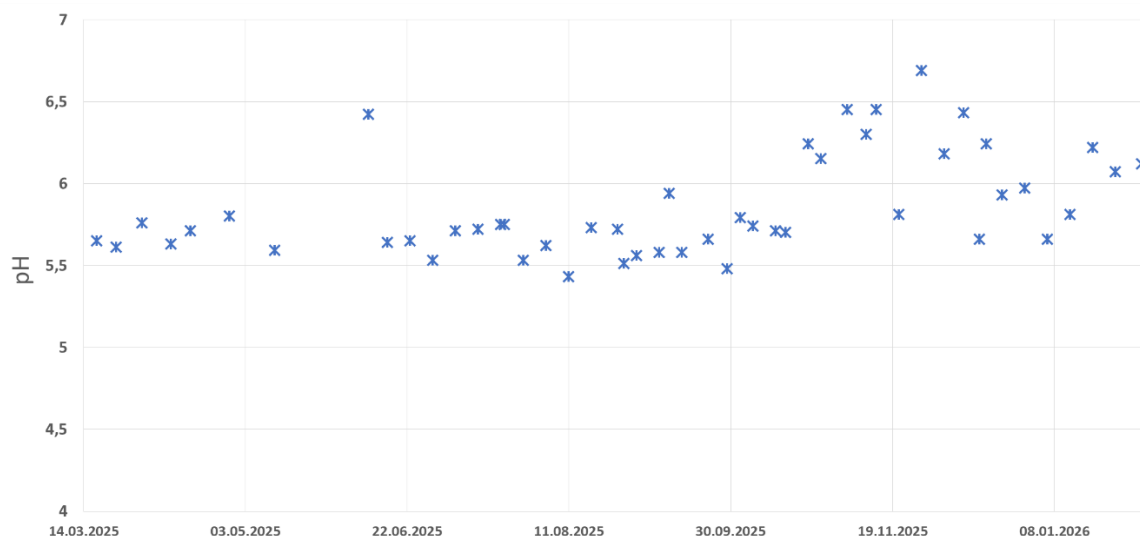


Figure 4: Evolution du pH des substrats (Mars 2025 - Janvier 2026)

Importance du taux de CO_2 dissous initial

Dans le cadre de la caractérisation des boues de STEP, la concentration en CO_2 dissous a été mesurée en sortie de station, avec une valeur moyenne de $660 \pm 120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($N = 18$). Bien que des différences entre échantillons aient été observées, les tendances restent difficiles à établir à ce stade. Néanmoins, la prise en compte de ce CO_2 est essentielle pour le projet, car il influence directement les équilibres carbonatés et la stabilité du procédé de digestion anaérobie. Par ailleurs, ce CO_2 endogène constitue un paramètre clé pour interpréter correctement les effets du procédé d'enrichissement en CO_2 , dont l'impact peut être partiellement masqué ou amplifié par la variabilité du CO_2 déjà présent dans les substrats.

2.3.2 Tests de digestion anaérobie

Stabilisation et cohérence des digesteurs des digesteurs

Les premiers mois de fonctionnement des digesteurs TANDEM ont été marqués par diverses avaries qui ont ralenti leur stabilisation. Le digesteur 1, victime d'une fuite au niveau du manomètre en septembre n'a retrouvé son niveau de production normal que mi-décembre. Depuis les digesteurs TANDEM ont montré une bonne cohérence en termes de production de biogaz, avec un écart relatif inférieur à 10% (Figure 5), attestant d'un comportement globalement comparable.

Au cours des dernières semaines, les digesteurs TANDEM ont ainsi présenté une bonne cohérence, mais la stabilité de la production d'une semaine à l'autre n'est pas encore atteinte, avec des écarts relatifs supérieurs régulièrement supérieurs à 10 %. Cette variabilité est principalement attribuable aux fluctuations de la matière entrante, en particulier à la concentration en solides volatiles, particulièrement marquées ces dernières semaines. Dans ces conditions, il apparaît difficile d'imposer un critère de stabilité plus strict que la variabilité intrinsèque du substrat, ce qui plaide pour une interprétation plus souple du seuil actuellement fixé. En parallèle, un échange avec la STEP afin de mieux anticiper ou lisser les



variations de l'alimentation pourrait contribuer à améliorer la stabilité du système et à affiner les critères d'évaluation pour la suite du projet.

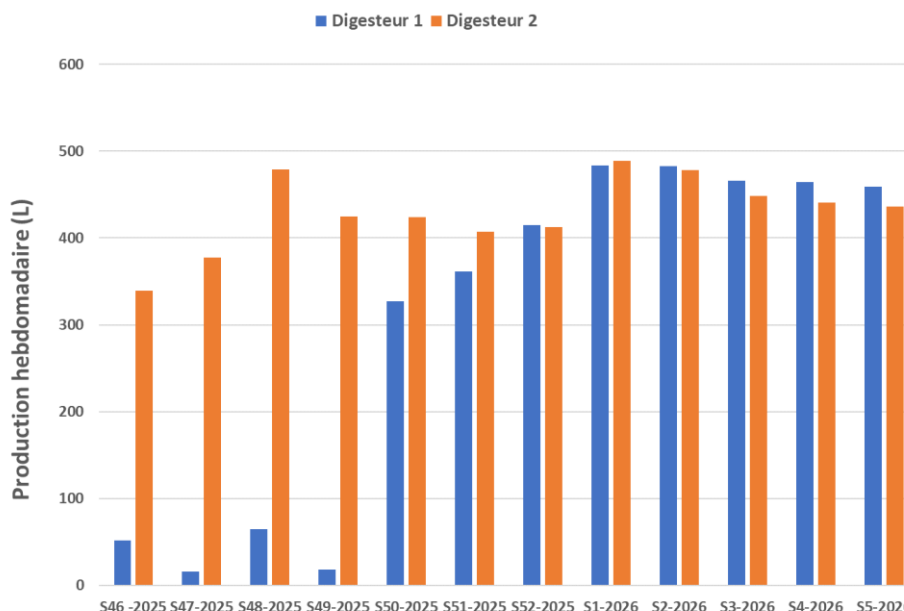


Figure 5 : Suivi de la production hebdomadaire des digesteur tandem (10/11/2025 au 01/02/2026)

Afin d'améliorer la stabilité de fonctionnement des digesteurs TANDEM, de réduire les sources de variabilité opérationnelle et de rapprocher leur mode d'exploitation de celui observé au sein du digesteur de la STEP, plusieurs adaptations techniques ont été identifiées et sont en cours de mise en œuvre. La première mesure envisagée consiste à équiper les deux digesteurs de pompes d'alimentation identiques. En l'état actuel, les pompes utilisées présentent des modes de fonctionnement différents, ce qui génère des irrégularités dans l'alimentation et complique les phases de montée en charge, introduisant ainsi une source supplémentaire de variabilité entre les réacteurs. L'utilisation de pompes similaires permettra de standardiser l'alimentation, de simplifier l'exploitation et de renforcer la comparabilité des digesteurs. Par ailleurs, une troisième pompe sera dédiée à la mise en place d'un système de vidange automatique, permettant le retrait du digestat sans imposer de longues phases de dépression. Cette évolution devrait contribuer à réduire les épisodes de dégazage observés ponctuellement des derniers mois et à stabiliser davantage les conditions opératoires, en particulier pour le maintien du CO₂ dissous.

La cohérence entre les digesteurs TANDEM et le digesteur de la STEP d'Yverdon-les-Bains, ainsi que la transférabilité des résultats à l'échelle industrielle, constituant des enjeux centraux du projet CONRAD II, nous avons entrepris une analyse critique de nos pratiques de laboratoire. Cette démarche vise à identifier dans quelle mesure certaines procédures expérimentales — notamment celles liées à l'alimentation, au stockage des substrats, au brassage ou aux modes d'exploitation — peuvent influencer le comportement des digesteurs TANDEM et contribuer, le cas échéant, à l'apparition de différences par rapport au fonctionnement du digesteur de la STEP. Cette analyse est une étape indispensable pour distinguer les effets propres au procédé étudié de ceux induits par les conditions expérimentales, et ainsi renforcer la robustesse et la transférabilité des conclusions du projet.



2.3.3 Impact des pratiques de laboratoire sur la cohérence du projet

Dans le projet CONRAD I, nous avons démontré l'efficacité du procédé dans un digesteur fonctionnant à pH élevé (≈ 8). Dans le cadre de ce projet, l'objectif est au contraire de travailler à un pH plus faible, compris entre 7,2 et 7,5, et de le maintenir proche de celui observé à la STEP, afin d'améliorer la représentativité et la transférabilité des résultats. Cela a nécessité une analyse approfondie des conditions ayant conduit à l'établissement d'un pH élevé lors du premier projet. Nous avons initialement attribué ce comportement principalement à la congélation du substrat, aujourd'hui reconnue comme un véritable prétraitement, favorisant la libération d'ions NH_4^+ . Dans une moindre mesure, un effet du brassage pneumatique avait également été envisagé.

Toutefois, dans le présent projet mené sur des digesteurs TANDEM à brassage mécanique, une augmentation du pH associée à une diminution du CO_2 dissous a également été observée lors du passage à l'alimentation semi-automatique. Les investigations ont montré que le brassage des boues de STEP dans la cuve de stockage induit un dégazage important du CO_2 , tandis que le stockage prolongé (≈ 7 jours) s'accompagne d'un vieillissement biologique avec libération d'AGV et de NH_4^+ (Figure 6). L'association de ces phénomènes — appauvrissement en CO_2 , enrichissement en NH_4^+ et évolution de la fraction organique — favorise, une fois le substrat introduit dans le digesteur, la formation de NH_3 et conduit à une élévation du pH.

Ces mécanismes, généralement absents à l'échelle industrielle où les temps de stockage sont plus courts et la technologie de brassage différente, pourraient contribuer à expliquer certains écarts rapportés dans la littérature entre études de laboratoire et installations à grande échelle.

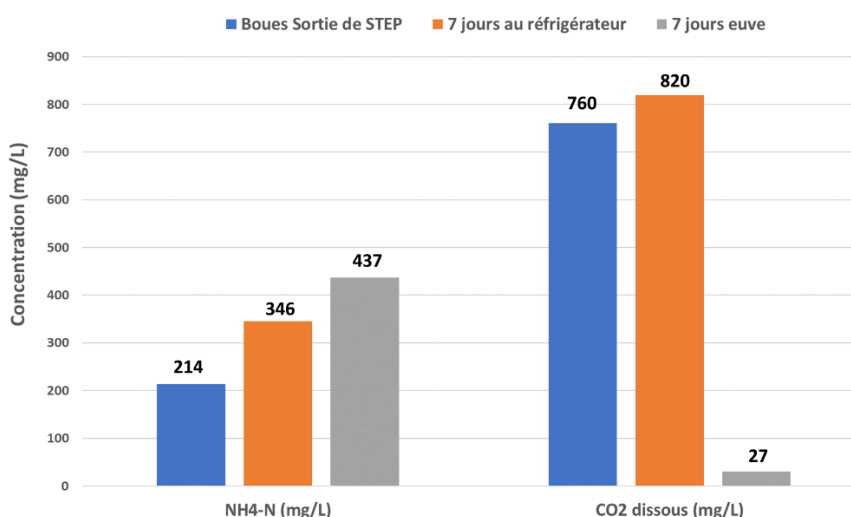


Figure 6 : Impact du stockage (en réfrigérateur ou en cuve réfrigérée brassée) des boues de STEP sur les taux d'ammonium et de CO_2 dissous



La mise en évidence de l'impact de certaines pratiques expérimentales a conduit à une révision des protocoles, en particulier à une réduction de la fréquence de brassage dans les cuves de stockage. Cette adaptation a permis de limiter le dégazage des substrats et donc les pertes de CO_2 en amont des digesteurs, avec pour conséquence une augmentation du CO_2 dissous et une diminution du pH dans les digesteurs TANDEM (Figure 7). Ces évolutions rapprochent les conditions opératoires de celles observées au sein du digesteur de la STEP et améliorent ainsi la comparabilité des systèmes.

Les protocoles sont actuellement ajustés afin de garantir que la concentration en CO_2 dissous ne diminue pas de plus de 50 % par rapport à sa valeur initiale, condition jugée nécessaire pour maintenir des équilibres physico-chimiques suffisamment stables et représentatifs. Dans ce nouveau contexte, une nouvelle analyse des communautés microbiennes apparaît opportune pour évaluer dans quelle mesure ces ajustements influencent la structure des populations et contribuent à réduire les écarts observés précédemment. L'objectif de cette démarche est non seulement de minimiser les différences avec le digesteur de la STEP, mais également, lorsque celles-ci persistent, d'en mieux comprendre les mécanismes et les implications sur le fonctionnement du procédé.

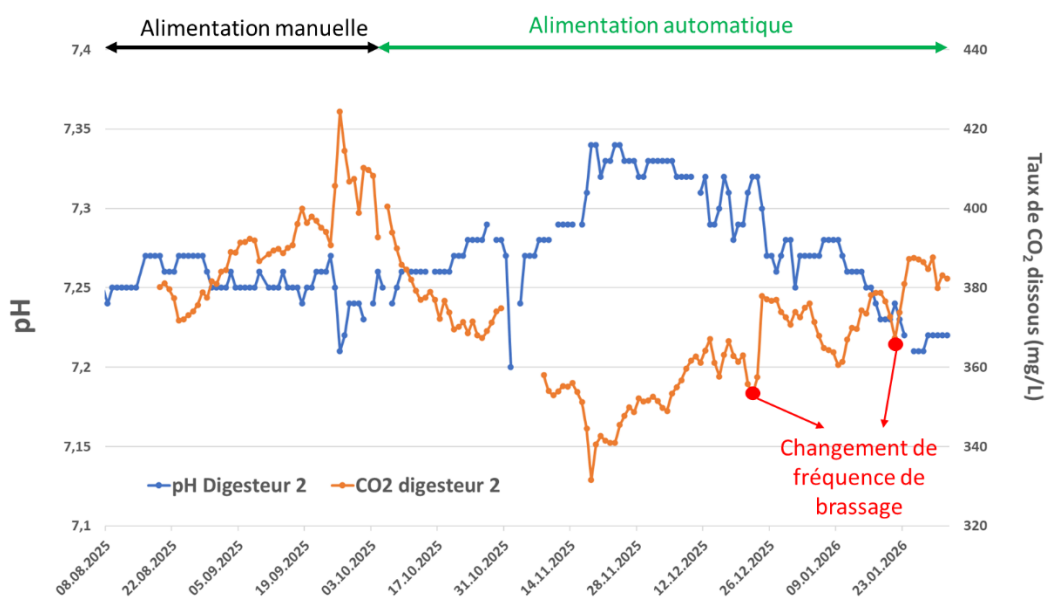


Figure 7 : Suivi du pH et de la concentration en CO_2 dissous dans le digesteur 2 (Août 2025 - Janvier 2026)

De faibles taux de CO_2 dans les boues de STEP utilisées en laboratoire font chuter les taux de CO_2 dissous dans les digesteurs et peut, du moins momentanément, faire baisser le taux de CO_2 dans le biogaz. Cependant, de tels substrats ne sont pas naturels car ils résultent de conditions expérimentales qui ne correspondent pas à la réalité des installations industrielles. Leur utilisation prolongée pour l'alimentation des digesteurs entraîne l'installation progressive de conditions peu favorables à la digestion anaérobie, notamment une hausse du pH et du taux d'ammoniac (NH_3) qui affecte la production de biogaz. Dans de telles situations critiques, l'enrichissement en CO_2 du digesteur s'est avéré pour rétablir des conditions bénéfiques (projet CONRAD I, Bardi et al., 2023). Ces résultats montrent l'importance



du CO₂ sous forme dissoute dans la digestion anaérobie et combien sa présence sous forme dissoute est essentielle aux équilibres chimiques et biologiques. Le CO₂ dissous est un paramètre encore rarement mesuré et peu étudié dans les procédés biologiques, alors qu'il influence directement le pH, l'alcalinité et plusieurs équilibres internes du digesteur.

Grâce à l'adaptation de nos protocoles expérimentaux, nous avons pu limiter significativement les pertes de CO₂ par dégazage, ce qui permet désormais d'alimenter les digesteurs avec des substrats présentant des teneurs en CO₂ plus représentatives de celles observées à la STEP. Dans ces conditions, le fonctionnement des digesteurs est stable, avec des valeurs de pH de 7,2 pour le digesteur 1 et de 7,3 pour le digesteur 2, proches de celles rencontrées dans les digesteurs industriels et situées dans l'intervalle dit de fonctionnement 6,8–7,5).

2.3.1. Enrichissement en CO₂ du substrat

Avec des digesteurs à pH= 7,2 - 7,3 les risques d'acidification du digesteur sous enrichissement en CO₂ apparaissent plus élevés que dans un digesteur à pH=8 mais de tels pH ne sont pas incompatibles avec une amélioration des performances de la digestion anaérobie via l'enrichissement en CO₂ si les conditions opératoires sont bien contrôlées. En effet, une baisse modérée du pH liée à l'enrichissement pourrait également traduire une utilisation effective du CO₂ au sein du digesteur, en lien avec les équilibres carbonatés et les voies métaboliques impliquées dans la méthanogénèse, et constitue donc un signal potentiellement positif, sous réserve d'un contrôle rigoureux des conditions opératoires, notamment grâce à l'approche d'enrichissement du substrat. A cet égard, il convient de noter que la plage préférentielle pour la méthanogénèse se situe entre 6,8 et 7,2.

À l'inverse, une augmentation marquée de la fraction de CO₂ dans le biogaz sans amélioration concomitante de la production de méthane ou de la réduction de la matière organique indique que le CO₂ injecté n'est pas ou peu métabolisé, mais essentiellement évacué sous forme gazeuse, ce qui se traduit par une dilution du biogaz et une perte d'efficacité du procédé. La maîtrise du procédé devra ainsi viser un équilibre fin entre l'activation des mécanismes biologiques favorables et la limitation des pertes de CO₂, afin d'optimiser les performances sans compromettre la stabilité du digesteur.

Faisabilité de l'enrichissement en CO₂

Injecter du CO₂ gazeux dans les boues de STEP afin qu'il se dissolve est un processus complexe car, contrairement à l'eau, les boues de STEP contiennent des particules solides qui augmentent la viscosité du milieu et des espèces chimiques et biologiques susceptibles d'influencer la solubilité du CO₂.

La difficulté d'enrichir les boues de STEP en CO₂ et de quantifier correctement la quantité de CO₂ exogène que l'on est capable de dissoudre tient aussi au fait que les boues contiennent initialement une concentration en CO₂ dissous non négligeable. Cette quantité peut être comprise entre 500 et 900 mg/L. L'ensemble des mesures et analyses statistiques que nous avons faites sur les boues indique une valeur moyenne de 650 mg/L à température ambiante. L'enrichissement en CO₂ dépend également de la température à laquelle on le réalise car la solubilité du CO₂ dissous varie - de 2160 mg/L à 1500 mg/L entre 13°C et 25°C, intervalle considéré ici.

Parmi tous les protocoles que nous avons pu tester, seuls les essais réalisés dans la cuve d'enrichissement avec brassage mécanique (voir section précédente) nous ont permis d'enrichir une quantité de boues suffisante (40L à 60 L) de manière homogène et avec possibilité de contrôler la quantité de CO₂ dissous.



Grâce à ce set up expérimental nous avons pu obtenir les courbes d'enrichissement en CO_2 présentée ci-dessous (Figure 8) qui montrent que la concentration finale (1820 mg/L) est proche de la saturation (2160 mg/L). Malgré un phénomène de dégazage une fois la matière organique sortie de la cuve, la concentration dans les boues se stabilise à 1320 mg/L et reste constante et homogène sur plusieurs jours sur l'ensemble des 60L de boues enrichies. On suppose que ce dégazage est dû à une légère surpression dans la cuve d'enrichissement qui permet de dissoudre un excès de CO_2 qui est libéré lors du retour à pression atmosphérique.

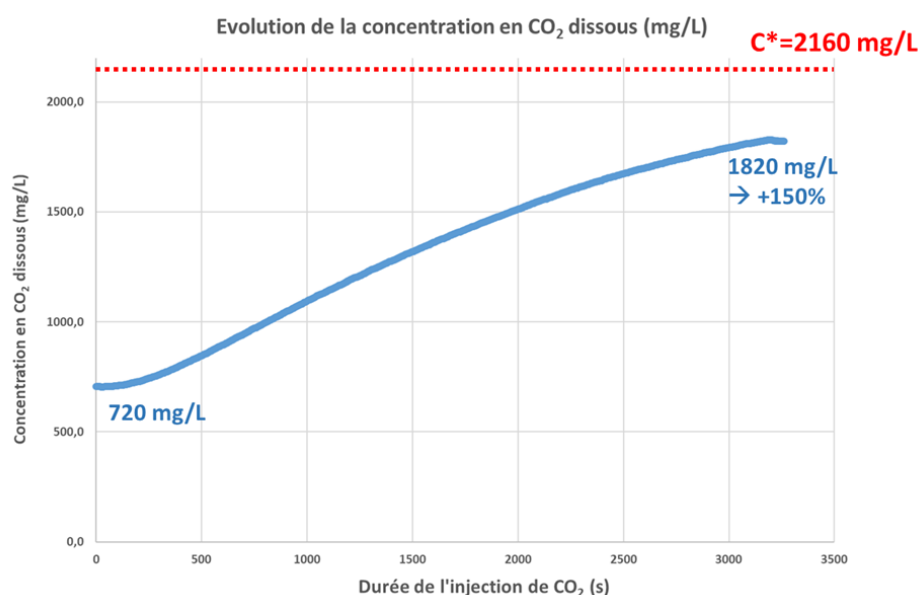


Figure 8 – Courbe d'enrichissement en CO_2 des boues de STEP (50 minutes, 4L/h)

À la suite des premiers résultats obtenus, nous avons développé un protocole d'enrichissement consistant à injecter du CO_2 dans 30 à 60 L de boues pendant 30 à 50 minutes à un débit de 4 L/h. Ce protocole, permet d'atteindre au minimum un doublement de la concentration en CO_2 dissous dans les boues par rapport à l'état initial, assurant ainsi un niveau d'enrichissement suffisant pour les essais de digestion anaérobie (Figure 9).

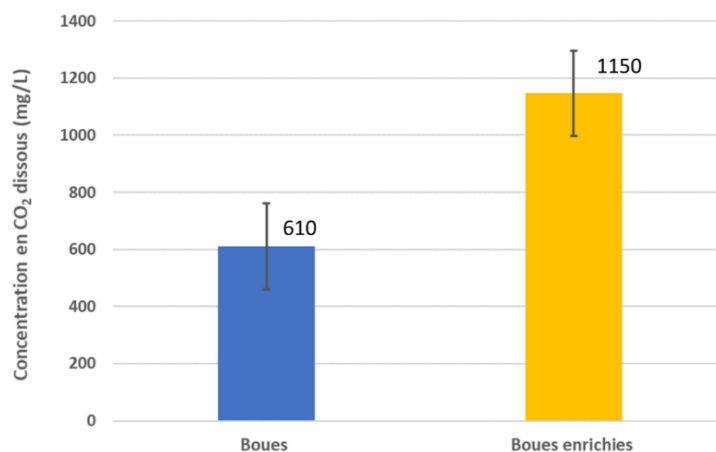


Figure 9 – Taux de CO₂ dissous moyen dans les boues et dans les boues enrichies (N=5)

3 Conclusions et perspectives

Transférabilité des résultats

Le premier objectif de ce projet consistait à travailler dans des conditions opératoires différentes de celles du projet CONRAD I, caractérisé par un pH élevé (≈ 8), trop éloignées de celles observées en STEP pour garantir une bonne transférabilité des résultats. Pour atteindre cet objectif, il a été nécessaire de mener une analyse approfondie de nos pratiques expérimentales afin d'identifier les facteurs susceptibles d'influencer les équilibres physico-chimiques du procédé et de les adapter en conséquence. Ces ajustements ont concerné principalement la gestion du stockage des boues en amont du digesteur, dont l'impact sur le CO₂ dissous, paramètre clé du procédé étudié, s'est révélé déterminant. Les modifications mises en œuvre permettent désormais d'alimenter les digesteurs TANDEM avec des boues dont la concentration en CO₂ dissous ne diffère que modérément de celle des boues utilisées en STEP, et de maintenir des valeurs de pH comparables. À ce titre, l'objectif initial visant à rapprocher les conditions de laboratoire de celles de la STEP peut être considéré comme atteint, fournissant une base solide et représentative pour la poursuite des travaux sur le procédé d'enrichissement en CO₂. Ces modifications garantissent en outre que nous pourrions maintenir une différence significative entre la concentration en CO₂ dissous de l'alimentation du digesteur contrôle et celle du digesteur test.

Faisabilité de l'enrichissement du substrat en CO₂

L'enrichissement du substrat, plutôt que l'injection directe de CO₂ dans le digesteur, constitue une approche plus maîtrisable, permettant de mieux contrôler les risques opérationnels associés à l'apport de CO₂, notamment les fluctuations locales de pH ou de redox. Nos travaux ont démontré la faisabilité de l'enrichissement en CO₂ des boues de STEP, en montrant qu'il est possible, de manière reproductible, de doubler la concentration en CO₂ dissous dans le substrat. Cette capacité à enrichir le substrat de façon contrôlée constitue une étape essentielle pour la suite du projet, puisqu'elle assure les conditions nécessaires pour évaluer de manière fiable l'impact du CO₂ exogène sur la digestion anaérobie et ouvre la voie à une éventuelle transposition en conditions réelles de STEP.



Enrichissement en CO₂ et tests de digestion anaérobie – Plan de mitigation

Au cours de cette première phase, nous avons établi et validé les dispositifs expérimentaux dédiés à l'enrichissement en CO₂ et à la digestion anaérobie, incluant la calibration des instruments et la mise en place de l'alimentation semi-automatique. Cette étape devait assurer des conditions opératoires. Cependant, les difficultés techniques rencontrées avec les digesteurs TANDEM, ont entraîné un certain retard dans l'avancement du projet. Dans le même temps, l'analyse approfondie de la matière entrante a mis en évidence que l'installation progressive d'un pH trop élevé, et donc de conditions de digestion insuffisamment représentatives de celles de la STEP, était principalement liée aux modalités de gestion et de stockage des substrats. Les ajustements apportés ont permis de corriger ce biais et de rétablir des conditions opératoires plus proches de la réalité industrielle. Ce travail a permis ainsi de remplir le premier objectif de transférabilité de nos résultats et autorise l'allègement des tests de digestion anaérobie prévus avec le digesteur à brassage pneumatique et mise en place d'un plan de mitigation. Ceci permet de limiter les impacts sur les objectifs globaux et de maîtriser le retard. Les essais d'enrichissement vont pouvoir débuter et la première campagne finira fin mai, après quoi, sur la base des résultats, un deuxième plan de mitigation sera proposé.

4 Coopération nationale et internationale

Aucune à ce jour.

5 Publications et autres communications

Présentation de l'avancement du projet dans le cadre du « 5. Forschungstag der Schweizer Gaswirtschaft – Transformation durch Innovation » du 5 novembre 2025

6 Bibliographie

Alimahmoodi, M., Mulligan, C. (2008). Anaerobic Bioconversion of Carbon Dioxide to Biogas in an Up-flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. *Journal of Air and Waste Management Association*, 58(1), 95-103.

Al-mashhadani, M. K. H., Wilkinson, S. J., & Zimmerman, W. B. (2016). Carbon dioxide rich microbubble acceleration of biogas production in anaerobic digestion. *Chemical Engineering Science*, 156, 24–35

Bajón Fernández Y, McAdam E, Soares A. et al. (2012) improving anaerobic digestion by carbon dioxide enrichment: increasing biogas production and carbon dioxide uptake. 17th European Biosolids and Organic Resources Conference.

Bajon Fernandez, Y., Soares, A., Villa, R., Vale, P., & Cartmell, E. (2014). Carbon capture and biogas enhancement by carbon dioxide enrichment of anaerobic digesters treating sewage sludge or food waste. *Bioresource Technology*, 159, 1–7.

Bajón Fernández Y, Soares A, Villa R et al. (2015) Carbon capture and biogas enhancement by carbon dioxide enrichment of anaerobic digesters treating sewage sludge or food waste. *Bioresource Technology* 2014;159:1–7.



- Bajón Fernández, Y., Soares, A., Koch, K., Vale, P., & Cartmell, E. (2017). Bioconversion of carbon dioxide in anaerobic digesters for on-site carbon capture and biogas enhancement – A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(17), 1555–1580. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1372001>
- Bajón Fernández Y., Soares A., Vale P. et al. (2019). Enhancing the anaerobic digestion process through carbon dioxide enrichment: initial insights into mechanisms of utilization. *Environ Technol.*, 2019 ;40, 1744–55.
- Bardi, M., Müller, F., Polag, D., Gabbiye Habtu, N., & Koch, K. (2025). The intriguing effect of CO₂ enrichment in anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 416, 131743. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132832>.
- Bardi, M., Müller, F., Polag, D., Gabbiye Habtu, N., & Koch, K. (2025). Threshold and recovery of anaerobic digestion under high ammonia stress: Influence of COD/NH₄⁺ ratio and CO₂ enrichment. *Biore-source Technology*. 10.1016/j.biortech.2025.132832.
- Castel, L., & Cazaudehore, G., et al., (2024). Pilot-scale study of CO₂ enrichment effects on anaerobic digestion performance. *Chemical Engineering Science*. 304. 121070. 10.1016/j.ces.2024.121070.
- Chicaiza-Ortiz, C., Zhang, P., et al. (2024). CO₂-enhanced methane production by integration of bamboo biochar during anaerobic co-digestion. *Journal of environmental management*. 373. 123603. 10.1016/j.jenvman.2024.123603.
- Koch K., Bajón Fernández Y, Drewes JE. et al. (2015) Influence of headspace flushing on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. *Bioresour Technol.* ;186:173–8.
- Koch K., Huber B., Bajón Fernández Y et al. (2016) Methane from CO₂: Influence of different CO₂ concentrations in the flush gas on the methane production in BMP tests. *Waste Management* 2016;49:36–9.
- Lippert, T., Bandelin, J., Xu, Y., Liu, Y.C., Robles, G.H., Drewes, J.E., Koch, K., (2020). From pre-treatment to co-treatment – how successful is ultrasonication of digested sewage sludge in continuously operated anaerobic digesters? *Renew. Energy* 166, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.128>.
- Mohd Yasin, Nazlina Haiza; Maeda, Toshinari; Hu, Anyi; Yu, Chang-Ping; Wood, Thomas K. (2015). CO₂ sequestration by methanogens in activated sludge for methane production. *Applied Energy*, 142(), 426–434.
- Muntau, M., Lebuhn, M., Polag, D., Bajón-Fernández, Y., Koch, K., 2021. Effects of CO₂ enrichment on the anaerobic digestion of sewage sludge in continuously operated fermenters, *Bioresource Technology*, Volume 332, 125147, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125147>
- Salomoni C, Caputo A, Bonoli M et al. Enhanced methane production in a two-phase anaerobic digestion plant, after CO₂ capture and addition to organic wastes. *Bioresource Technology* 2011;102:6443–8.
- Žalys, B., Venslauskas, K., Navickas, K., Buivydas, E., & Rubežius, M. (2023). The Influence of CO₂ Injection into Manure as a Pretreatment Method for Increased Biogas Production. *Sustainability*, 15(4), 3670. <https://doi.org/10.3390/su15043670>

7 Annexe

7.1. Représentation schématique détaillée de l'installation de digestion anaérobie tandem.

