

MÉTHODE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES TECHNOLOGIES POUR MAXIMISER LE POTENTIEL MÉTHANOGENÈ DES SUBSTRATS AVEC EXEMPLE D'APPLICATION AU NIVEAU INDUSTRIEL



Site Meth'Innov / crédit photo Naskeo

Avec la participation et le soutien de



Projet financé par



VOS CORRESPONDANTS NASKEO

Henry Fisgativa
Coordinateur R&D

Tél. : 06 24 35 74 00
henry.fisgativa@naskeo.com

DESTINATAIRES

Société : GrDF
Destinataire : Léo Benichou, Responsable R&D
/ innovation biométhane

Date : 08/04/2024

SOMMAIRE

TABLE DES MATIÈRES

Résumé graphique	5
Remerciements	5
À propos de NASKEO	5
1 Contexte	6
2 Développement de la méthodologie de test	7
2.1 Site de méthanisation adapté pour la mise en place de la méthodologie	7
2.1.1 Système en série :	7
2.1.2 Système en parallèle – Le système le plus pertinent :	7
2.1.3 Position du système de traitement :	8
2.2 Adaptation du site avec deux digesteurs en parallèle pour assurer le suivi détaillé de fonctionnent	8
2.2.1 Intégration du système de traitement sur le site de méthanisation	8
2.2.2 Suivi des tonnages des intrants	8
2.2.3 Suivi de la production de biogaz	9
2.2.4 Suivi des paramètres physico-chimiques des intrants et des digestats	9
2.2.5 Suivi de la consommation électrique	9
2.3 Définition des conditions de mise en place de test	10
2.3.1 Définition de la durée de période de test	10
2.3.2 Homogénéisation des cuves avant la période de test	10
2.3.3 Suivi des paramètres physico-chimiques	12
2.4 Pilotage des essais	14
2.4.1 Planning de suivi des tests	14
2.4.2 Mise en place des réunions de suivi des tests	14
2.5 Calcul d'incertitudes	16
2.5.1 Fiabilité des mesures liées aux équipements	16
2.5.2 Incertitudes sur la production de biogaz	16
2.5.3 Incertitudes sur les analyses en laboratoire	17
2.5.4 Incertitudes sur la consommation électrique	18
2.6 Analyse des performances	18
2.7 Mise en place d'une architecture de gestion de données	19
2.8 Traitement de la fin de test	19

3	<i>Application concrète du mode opératoire dans le cas du projet CH4+</i>	20
3.1	<i>Choix du site de méthanisation qui héberge le projet CH4+</i>	20
3.2	<i>Adaptations et modifications du site</i>	21
3.2.1	<i>Modifications pour le suivi de production de biogaz</i>	21
3.2.2	<i>Installation du système de prétraitement et de co-traitement</i>	24
3.2.3	<i>Suivi des tonnages des intrants</i>	25
3.3	<i>Conditions de mise en place du test</i>	26
3.3.1	<i>Définition de la durée de période de test</i>	26
3.3.2	<i>Homogénéisation</i>	26
3.3.3	<i>Suivi des paramètres physico-chimiques</i>	27
3.3.4	<i>Suivi de la consommation électrique</i>	31
3.4	<i>Pilotage des essais</i>	33
3.4.1	<i>Planning du projet CH4+ :</i>	33
3.4.2	<i>Différents niveaux de réunions établis dans le cadre du projet CH4+</i>	33
3.5	<i>Calcul d'incertitudes</i>	34
3.5.1	<i>Fiabilité des mesures liées aux équipements</i>	34
3.5.2	<i>Incertitudes sur la production de biogaz</i>	34
3.5.3	<i>Incertitudes sur les analyses en laboratoire</i>	35
3.5.4	<i>Incertitudes sur le calcul de la consommation électrique</i>	35
3.6	<i>Analyse des performances</i>	36
3.6.1	<i>Quantité d'intrants dans les méthaniseurs</i>	36
3.6.2	<i>Stabilité biologique</i>	37
3.6.3	<i>Production de biométhane supplémentaire</i>	38
3.6.4	<i>Composition du biogaz produit</i>	39
3.6.5	<i>Suivi de la consommation électrique</i>	40
3.7	<i>Acquisition des données</i>	42
3.7.1	<i>Architecture générale</i>	42
3.7.2	<i>Définitions des termes de l'architecture</i>	42
4	<i>Conclusions, retours d'expérience et perspectives</i>	46

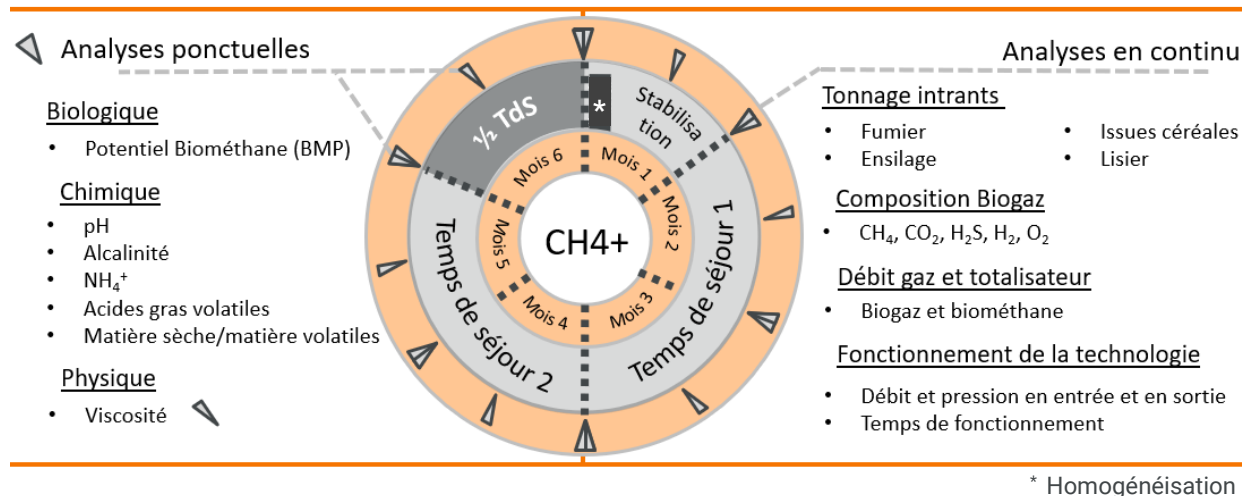
LISTE DES ILLUSTRATIONS

<i>Illustration 01 – Conduite d’un test R&D en série ou en parallèle</i>	7
<i>Illustration 02 – Schéma d’une procédure d’homogénéisation</i>	12
<i>Illustration 03 – Exemple de méthode d’échantillonnage</i>	13
<i>Illustration 04 – Schéma d’installation du site avant implémentation du projet CH4+</i>	20
<i>Illustration 05 – Schéma d’installation du site après modifications en lien avec le projet CH4+</i>	22
<i>Illustration 06 – Schéma d’installation du site durant la première phase du projet CH4+</i>	24
<i>Illustration 07 – Schéma d’installation du site durant les quatre dernières phases du projet CH4+</i>	25
<i>Illustration 08 – Numérotation des tas dans la fosse de stockage des intrants</i>	25
<i>Illustration 09 – Schéma d’installation du site montrant le circuit de transfert pour homogénéisation</i>	26
<i>Illustration 10 – Variation journalière de la hauteur (m) et du volume (m³) des cuves impliquées</i>	27
<i>Illustration 11 – Schéma détaillé avec points de prélèvement des échantillons (carrés bleus)</i>	27
<i>Illustration 12 – Consistomètre après ouverture de la trappe</i>	29
<i>Illustration 13 – Courbes de viscosité obtenues au laboratoire. T0 : initial. T5 : après 5 mois</i>	30
<i>Illustration 14 – Schéma électrique simplifié du site</i>	32
<i>Illustration 15 – Tonnage incorporé par mois</i>	36
<i>Illustration 16 – Exemple analyse graphique d’un paramètre biologique</i>	37
<i>Illustration 17 – Analyse moyenne / écart-type biologie</i>	38
<i>Illustration 18 – Exemple de suivi de la production/potentiel</i>	38
<i>Illustration 19 – Analyse de la moyenne et de l’écart-type pour la composition du biogaz</i>	39
<i>Illustration 20 – Exemple d’analyse graphique de la composition du biogaz</i>	40
<i>Illustration 21 – Exemple d’analyse graphique de la consommation électrique.</i>	41
<i>Illustration 22 – Architecture du système d’acquisition des données</i>	42
<i>Illustration 23 – Exemple d’affichage de la supervision</i>	43
<i>Illustration 24 – Capture d’écran du fichier de suivi exploitant</i>	43
<i>Illustration 25 – Exemple de rapport texte journalier</i>	44
<i>Illustration 26 – Capture d’écran de BiogazView</i>	44
<i>Illustration 27 – Capture d’écran de Quantum</i>	45
<i>Illustration 28 – Capture d’écran du fichier de suivi opérationnel CH4+</i>	45

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 – Exemple d’une procédure d’homogénéisation à 200 m³/h avec des cuves d’environ 2000 m³</i>	11
<i>Tableau 2 – Fréquence d’échantillonnage de la matière</i>	14
<i>Tableau 3 – Liste des bilans matière, gaz, énergétique et économique suivis</i>	18
<i>Tableau 4 – Liste des capteurs utilisés initialement présents sur site</i>	21
<i>Tableau 5 – Liste des capteurs implémentés spécialement pour le projet</i>	23
<i>Tableau 6 – Méthode de prélèvement des échantillons liquides selon points de prélèvements sur</i>	
<i>Illustration 11</i>	28
<i>Tableau 7 – Méthode de prélèvement des échantillons solides</i>	28
<i>Tableau 8 – Paramètres affectant l’exactitude des mesures avec le consistomètre</i>	29
<i>Tableau 9 – Planning d’échantillonnage</i>	31
<i>Tableau 10 – Paramètres affectant l’exactitude du calcul</i>	36

RÉSUMÉ GRAPHIQUE



REMERCIEMENTS

Les auteurs du livrable tiennent à remercier toutes les personnes ayant été impliquées directement ou indirectement dans la mise en place de la méthodologie et la rédaction du livrable. Merci à GRDF pour le financement accordé au travers de leur AAP « Prétraitements des intrants en méthanisation ». Merci notamment à Léo Bénichou, Toinou Frezouls et Pascal Rol pour leurs conseils durant la construction du document. Merci à Alice L'Hostis (ATEE-CTBM) et Hélène Carrere (INRAE-LBE) pour leurs apports et les relectures expertes. Merci à la Bpifrance pour avoir financé le projet CH4+. Merci à la direction de Meth'Innov, Vincent Touzot et à la genèse du projet Jacques Maroteix, pour l'hébergement de CH4+. Un grand merci aux équipes du site pour leur implication dans le bon fonctionnement des technologies et leur réactivité sans pareille, Anthony Fouet, Cédric Nivet. Un grand merci à Stéphane Durand le responsable du site pour son engagement dans ce projet.

À PROPOS DE NASKEO

Concepteur-constructeur des unités de méthanisation

NASKEO est une entreprise française, filiale du groupe **KEON**, spécialisée dans la méthanisation. Créée en 2005, elle accompagne les porteurs de projet de méthanisation, depuis l'étude de faisabilité jusqu'à la construction et la mise en service des unités. **NASKEO** compte à ce jour 90 méthaniseurs en exploitation en France et à l'international.

NASKEO est une filiale du groupe **KEON**, spécialiste français de la méthanisation. Il regroupe :

- TER'GREEN** (co-développeur et co-financier des projets de méthanisation),
- NASKEO** (concepteur, constructeur des unités de méthanisation),
- SYCOMORE** (partenaire technique des unités de méthanisation),
- TEIKEI** (expert local des déchets organiques : sourçage et approvisionnement)

Cette expertise et cette présence sur l'ensemble de la chaîne de valeur, permet à **KEON** d'accompagner les projets biométhane en France et dans le monde, de leur création jusqu'à leur exploitation optimale.

1 CONTEXTE

Maximiser la production de biogaz avec un même volume de substrat a été identifié comme l'un des leviers activables afin de maximiser la capacité de production de biométhane. L'utilisation de ces technologies permettrait de diminuer de 7 €/MWh le LCOE (*Levelized Cost of Energy* ou Coût Actualisé de l'Énergie) du biométhane en 3 à 5 ans ¹.

Les technologies d'augmentation de potentiel consistent en des techniques physiques, chimiques ou biologiques appliquées sur les matières premières avant leur intégration dans le digesteur (prétraitement) ou pendant leur séjour, à travers une boucle de recirculation (co-traitement). L'objectif principal de ces technologies est de favoriser la biodégradabilité des substrats afin d'améliorer leur rendement en termes de production de biogaz. D'un point de vue environnemental, ces technologies permettent de réduire l'empreinte carbone en améliorant l'efficacité de la transformation de la matière en énergie, en optimisant l'utilisation des ressources limitées.

Le couplage de la méthanisation à des techniques de prétraitement / co-traitement innovantes devrait connaître une expansion significative dans les années à venir. Cependant, la filière est confrontée à une limite majeure : la mise en place, le suivi et la démonstration de l'effet réel de technologies existantes à l'échelle industrielle.

En effet, les performances des technologies de prétraitement ou co-traitement de la matière organique sont principalement évaluées à l'échelle laboratoire / pilote mais l'extrapolation à l'échelle industrielle reste difficile car elle est dépendante des conditions de fonctionnement des sites de méthanisation². De ce fait, ces technologies ont du mal à se développer à l'échelle industrielle et à pénétrer le marché français. Pour mieux évaluer ces technologies à l'échelle industrielle, **NASKEO** a été retenu par l'appel à projet (AAP) de GrDF « Prétraitements des intrants en méthanisation » pour développer une méthodologie permettant de tester ces technologies à grande échelle, en intégrant les contraintes des conditions industrielles réelles.

Ce document décrit l'ensemble des moyens mis en œuvre dans le but de mener un test de prétraitement ou de co-traitement à niveau industriel avec une méthodologie reproductible et fiable, et des résultats concluants. En premier lieu, il aborde le principe de la méthodologie générale et les indicateurs retenus pour suivre les essais. En second lieu, il détaille les différentes façons utilisées pour mesurer les paramètres essentiels de suivi du projet (capteurs, analyses et calculs). Enfin, il expose la méthode employée pour analyser l'ensemble des données en intégrant les incertitudes des mesures.

Dans la 3^{ème} partie de ce document, un exemple concret d'application de la méthodologie dans le cas de l'un des tests du projet CH4+ est décrite. Le projet CH4+, piloté par Naskeo, vise à évaluer l'efficacité de 5 technologies de traitement des intrants directement à niveau industriel. Le projet CH4+ est financé par l'État dans le cadre du plan de relance et du programme d'investissements d'avenir.

¹ ENEA (2018) Renforcer la compétitivité de la filière biométhane française : Des nombres leviers activables à court et moyen termes. <https://www.enea-consulting.com/fr/publication/boosting-the-competitiveness-of-the-french-biomethane-sector/>

² Webinaire CTBM – Hélène CARRERE. Prétraitements pour la méthanisation : état de l'art. <https://atee.fr/evenement/webinaire-ctbm-pretraitements-pour-la-methanisation-etat-de-lart>

2 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODOLOGIE DE TEST

2.1 SITE DE MÉTHANISATION ADAPTÉ POUR LA MISE EN PLACE DE LA MÉTHODOLOGIE

Comme mentionné précédemment, les technologies de prétraitement ou co-traitement sur site permettent d'améliorer la biodégradabilité des matières premières utilisées dans le processus de méthanisation et par la suite de mieux exprimer leur potentiel méthanogène. Puisque l'extrapolation des résultats d'expériences à échelle de laboratoire n'est pas possible à échelle industrielle, la réalisation des tests R&D directement sur un site industriel devient indispensable. Ces tests permettent de vérifier directement la faisabilité technique et économique sur une échelle réelle, tout en gagnant en fiabilité.

Pour déterminer l'effet d'une technologie d'augmentation du potentiel directement sur un site de méthanisation, il est nécessaire de comparer les performances observées en absence (**digesteur ou période témoin**) et en présence (**digesteur ou période test**) du traitement. L'expérience peut être réalisée dans un système en série (Illustration 01.a) ou en parallèle (Illustration 01.b) comme le montre le schéma ci-dessous.

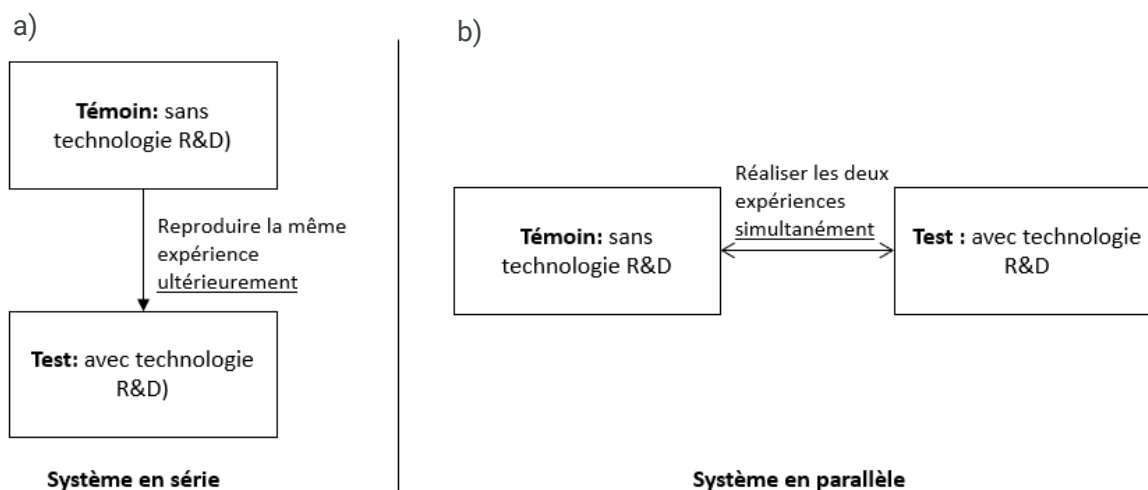


Illustration 01 – Conduite d'un test R&D en série ou en parallèle

2.1.1 Système en série :

Dans ce cas, la période de référence et la période de test se déroulent dans un laps de temps différent (Illustration 01.a). Cela implique des conditions environnementales et/ou opérationnelles variables pouvant affecter les résultats et rendre difficile la comparaison précise des performances. Par conséquent, une vigilance particulière doit être apportée à la variabilité saisonnière des intrants et des conditions climatiques (température, humidité, ensoleillement, ...). Dans le cas d'un seul digesteur, il est nécessaire à *minima* de fixer les périodes de référence et de test durant la même période de l'année afin d'avoir des expériences avec un minimum de reproductibilité et de significativité.

2.1.2 Système en parallèle – Le système le plus pertinent :

Dans ce cas, la période de référence et la période de test se déroulent simultanément (Illustration 01.b). Ce montage requiert deux lignes de digestion en parallèle. Durant l'expérience, ces lignes peuvent être alimentées avec des mix d'intrants identiques et être soumises à des conditions climatiques homogènes. Les lignes présenteront toujours quelques différences (usure technique

des agitateurs, exposition au vent et ensoleillement, ...), mais elles sont considérablement amoindries avec un suivi en parallèle.

Ce montage avec **deux digesteurs identiques en parallèle** permettra ainsi de suivre un « digesteur témoin » et un « digesteur test » sur la même fenêtre temporelle. La présente méthodologie préconise donc la réalisation des tests de prétraitement ou co-traitement avec une configuration en parallèle.

2.1.3 Position du système de traitement :

Le traitement de la matière organique peut se faire à différents niveaux du processus de méthanisation, notamment avant l'introduction de la matière dans les digesteurs (prétraitement) et pendant son temps de séjour dans le digesteur (co-traitement) à travers une boucle de recirculation.

2.2 ADAPTATION DU SITE AVEC DEUX DIGESTEURS EN PARALLÈLE POUR ASSURER LE SUIVI DÉTAILLÉ DE FONCTIONNEMENT

Pour être en mesure d'alimenter les bilans et les indicateurs de performances, il est indispensable de suivre étroitement les données d'intrants, du potentiel méthanogène et de la production de biogaz. Dans un premier temps, ce suivi permet d'identifier les performances de l'installation. De plus, il rend possible la détection rapide et en continu de problèmes de fonctionnement, permettant, en cas de dysfonctionnement, de prendre les mesures appropriées afin d'impacter le moins possible le déroulement de l'expérience. Des adaptations techniques et organisationnelles du site sont dans la plupart des cas nécessaires pour permettre le suivi détaillé de fonctionnement du site de méthanisation.

2.2.1 Intégration du système de traitement sur le site de méthanisation

Pour être en mesure d'intégrer le système de prétraitement ou co-traitement sélectionné sur un site de méthanisation en fonctionnement, il est indispensable de réaliser des **études d'ingénierie d'intégration détaillées**. Ces études permettront de concevoir un pilote industriel adapté au site de méthanisation, et de proposer des modifications du site pour permettre la bonne intégration du pilote.

Il est également important que les documents de conception ci-dessous soient produits par ces études d'ingénierie :

- Caractéristiques des équipements et des instrumentations
- PID (Piping and Instrumentation Diagram)
- Schéma et nomenclature électrique
- Plans d'implantation du démonstrateur (2D et 3D)
- Plans d'implantation sur site
- Cahier de charges (CDC) implantation hydrauliques et électrique sur site.

2.2.2 Suivi des tonnages des intrants

Le suivi du tonnage des intrants dans les deux digesteurs est essentiel pour comparer les performances, étudier les facteurs influents et renforcer la validité des résultats. En ayant la même alimentation, il devient possible d'examiner les différences de production, de composition de biogaz, de rendement énergétique, de dégradation des matières organiques, etc.

Il est possible de suivre la quantité journalière ajoutée d'intrants en se basant sur le pesage des camions, le poids du bol/trémie d'incorporation, le débit des pompes d'incorporation ou sur le pesage du grappin selon la technologie présente sur site.

Si l'un des substrats n'est pas suivi avec précision, par exemple avec une incorporation de 2 types de substrats en même temps ou absence de suivi spécifique d'ajout pour chaque digesteur, il sera nécessaire de modifier le système de pesage ou d'automatisme pour être en mesure de faire ce suivi détaillé.

2.2.3 Suivi de la production de biogaz

Afin de comparer les performances des digesteurs test et témoin, il est nécessaire de comparer leur production de biogaz respective. En cas de besoin, il est possible d'apporter des modifications au niveau du circuit du biogaz pour séparer les flux de chaque digesteur. Il faut également ajouter un débitmètre à la sortie de chaque digesteur afin de suivre la production de biogaz s'il n'est pas déjà présent. Il est également nécessaire d'ajouter un système d'analyse de la composition du biogaz pour quantifier le taux de biométhane de chaque digesteur. Il est aussi possible de suivre la quantité de CO₂, H₂, O₂ et H₂S dans chaque digesteur, si la technologie étudiée impacte ces composés.

Il est recommandé de prendre en compte la moyenne de production hebdomadaire des cuves plutôt que journalière. En effet, un suivi hebdomadaire permettra de lisser les fluctuations journalières éventuelles dans le but d'obtenir des indicateurs de performance représentatifs.

2.2.4 Suivi des paramètres physico-chimiques des intrants et des digestats

Il est nécessaire d'analyser les paramètres physico-chimiques des intrants et des digestats. Il s'agit d'un moyen de les caractériser, de suivre leur biodégradabilité et capacité à produire du biogaz et de méthane et de suivre les conditions de fonctionnement des digesteurs. Une caractérisation physicochimique (matière sèche (MS), matière volatile (MV), pH, acides gras volatils (AGV) et le potentiel méthanogène (BMP)) de chaque substrat avant et pendant le test est indispensable.

Il sera donc nécessaire d'adapter le fonctionnement du site pour être en mesure de prendre des échantillons de chaque substrat. Il faudra potentiellement ajouter des équipements de mesure sur site si cela s'avère nécessaire (four, balance, titrimétrie, viscosimètre, etc.).

2.2.4.1 Le cas particulier de l'analyse de la viscosité

La viscosité est un paramètre qui va être modifié par les traitements et donc un paramètre intéressant à suivre pour déterminer l'impact de l'expérience. Cependant, la mesure de la viscosité reste très complexe. En effet, sur des substrats comme les digestats de méthanisation, la structure est non homogène, avec des morceaux en flottation, ce qui empêche la plupart des techniques de mesure de la viscosité d'être réalisées (pales bloquées, variation des valeurs selon le type de flottants, etc.). Il est important de vérifier la répétabilité d'un test et la fiabilité d'une méthodologie ou d'un équipement afin de garantir les données obtenues.

Il est donc possible d'utiliser des systèmes de mesure simplifiés (longueur de l'écoulement sur une pente, diamètre du digestat après versement d'un volume fixe, etc.), si leur répétabilité a été validée (<5% d'écart de mesure sur le même échantillon).

2.2.5 Suivi de la consommation électrique

L'augmentation de la production du biométhane grâce à l'ajout d'une ou de plusieurs technologies de prétraitement ou co-traitement n'est pas le seul élément à prendre en compte pour valider sa

performance et son efficacité. Il est également important de suivre les consommations électriques des équipements ajoutés permettant d'identifier les éventuelles réductions de consommation liées à la baisse de la viscosité du milieu.

Par conséquent, un système de suivi de la consommation électrique doit être installé sur les équipements en lien avec le traitement (équipements du pilote, pompes et broyeurs alimentation les digesteurs, agitateurs des digesteurs).

2.3 DÉFINITION DES CONDITIONS DE MISE EN PLACE DE TEST

2.3.1 Définition de la durée de période de test

À l'échelle laboratoire, les réacteurs CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor ou Réacteur à cuve agitée en continu) opèrent avec un mode de fonctionnement stable après 3 temps de séjours hydrauliques³. Les réacteurs CSTR offrent des performances de mélange efficaces dans un état stationnaire avec des propriétés uniformes. Ils sont donc utilisés en laboratoire pour des tests sur le procédé de digestion anaérobie. À niveau industriel, le renouvellement d'un digesteur en voie liquide se fait de la même manière qu'un réacteur de type CSTR. On pourrait ainsi estimer que le traitement a été totalement intégré dans le fonctionnement normal du digesteur après 3 temps de séjour, et en tirer par la suite des conclusions sur son efficacité.

Dans la pratique, à l'échelle industrielle, mettre en place un test sur 3 temps de séjour peut s'avérer difficile étant donné les divers événements d'exploitations et d'interventions liés au fonctionnement quotidien d'une installation de méthanisation. Pour cela, des tests **d'au moins 2 temps de séjour** pourraient être envisageables et suffisants. Dans tous les cas, il sera hautement difficile de conclure sur l'impact réel du traitement par rapport aux variations des intrants ou des différents événements d'exploitation avec des tests réalisés sur moins de 2 temps de séjour. Un temps de séjour peut s'étendre entre 20 à 120 jours. À titre d'exemple, le temps de séjour dans notre cas s'élève à 60 jours, imposant une durée d'expérience de 5 mois consécutifs.

2.3.2 Homogénéisation des cuves avant la période de test

Comme indiqué précédemment, la présente méthodologie préconise la réalisation des tests de traitement dans des digesteurs en parallèle, pour réduire l'impact des variations des intrants et des conditions climatiques. Cependant, le contenu préalable des deux digesteurs peut être très différent. Une étape d'homogénéisation pré-expérimentale est donc essentielle pour s'assurer que les digesteurs en parallèles montrent un fonctionnement équivalent avec un état biologique similaire.

Si cette homogénéisation n'est pas réalisée, les éventuelles différences observées à travers les résultats des tests pourraient être liées à l'hétérogénéité initiale des digesteurs conduisant à attribuer des conclusions erronées quant aux performances des prétraitements ou co-traitements. Pour mener à bien cette homogénéisation, l'idéal serait de **mélanger la moitié du contenu d'un digesteur avec la moitié du contenu de l'autre digesteur**.

Dans la pratique, il est impossible de vider la moitié des 2 cuves et de les réintroduire dans l'autre cuve sans avoir 2 cuves de taille équivalente vides disponibles. Il est donc admis dans la méthodologie que le mélange soit réalisé à l'aide d'une 3^{ème} cuve, notamment le post-digesteur,

³ <https://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2004/04txtPVerte/12pv.pdf>

une cuve à lisier (vide) ou une cuve de préparation vide. Dans le cas d'utilisation du post-digesteur, les 3 cuves seraient homogénéisées, augmentant légèrement le taux de matière sèche dans le post-digesteur et son taux de production de biogaz. Pour éviter tout impact sur la flore microbienne, il est indispensable de réaliser cette opération dans des cuves fermées pour conserver des conditions anaérobies.

Attention : l'homogénéisation est une intervention qui doit être réalisée en totale concordance avec l'opérateur du site et selon ses besoins de fonctionnement de l'unité. L'idéal est de réaliser cette opération à un moment où il n'y a pas d'incorporation, pendant le week-end ou pendant un arrêt d'incorporation programmé dans le cadre d'une autre intervention sur site. L'homogénéisation nécessitera l'utilisation d'équipements centraux de l'installation (pompe de transfert notamment) pendant un ou deux jours. Sur le Tableau 1, il est montré un exemple de fonctionnement sur une journée entière nécessaire pour homogénéiser des cuves de 2000 m³ avec une disponibilité de pompage à 200 m³/h.

Tableau 1 – Exemple d'une procédure d'homogénéisation à 200 m³/h avec des cuves d'environ 2000 m³

Cuve source	Cuve réceptrice	Volume transféré (m ³)	Temps de transfert	Heure de démarrage	Heure de finalisation
Digesteur Témoin	Post-Digesteur	500	2h30	7h00	9h30
Digesteur Test	Digesteur Témoin	500	2h30	9h30	12h00
Post-Digesteur	Digesteur Test	500	2h30	12h00	14h30
Digesteur Test	Post-Digesteur	500	2h30	14h30	17h00
Digesteur Témoin	Digesteur Test	500	2h30	17h00	19h30
Post-Digesteur	Digesteur Témoin	500	2h30	19h30	22h00

Une fois l'homogénéisation réalisée, une **période de stabilisation d'environ un demi-temps de séjour** est suffisante afin d'assurer des conditions similaires dans les deux digesteurs. Cette étape nécessaire entre chaque test remet à zéro l'éventuel effet de la technologie testée. Elle permet de confirmer que les deux méthaniseurs fonctionnent de façon similaire et qu'ils peuvent par la suite être comparés pour mettre en évidence l'effet de la technologie.

Durant la période de stabilisation, les deux digesteurs sont alimentés avec la même ration d'intrants. L'efficacité de l'homogénéisation est vérifiée sur toute la période de stabilisation au travers :

- D'analyses biologiques des digestats (analyses MS/MV, AGV, pH et d'azote total). **La différence entre les résultats des deux cuves ne devrait pas excéder les 5%** pendant la période de stabilisation (5% étant l'erreur courante sur ces analyses de laboratoire).
- La différence de production de biogaz **ne devrait pas excéder les 5%** pendant la période de stabilisation.

En théorie, si la MS des digestats est similaire, la production de biogaz devrait également être semblable. Le suivi de ces deux paramètres en phase de repos permet de valider l'exactitude des conditions initiales de test. En théorie, si la MS des digestats est similaire, la production de biogaz devrait également être semblable. Le suivi de ces deux paramètres en phase de repos permet de valider l'exactitude des conditions initiales de test. Dans le cas où ces conditions ne sont pas vérifiées, une nouvelle homogénéisation devrait être réalisée avant de lancer une expérience (Illustration 02).

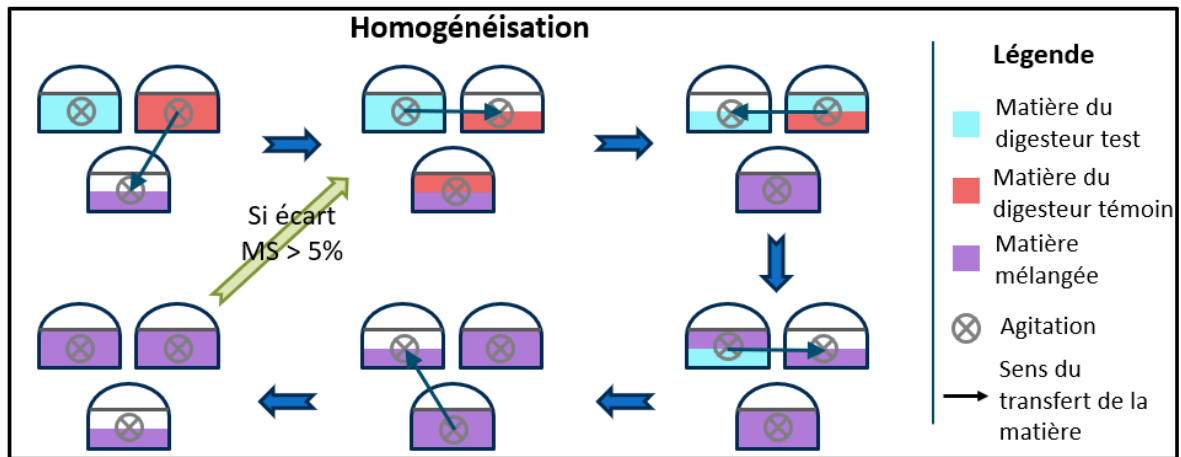


Illustration 02 – Schéma d'une procédure d'homogénéisation

2.3.3 Suivi des paramètres physico-chimiques

Les principaux paramètres physico-chimiques à suivre sont :

- Potentiel méthanogène (BMP)
- MS/MV
- AGV total et détaillés
- Alcalinité/pH
- FOS/TAC
- NH_4^+
- Viscosité

Ces analyses sont effectuées dans les temps recommandés sur les substrats initiaux, les contenus du digesteur témoin et test, ainsi que les digestats en sortie et en entrée (dans le cas de l'utilisation d'une boucle de recirculation) du traitement mis en place (Tableau 2).

Afin de garantir la représentativité des résultats des analyses, il est important qu'une méthodologie adaptée et précise soit mise en place pour l'échantillonnage. Pour les échantillons solides, il est conseillé d'utiliser une méthode d'échantillonnage adéquate (exemple : méthode du quartage, pelletage, autre) (Illustration 03).

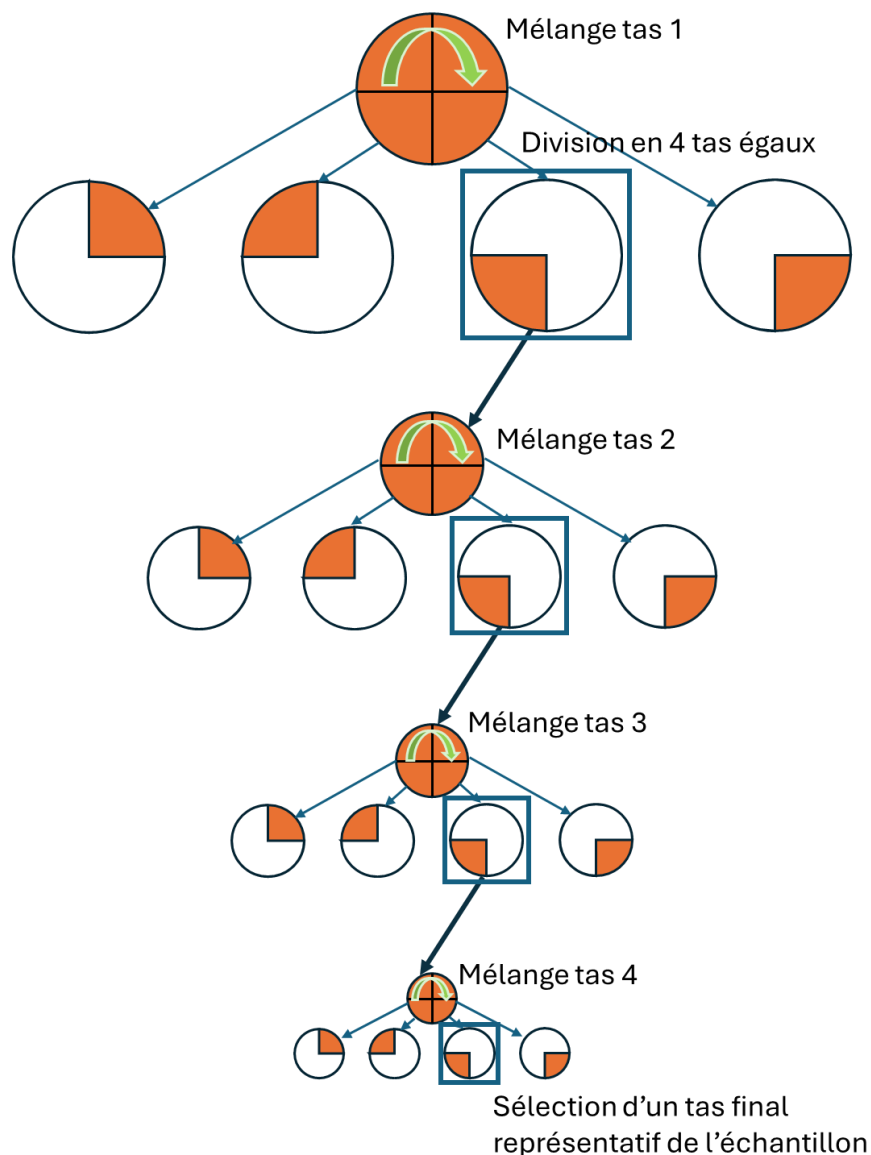


Illustration 03 – Exemple de méthode d'échantillonnage

La fréquence d'analyse va dépendre de la durée du test, du type des substrats à suivre et du budget alloué. Il est conseillé de faire un suivi des paramètres ci-dessus au moins au début et à la fin du test. Il est suggéré, dans la mesure du possible, de faire à *minima* une analyse complète à la fin de chaque temps de séjour, et une analyse partielle des paramètres les plus variables (AGV, alcalinité) chaque demi-temps de séjour. Dans la pratique, pour un temps de séjour entre 45 et 60 jours, des analyses complètes pourraient être réalisées chaque mois et des analyses partielles toutes les deux semaines (Tableau 2). S'il est possible de réaliser des analyses avec une fréquence plus rapprochée ou d'installer des instruments de mesure sur site (four, titrimétrie, etc.), cela apportera encore plus de précision aux résultats des tests

Tableau 2 – Fréquence d'échantillonnage de la matière

	BMP	MS/MV	AGV détaillé	Alcalinité/pH	NH4+	Oligo	Viscosité
Substrat initial	Début test	Tous les ½ temps de séjour	Pas d'analyse		Début test	Pas d'analyse	
Digesteur 1	Début et fin du test	Tous les ½ temps de séjour	Tous les ¼ temps de séjour		Tous les ½ temps de séjour	Début test	Tous les ¼ temps de séjour
Digesteur 2	Début et fin du test	Tous les ½ temps de séjour	Tous les ¼ temps de séjour		Tous les ½ temps de séjour	Début test	Tous les ¼ temps de séjour
Post-digesteur	Pas d'analyse	Début, milieu et fin test				Pas d'analyse	
Entrée traitement	En début, milieu et fin test	Tous les ½ temps de séjour	Tous les ¼ temps de séjour		Tous les ½ temps de séjour		Tous les ¼ temps de séjour
Sortie traitement	En début, milieu et fin test	Tous les ½ temps de séjour	Tous les ¼ temps de séjour		Tous les ½ temps de séjour		Tous les ¼ temps de séjour

2.4 PILOTAGE DES ESSAIS

2.4.1 *Planning de suivi des tests*

La réalisation d'un planning avant de se lancer dans un projet R&D est essentielle pour plusieurs raisons :

- **Organisation** : Il permet d'organiser toutes les étapes indispensables à la réalisation du projet et de planifier les ressources nécessaires.
- **Gestion du temps et anticipation** : Il permet de définir les délais pour chaque étape et chaque phase de test. C'est aussi un moyen de suivre l'avancement du projet et de détecter rapidement les éventuels retards.
- **Répartition des tâches** : Il permet de répartir les tâches entre les différents membres de l'équipe.
- **Communication et coordination** : Il peut être utilisé comme un outil de communication et de coordination entre les différents départements impliqués dans la réalisation du projet.

2.4.2 *Mise en place des réunions de suivi des tests*

Il est indispensable également d'établir différents niveaux de réunion avant et pendant le suivi de test. Ci-dessous, des exemples des réunions à mettre en place :

2.4.2.1 *Kick-off meeting :*

- Participants : Équipe de pilotage du projet R&D et les responsables des services impliqués dans l'entreprise (commercial, mise en service, exploitation, etc.).
- Fréquence : une fois au début du projet
- Durée : 2h
- Objectif : Partager les aspects budgétaires et le planning avec les différents services, identifier les responsables des tâches et les ressources à allouer au projet.

2.4.2.2 Réunion de suivi en interne :

- Participants : Équipe de pilotage du projet R&D.
- Fréquence : hebdomadaire.
- Durée : 1h
- Objectif : suivi opérationnel, de fonctionnement et des performances du projet.

2.4.2.3 Réunion de communication avec l'exploitant :

- Participants : Ingénieur R&D et exploitant du site.
- Fréquence : hebdomadaire.
- Durée : 30 minutes
- Objectifs : Présentation des performances du test à l'exploitant, retour d'informations et d'événements d'exploitation pouvant impacter le test en cours, gestion logistique avec l'exploitant (livraisons, visites, échantillonnages, planning, etc.)

2.4.2.4 Comité de pilotage (COPIL) :

- Participants : Équipe de pilotage du projet R&D et les responsables des services impliqués dans l'entreprise (commercial, mise en service, exploitation etc.).
- Fréquence : Chaque 3-5 mois si plusieurs phases de tests. A la moitié et à la fin de la période de test si un seul essai.
- Durée : 2 h
- Objectif : Exposition de l'état d'avancement du projet, décisions sur les tâches à réaliser par service.

2.4.2.5 Autres réunions :

D'autres réunions peuvent également s'avérer nécessaires au cours du projet selon les besoins (réunion de résolution des problèmes, réunions de brainstorming, etc.,).

2.4.2.6 Lien étroit avec l'exploitation

Durant toute la période du test sur site, un suivi régulier des données est nécessaire afin de détecter rapidement les éventuels dysfonctionnements ou les variations dans le fonctionnement de l'unité pouvant impacter les résultats des tests. Ces données serviront par la suite comme support pour les points réguliers de l'équipe R&D concernée.

Ce suivi doit être accompagné d'échanges réguliers avec l'exploitant du site. Ces échanges devront être consignés dans un cahier de suivi pour la traçabilité. Ceci permettra de résoudre plus rapidement les éventuels problèmes techniques pouvant entraîner des pannes ou des interruptions de production. De plus, cette méthode rend possible l'identification des points d'amélioration afin d'assurer la bonne conduite de l'unité, et permet d'optimiser la performance du projet R&D hébergé sur son site de méthanisation.

Des déplacements fréquents sur site sont en outre indispensables car ils permettent d'anticiper les éventuelles failles en réalisant en permanence un calibrage des équipements et un contrôle de la tuyauterie. Cela a également pour but de minimiser les temps d'arrêts des tests et d'assurer une production continue et régulière de biogaz. Ces déplacements sont aussi l'occasion de réaliser des prélèvements d'échantillons de digestats et de gisements pour les analyses biologiques et physicochimiques et d'effectuer des tests de laboratoire réalisables sur site, notamment des tests de viscosité ou de MS.

2.5 CALCUL D'INCERTITUDES

Les sources d'erreur potentielles doivent être identifiées, contrôlées et prises en compte par la suite dans l'analyse des résultats. En effet, le calcul des incertitudes est essentiel pour déterminer la précision des mesures faites dans un test R&D. Cela permet de donner une estimation réaliste de la marge d'erreur associée aux données et de faire des conclusions plus fiables.

Il est indispensable de signaler que la qualité des gisements varie selon la saison, la température et les conditions d'approvisionnement. Certains intrants, même du même type, peuvent donc être plus méthanogènes que d'autres. Il est également indispensable d'intégrer les incertitudes de mesure des équipements utilisés pour suivre la production de biométhane et de consommation électrique.

2.5.1 Fiabilité des mesures liées aux équipements

2.5.1.1 Calibrage régulier

Les équipements doivent être calibrés régulièrement selon les recommandations du fabricant ou les normes en vigueur. En général, la fréquence de calibrage peut varier de quelques jours à quelques mois en fonction de la nature de l'équipement et de son utilisation. Ceci est nécessaire afin d'assurer la précision et l'exactitude des mesures.

2.5.1.2 Maintenance préventive

Une maintenance des équipements doit être effectuée pour garantir leur bon fonctionnement. Un plan de maintenance devrait généralement être préétabli avant chaque phase de test. Il inclut des opérations telles que la lubrification des pièces, le remplacement des filtres, la vérification des niveaux de fluides, etc., effectuées par le responsable de suivi du projet avec l'aide des opérateurs du site.

2.5.2 Incertitudes sur la production de biogaz

Pour déterminer le débit de CH₄ sortant de chaque méthaniseur, le calcul suivant est réalisé :

$$Q_{CH_4} = Q_{TOTAL} \times y_{CH_4}$$

Avec Q_{TOTAL} le débit de biogaz sortant du digesteur témoin et du digesteur test et y_{CH_4} le taux de CH₄ sortant du digesteur témoin et du digesteur test. Incertitude absolue liée au débit de biogaz est donc :

$$\text{➤ Incertitude } Q_{CH_4} = \Delta_{Q_{total}} \times y_{ch_4} + \Delta_{y_{ch_4}} \times Q_{total}$$

$$\text{avec } \Delta_{Q_{total}} = \text{Incertitude de mesure}_{\text{débitmètre}} \times \text{Débit}_{\text{biogaz moyen}}$$

$$\text{avec } \Delta_{y_{ch_4}} = \text{Incertitude absolue}_{\text{analyseur}}$$

$$\text{➤ Incertitude } Q_{CH_4 \text{ relative}} = \frac{\Delta_{Q_{CH_4}}}{Q_{CH_4}}$$

Ces incertitudes peuvent être dues au fait que ces instruments peuvent être sensibles aux variations de température et de pression et à l'accumulation de contaminants tels que la poussière, l'humidité ou d'autres composants présents dans le biogaz.

Avec le temps, les débitmètres et les analyseurs peuvent aussi s'user ou se dégrader, ce qui peut entraîner des erreurs de mesure. Il est important de les entretenir régulièrement et de les calibrer selon les recommandations du fabricant pour minimiser ces erreurs.

2.5.3 Incertitudes sur les analyses en laboratoire

Lors du prélèvement d'échantillon dans le cadre de l'évaluation des paramètres visés, la représentativité de l'échantillon prélevé est essentielle pour assurer la fiabilité des résultats d'analyse : il est important de prélever un échantillon qui soit représentatif et homogène. Pour un échantillon solide, il est crucial de mélanger la totalité de l'échantillon puis prélever plusieurs sous-échantillons représentatifs de la totalité. Pour un échantillon liquide, il est important d'effectuer une purge puis bien mélanger avant prélèvement pour éviter la sédimentation de l'échantillon brut.

En ce qui concerne la conservation de l'échantillon, il est important d'implémenter des mesures pour éviter les altérations ou les modifications de composition pendant le transport et le stockage. Cela peut inclure la réfrigération, la congélation ou l'utilisation d'agents de conservation appropriés, selon la nature de l'échantillon. Il est suggéré de réfrigérer directement les échantillons fraîchement prélevés puis les transporter dans des boîtes isothermes polystyrènes en présence de blocs réfrigérants.

L'incertitude sur les méthodes analytiques de mesure de la matière sèche et volatile, pH, azote et acides gras volatils fait référence à l'erreur ou à la variabilité associée aux techniques utilisées pour effectuer ces mesures. Chaque méthode analytique peut avoir ses propres limites d'incertitude, qui peuvent être influencées par différents facteurs, tels que la méthode d'échantillonnage, l'étalonnage des instruments, le facteur humain, etc.

2.5.3.1 Incertitude absolue liée au potentiel méthanogène des intrants :

En ce qui concerne le BMP, cette mesure peut varier en fonction des conditions de laboratoire, des erreurs d'instrumentation ou d'autres facteurs externes en lien avec le type et la qualité des gisements analysés.

Par conséquent, le manque de répétabilité des mesures de BMP ainsi que le prélèvement d'échantillons à volume faible non représentatifs des cuves de digestion pourraient interférer sur la certitude des calculs du potentiel méthanogène du fait de la variabilité du type et de la qualité des gisements réceptionnés sur site. Il faut donc recalculer l'incertitude croisée entre les mesures de tonnage, MS, MV et BMP. Ci-dessous la proposition de calcul :

Potentiel méthanogène PM de tous les intrants = PM Intrant1 + PM Intrant2 + ...

Potentiel méthanogène d'un intrant = quantité \times MS \times MV \times BMP ;

Incertitude Potentiel

$$= \Delta \text{quantité} \times ((MS \times MV \times BMP) + \text{quantité} \times ((\Delta MS) \times MV \times BMP + MS \times (\Delta MV) \times BMP + (\Delta BMP) \times MV \times MS))$$

avec $\Delta MS = \frac{\Delta m_2 + \Delta m_0}{m_2 - m_0} + \frac{\Delta m_1 + \Delta m_0}{m_1 - m_0}$ Avec $\Delta m = m \times \text{Erreur relative}_{balance}$

avec $\Delta MV = \frac{\Delta m_2 + \Delta m_3}{m_2 - m_3} + \frac{\Delta m_0 + \Delta m_1}{m_1 - m_0}$

avec $\Delta BMP = BMP \times \text{Incertitude}_{relative}$

avec $\Delta \text{quantité} = \text{Débit horaire}_{moyen} \times \text{Erreur relative}$

2.5.4 Incertitudes sur la consommation électrique

Il est indispensable également d'attester les erreurs de mesure de la consommation électrique, qui est à trouver dans la notice de chaque compteur utilisé. Dans le cas de la mesure de l'ampérage ou de la tension, ces valeurs peuvent présenter des erreurs de 15% et 5% respectivement.

2.6 ANALYSE DES PERFORMANCES

La présente méthode est basée sur l'analyse qualitative des indicateurs de fonctionnement de l'unité. Afin de garantir une évaluation fiable, les indicateurs sont analysés sur le fonctionnement des digesteurs avec et sans utilisation des traitements.

Ces indicateurs reposent sur une approche par bilans de matière, énergétique et économique qui incluent les critères techniques de fonctionnement du site (Tableau 3). Nous avons cherché à concevoir ces indicateurs pour une mise en œuvre la plus simple possible, à un coût raisonnable (basés sur un nombre minimum mais pertinent de paramètres analytiques, de mesures et de relevés).

Tableau 3 – Liste des bilans matière, gaz, énergétique et économique suivis

Bilan matière des intrants et des digestats	Bilan production biogaz	Bilan énergétique	Bilan économique
<ul style="list-style-type: none"> - Bilan recettage - MS/MV et viscosité - Analyse physico chimique (AGV détaillé, pH, FOS/TAC, NH₄⁺) - Potentiel de dégradation matière (à travers la BMP) 	<ul style="list-style-type: none"> - Basé sur potentiel méthane intrants - Basé sur quantité et qualité du biogaz mesurées sur les cuves 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation énergétique outil de traitement - Consommation énergétique process (agitateurs, broyeurs, pompes). 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût OPEX/CAPEX - Bénéfice potentiel - ROI - Substitution potentielle intrants

Les indicateurs de performance retenus pour l'évaluation des performances des technologies de traitement sont :

- **L'écart de la production réelle de méthane entre les digesteurs**, c'est-à-dire la quantité de biométhane produite à partir de la biomasse incorporée en s'assurant que les rations soient identiques afin de s'affranchir des BMP qui apportent une erreur importante.
- **L'écart de la consommation électrique lié à la variation de la viscosité dans les digesteurs**. En effet, la viscosité des matières en digestion peut significativement affecter les performances du système de méthanisation, notamment en augmentant la consommation d'énergie de l'agitation. Par conséquent, il est important de mesurer la réduction de la consommation électrique liée à la réduction de la viscosité des digestats.
- **Le retour sur investissement de la technologie de pré/co-traitement** obtenu en mettant en relation les coûts d'investissement avec les gains en production de biogaz et en réduction de consommation électrique mesurés et les consommables nécessaires à son fonctionnement.

D'autres indicateurs peuvent être retenus, en fonction des besoins et des spécificités du projet. Ces indicateurs peuvent porter sur des aspects tels que la qualité du biogaz produit, l'efficacité du traitement sur les effluents, son impact sur la séparation de phases et la durabilité environnementale du système (Analyse de Cycle de Vie).

2.7 MISE EN PLACE D'UNE ARCHITECTURE DE GESTION DE DONNÉES

Une fois l'ensemble des paramètres mesurés, il faut pouvoir les centraliser et les visualiser. Il est indispensable d'établir une architecture de gestion des données pour extraire l'information avec la meilleure précision possible.

2.8 TRAITEMENT DE LA FIN DE TEST

À la fin de la période de test, plusieurs actions peuvent être entreprises en termes de :

- **Résultats et conclusions** : Les résultats obtenus pendant l'expérience devraient être analysés et évalués. Il s'agit principalement des résultats produits pendant la période stabilisée. Cela inclut l'identification des avantages et inconvénients de la technologie et la détermination de son potentiel commercial. Les conclusions tirées de cette analyse peuvent aider à décider de la suite à donner au projet R&D.
- **Etude économique** : Cela comprend généralement une analyse des coûts associés à la réalisation, à l'exploitation et à la commercialisation de la technologie testée ainsi qu'une évaluation des revenus potentiels.
- **Commercialisation** : Si les résultats et l'étude économique indiquent une forte demande et un potentiel de rentabilité, la phase de commercialisation pourrait être envisagée.
- **Protection de la propriété intellectuelle** : Avant d'entamer la commercialisation, il est important pour le fournisseur d'équipement de protéger la propriété intellectuelle associée à la technologie développée en déposant une marque et/ou un brevet.

3 APPLICATION CONCRÈTE DU MODE OPÉRATOIRE DANS LE CAS DU PROJET CH4+

Le projet CH4+ est un projet porté par **NASKEO** sur 3 ans (2022-2025) qui a pour objectif d'évaluer l'efficacité de 5 technologies de traitement des intrants directement sur un site de méthanisation. Ce projet a été financé par l'État dans le cadre du plan de relance et du programme d'investissements d'avenir. Il a été également lauréat de l'appel à projet « Prétraitements des intrants en méthanisation » lancé par GRDF sur le volet méthodologie d'évaluation des performances de prétraitement ou de co-traitement pour rendre le présent document public.

Sur cette section, l'application concrète de la méthodologie développée dans la section précédente sera exposée sur l'un des tests réalisés dans le cadre du projet CH4+. Le type de traitement évalué a été anonymisé pour des raisons de confidentialité des résultats du projet CH4+.

3.1 CHOIX DU SITE DE MÉTHANISATION QUI HÉBERGE LE PROJET CH4+

Le projet CH4+ est hébergé par le site de méthanisation METH'INNOV, dans le département des Deux-Sèvres (79), construit par **NASKEO** et **TER'GREEN** étant un des porteurs du projet (**NASKEO** et **TER'GREEN** étant sociétés-sœurs au sein du groupe **KEON**).

Le schéma de l'installation avant implémentation du projet était le suivant :

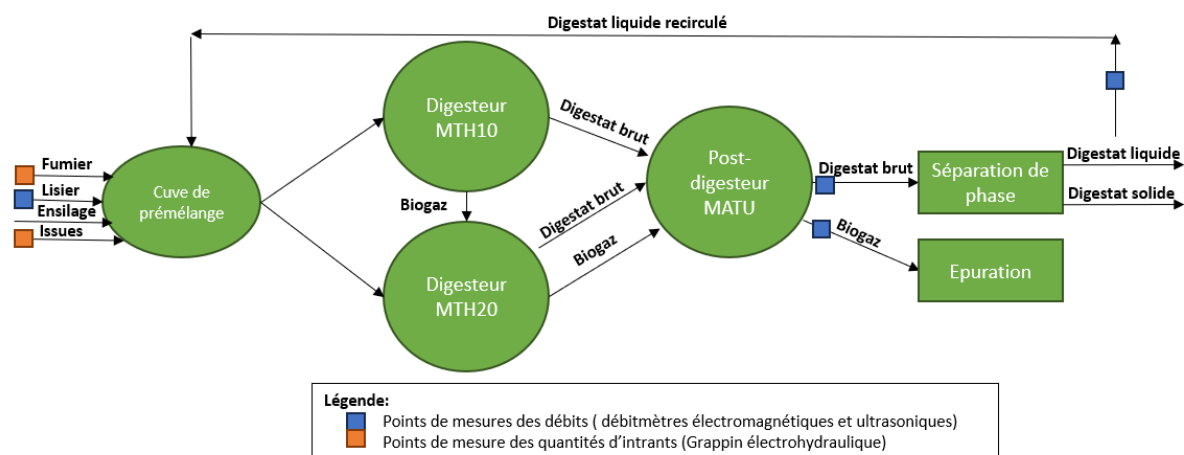







Illustration 04 – Schéma d'installation du site avant implémentation du projet CH4+

Initialement sur site, le biogaz était acheminé du digesteur 1 (nommé MTH10) au digesteur 2 (nommé MTH20), ensuite vers le post-digesteur (nommé MATU). Ce système avait pour but principalement de maximiser le temps de séjour du gaz en contact avec l'oxygène (micro-injection pour la précipitation du soufre).

Les équipements initialement présents sur site qui peuvent être utilisés dans le cadre du projet sont listés dans le Tableau 4.

Tableau 4 – Liste des capteurs utilisés initialement présents sur site

PARAMÈTRE MESURÉ	TYPE DE CAPTEUR	MODÈLE	CONSTRUCTEUR	ILLUSTRATION	EXACTITUDE	RÉPÉTABILITÉ
MASSE INTRANTS SOLIDES	Grappin électrohydraulique	P5-2.500-0,7/T-35	Comète Industrie SAS		±10% de la mesure du poids	/
DÉBIT INTRANTS LIQUIDES (= DIGESTAT LIQUIDE/BRUT RECIRCULE, LISIER)	Débitmètre électromagnétique	Proline Promag 55 S	Endress+Hauser		± 0.2% de la mesure	± 0.1% de la mesure
NIVEAU DE REMPLISSAGE METHANISEUR	Membrane affleurante	PI2795	IFM		± 0.2% de la mesure	± 0.1% de la mesure
DEBIT BIOGAZ SORTIE MATU	Débitmètre ultrasonique	Prosonic Flow B 200	Endress+Hauser		Débit biogaz : ± 1.5% de la mesure Taux CH ₄ : ± 2% absolue	Débit biogaz : ± 0.5% de la mesure Taux CH ₄ : ± 0.5% absolue
AMPÉRAGE DES APPAREILS	Transmetteur d'intensité	AP50B420 L	LEM		± 0.5% de la mesure	/
TEMPS DE FONCTIONNEMENT DES APPAREILS	Compteur qui comptabilise le temps où un ordre de marche est envoyé dans l'automate pour un équipement donné				Compte uniquement quand 1h est complétée	

3.2 ADAPTATIONS ET MODIFICATIONS DU SITE

3.2.1 Modifications pour le suivi de production de biogaz

Les modifications successives réalisées dans le cadre du projet CH4+ étaient les suivantes :

- **Mise en parallèle des deux digesteurs du site** afin de mesurer au fur et à mesure l'impact des technologies installées et de valider la faisabilité du projet (Illustration 05).

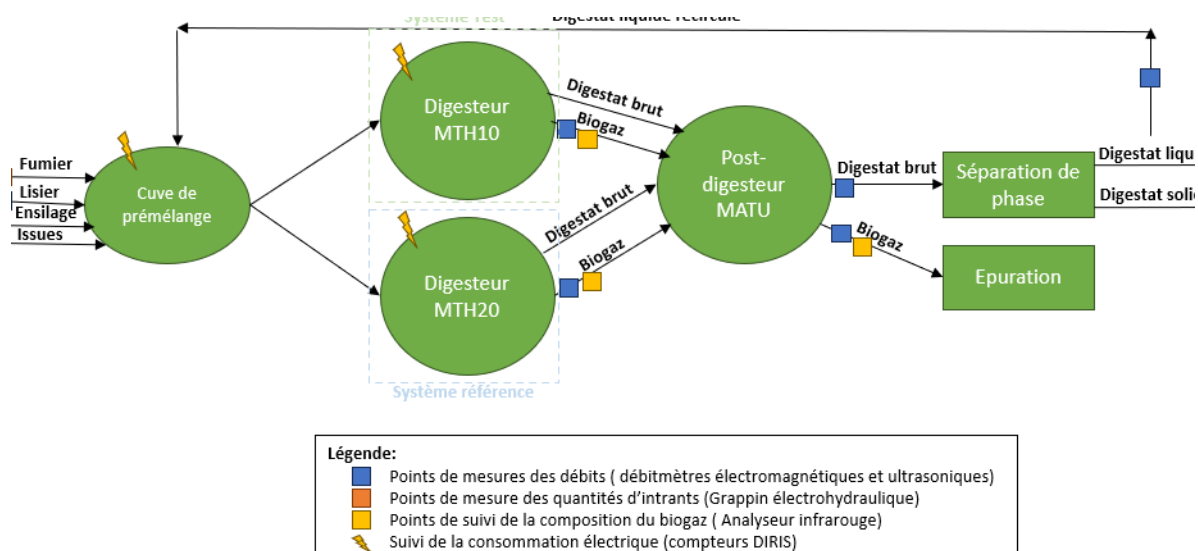











Illustration 05 – Schéma d'installation du site après modifications en lien avec le projet CH4+

- Des capteurs ont été ajoutés sur site afin de suivre en temps réel la consommation énergétique des différents équipements de l'unité de méthanisation et de valorisation du biogaz (Tableau 5).
- Des capteurs de débit, de pression, de niveau et de température ont également été ajoutés sur le site afin de suivre en continu les paramètres pouvant influencer les performances des traitements ainsi qu'orienter les interprétations des expériences (Tableau 5).
- Des analyseurs de gaz ont été mis en place afin de suivre la composition du biogaz en CH₄, H₂, CO₂, O₂ et H₂S à différents points du site (MTH10, MTH20, MATU, injection) (Tableau 5).

Tableau 5 – Liste des capteurs implémentés spécialement pour le projet

PARAMÈTRE MESURÉ	TYPE DE CAPTEUR	MODÈLE	CONSTRUCTEUR	ILLUSTRATION	EXACTITUDE ⁴	ÉTABILITÉ ⁵
DÉBIT BIOGAZ + TAUX CH ₄ MTH10 ET MTH20	Débitmètre ultrasonique	Prosonic Flow B 200	Endress+Hauser		Débit biogaz : ±1.5 % de la mesure Taux CH ₄ : ± 2% absolue	Débit biogaz : ± 0.5% de la mesure Taux CH ₄ : ± 0.5% absolue
COMPOSITION BIOGAZ	Analyseur Infrarouge (CH ₄ et CO ₂), électrochimique (H ₂ S, H ₂ et O ₂)	SWG 100 BIOGAS	Guter & Marchand		Absolu CH ₄ : ± 0.3 vol% CO ₂ : ± 0.3 vol% H ₂ S : ± 5% H ₂ : ± 5% O ₂ : ± 0.2 vol%	/
VOLUME ADDITIFS	Pompe péristaltique	Qdos 20 PU Universal 24V I/O	Watson Marlow		± 1% de la mesure	± 0.5% de la mesure
PRESSION AMONT MTH10	Transmetteur de pression électronique (par mesure céramique-capacitive)	PM1704	IFM		± 0.2% de la mesure	± 0.1% de la mesure
PRESSION AVAL TECHNOLOGIE	Transmetteur de pression électronique (par mesure céramique-capacitive)	PM1705	IFM		± 0.2% de la mesure	± 0.1% de la mesure
TEMPÉRATURE ENTRÉE/SORTIE CONTENEUR	Transmetteur de température	TA2212	IFM		± 0.3% de la mesure	/
TEMPÉRATURE TECHNOLOGIE	Transmetteur de température	TA3115	IFM		± 0.3% de la mesure	/
DÉBIT DIGESTAT BRUT CONTENEUR	Débitmètre électro-magnétique	Proline Promag W 10L80	Endress+Hauser		± 0.5% de la mesure	± 0.1% de la mesure
CONSUMMATION ÉLECTRIQUE DES ÉQUIPEMENTS	Compteurs DIRIS Digiware	DIRIS Digiware D-50	Socomec		Selon CEI 61557-12	/

⁴ Exactitude (erreur systématique) : proximité des mesures à une valeur spécifique, différence de la mesure avec une valeur étalon

⁵ Répétabilité ou Précision (erreur de mesure) : proximité de mesures les unes par rapport aux autres.

3.2.2 Installation du système de prétraitement et de co-traitement

Des études d'ingénierie ont été réalisées pour déterminer les meilleures conditions d'installation des tests sur le site de méthanisation. Dans le cadre du projet CH4+, 2 types de technologies ont été étudiés : l'ajout d'additifs et des traitements mécaniques de la matière. Sur l'illustration 06 est présenté le point d'ajout des additifs destinés au digesteur MTH10. Des oligoéléments sont ajoutés sur les deux digesteurs pour s'assurer du bon équilibre biologique et éviter des instabilités pouvant se présenter en utilisant les additifs du test.

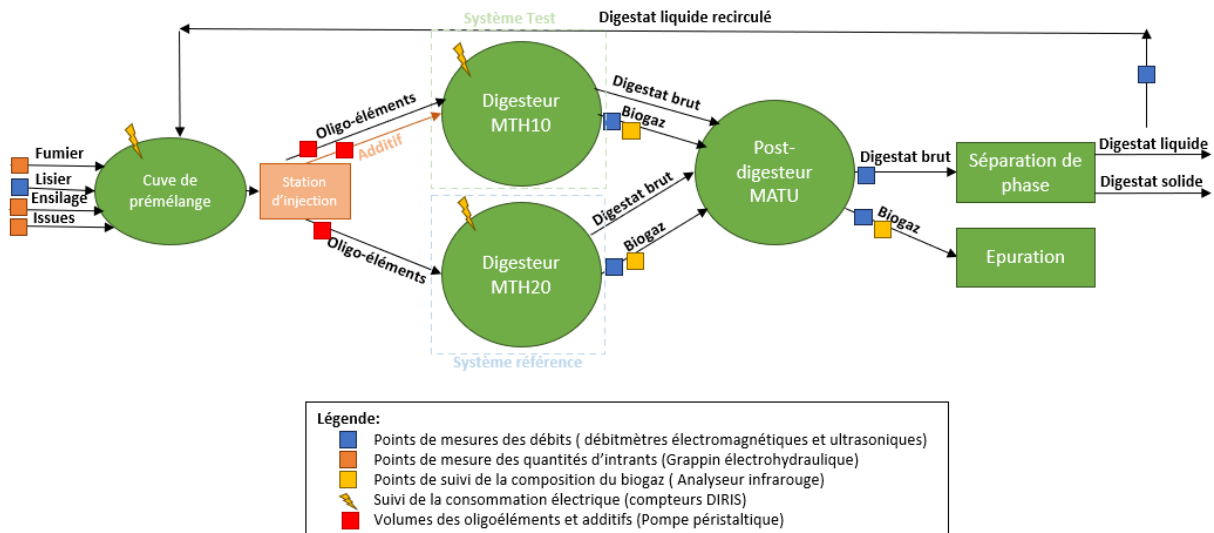


Illustration 06 – Schéma d'installation du site durant la première phase du projet CH4+

Pour les autres technologies, le traitement sera effectué sur la matière en flottation dans le digesteur et non les intrants qui seront incorporés dans le digesteur. Ceci a été décidé suivant les contraintes de conception du pilote afin d'intégrer plusieurs technologies dans un même conteneur avec différents débits de traitement. Dans ce sens, une boucle de recirculation a été ajoutée entre le digesteur test (MTH10) et le conteneur pilote, comme représenté dans la Illustration 07. Un carottage à 1 mètre en dessous du niveau supérieur liquide dans le digesteur 1 a été réalisé pour capter la matière en flottation qui est moins bien dégradée.

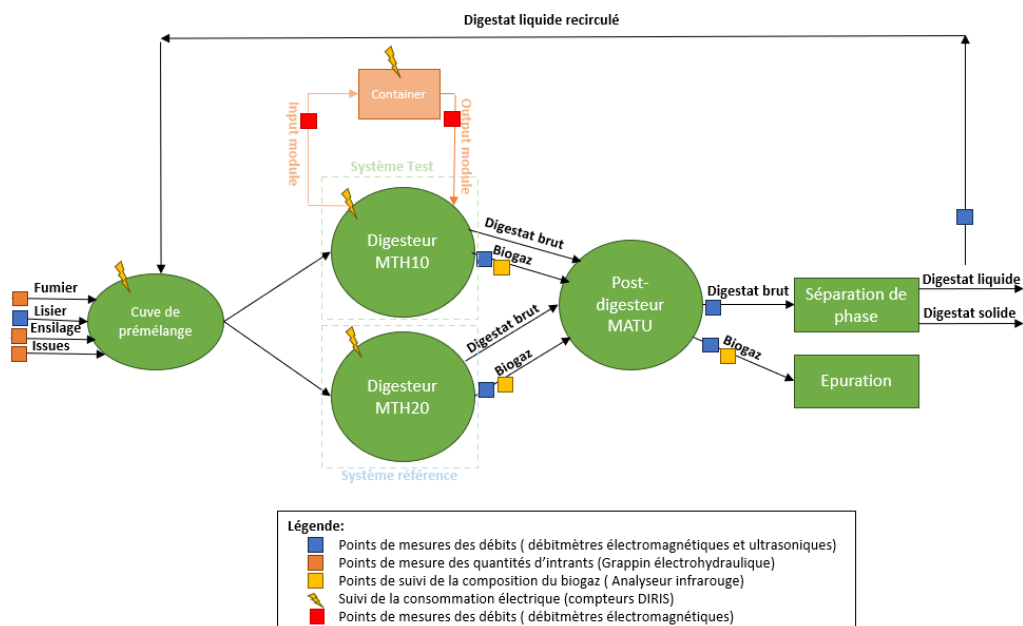


Illustration 07 – Schéma d'installation du site durant les quatre dernières phases du projet CH4+

3.2.3 Suivi des tonnages des intrants

Les tonnages journaliers des intrants (« fumier + ensilage », lisier et issues de céréales) sont déjà suivis et enregistrés sur site grâce au système de pesage incorporé au grappin. Dans la configuration initiale, le tonnage de l'ensilage n'était pas suivi car il est déposé dans la même fosse que le fumier, un suivi précis d'ensilage n'était donc pas possible. Pour cela, une modification de l'automatisme du grappin a été réalisée de façon à identifier des tas dans la fosse (du tas 01 au 21 sur l'illustration 08) afin de différencier entre l'ensilage et le fumier. Il a été demandé à l'exploitant de bien identifier les tas selon les arrivages du substrat.

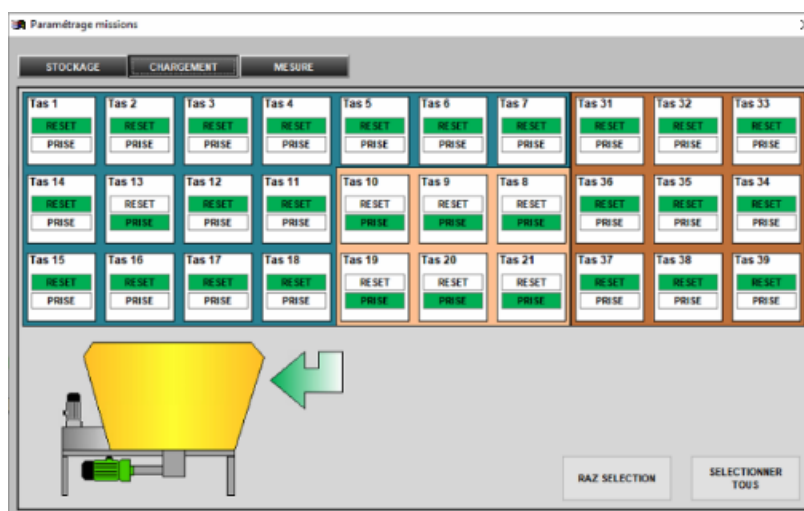


Illustration 08 – Numérotation des tas dans la fosse de stockage des intrants

3.3 CONDITIONS DE MISE EN PLACE DU TEST

3.3.1 Définition de la durée de période de test

Dans le cas du projet CH4+, les digesteurs ont un temps de séjour d'environ ~8 semaines (57 jours), nous avons donc choisi de réaliser des tests de **2,5 temps de séjours** pour arriver à un total de 20 semaines de période de test. Les 16 premières semaines de traitement ont été considérées comme « période transitoire » et les 4 dernières semaines ont été considérées comme « période stabilisée ».

3.3.2 Homogénéisation

Dans le cas du projet CH4+, l'homogénéisation est réalisée en impliquant la cuve de maturation ou post-digester appelé MATU généralement avec l'ordre de transfert suivant : MTH20 → MATU puis MTH10 → MTH20 et MATU → MTH10 et inversement (Illustration 09). Les volumes de transfert sont calculés à partir d'une simulation réalisée au préalable et validée par l'exploitant, prenant en compte tous les paramètres physicochimiques et biologiques des cuves.

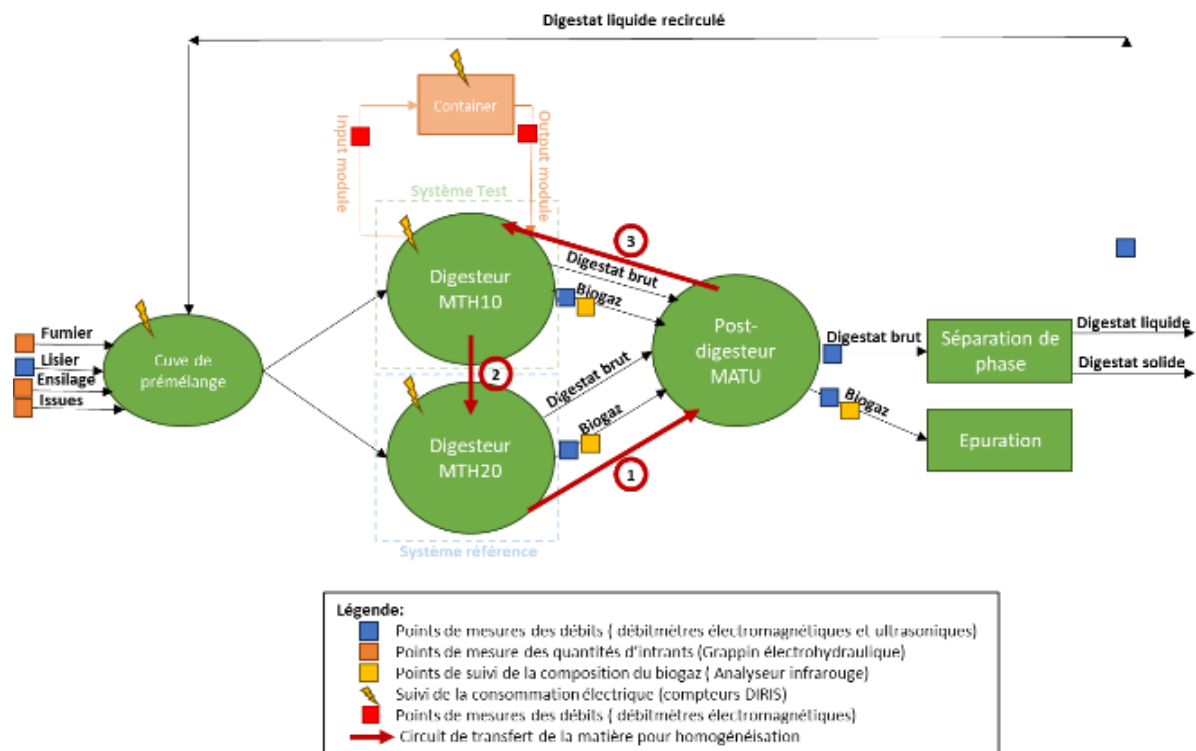


Illustration 09 – Schéma d'installation du site montrant le circuit de transfert pour homogénéisation

Les cuves du site dans lequel est implanté le projet CH4+ ont un volume utile d'environ 3900 m³. L'objectif étant de transférer environ 2000 m³ de chaque cuve, en passant par la MATU. Cela représente un travail de pompage de 15 h par jour pendant 2 jours. Cette opération est réalisée pendant le week-end afin de ne pas impacter l'incorporation des matières premières. Il a fallu également prévoir 500 m³ de disponibilité dans la MATU avant de démarrer l'homogénéisation.

Ci-dessous, un exemple de suivi de la dynamique journalière des cuves impliquées dans l'homogénéisation :

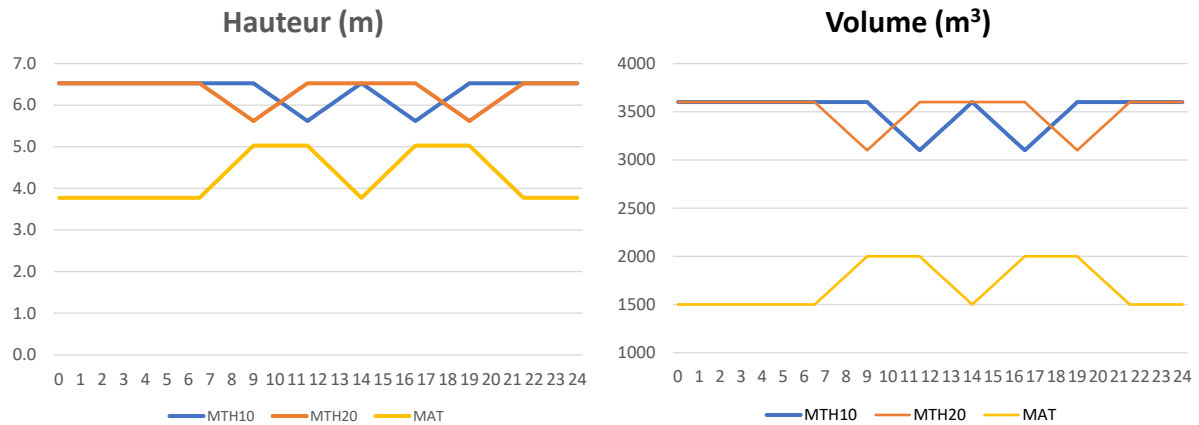


Illustration 10 – Variation journalière de la hauteur (m) et du volume (m³) des cuves impliquées dans l'homogénéisation avant lancement des tests.

3.3.3 Suivi des paramètres physico-chimiques

Un contrôle régulier des digesteurs test et témoin est indispensable pour assurer la stabilité biologique et physico-chimique du processus de digestion anaérobie d'une part, d'autre part pour garder des conditions similaires dans les deux digesteurs afin de pouvoir les comparer.

Certains paramètres sont difficilement mesurables en continu ou directement sur site, ils nécessitent donc d'être analysés en laboratoire.

Pour mesurer les paramètres biologiques ou physico-chimiques, il est nécessaire de prélever des échantillons de matière. Il est important de rappeler que les conditions de l'échantillonnage et de récupération de la matière exercent une grande influence sur les résultats finaux. Un schéma détaillé avec les points de prélèvements est présenté sur l'illustration 11.

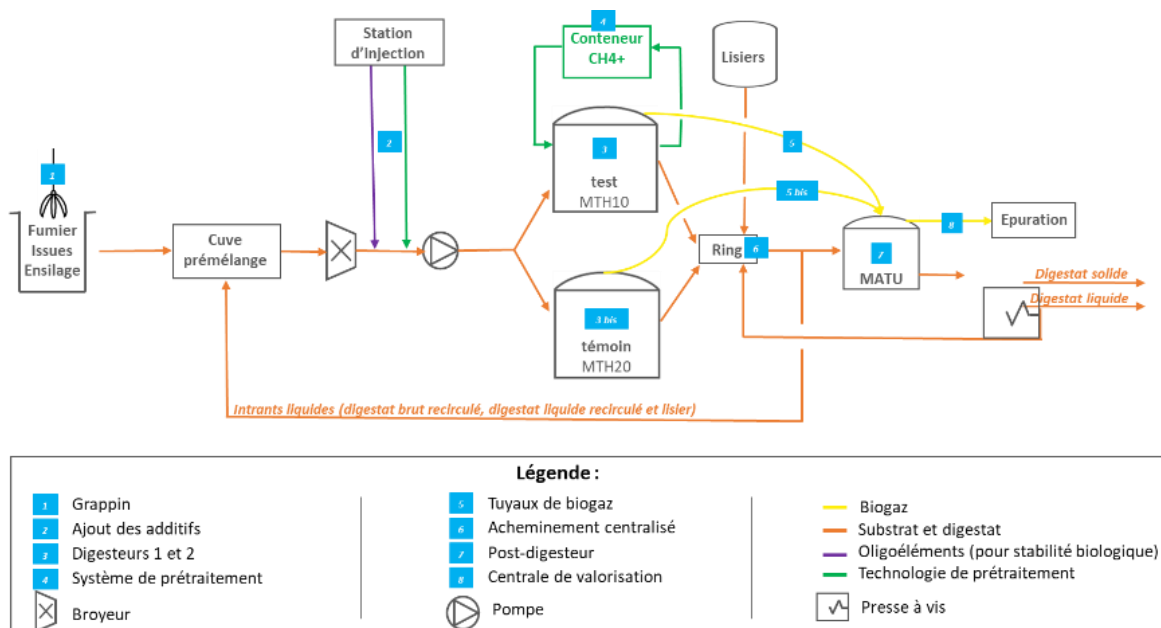


Illustration 11 – Schéma détaillé avec points de prélèvement des échantillons (carrés bleus)

Ainsi, pour que les échantillons prélevés soient les plus représentatifs de notre système, nous réalisons les prélèvements selon les règles définies ci-après, en fonction des points de prélèvements annotés sur l'illustration 11:

3.3.3.1 Échantillons liquides

Tableau 6 – Méthode de prélèvement des échantillons liquides selon points de prélèvements sur Illustration 11

Matière prélevée	Point de prélèvement	Méthode de prélèvement	Volume prélevé par échantillon
Digestat brut MTH10 Digestat brut MTH20	6 Au niveau de la purge de la ring	Lors de l'incorporation, le digestat brut est recirculé dans la ring. À ce moment-là on : - Ouvre la purge - Laisse écouler la matière dans un seau pendant 1 min - Prélève l'échantillon directement dans un autre seau	2 L
Digestat brut MATU	Au niveau de la presse à vis		2 L
Lisier	6 Au niveau de la purge de la ring	Le lisier est recirculé dans la ring. À ce moment-là on : - Ouvre la purge - Laisse écouler la matière dans un seau pendant 1 min - Prélève l'échantillon directement dans un autre seau	Flacon de 1 L
Input conteneur CH4+ Output conteneur CH4+	4	Le digestat est prélevé avant la pompe et après le co-traitement	2 L

3.3.3.2 Échantillons solides

L'échantillonnage des intrants est effectué après un mélange manuel et à l'aide du grappin afin de nous assurer de l'homogénéité de l'échantillon. Une quantité adéquate est prélevée afin d'assurer la représentativité de l'échantillon (Tableau 7).

Tableau 7 – Méthode de prélèvement des échantillons solides

Matière prélevée	Point de prélèvement	Méthode de prélèvement	Volume prélevé par échantillon
Fumier	1	Le grappin est utilisé en mode manuel pour prélever une quantité hétérogène de fumier dans la fosse	Sac de congélation de 1 L
Issues	1	Prélèvement manuel d'une quantité hétérogène d'issues	Sac de congélation de 1 L
Ensilage	1	Le grappin est utilisé en mode manuel pour prélever une quantité hétérogène d'ensilage dans la fosse	Sac de congélation de 1 L

3.3.3.3 Analyse de la viscosité

La mesure de la viscosité est complexe du fait de l'hétérogénéité des échantillons à tester. De ce fait, pour renforcer l'exactitude des résultats obtenus, deux types de mesures de viscosité sont programmés :

- Une analyse toutes les deux semaines à l'aide d'un **consistomètre** décrit ci-après.
- Une analyse de viscosité avec un rhéomètre classique au démarrage et la fin des tests en collaboration avec un laboratoire de rhéologie.

- **Viscosité sur-site - consistomètre :**

Nous avons choisi de mesurer la **consistance** des digestats à l'aide d'un outil de mesure appelé **consistomètre de Bostwick**. La consistance d'un échantillon correspond à sa résistance à l'écoulement dans des conditions spécifiques et pendant un laps de temps donné. La viscosité étant définie comme l'ensemble des phénomènes de résistance au mouvement d'un fluide pour un écoulement, ces paramètres sont intrinsèquement liés. Ainsi, plus la matière analysée est fluide et plus l'étalement sera important.

Les étapes permettant de réaliser une mesure de consistance sont les suivantes :

- Le compartiment présent au point le plus haut de l'appareil, appelé chambre à échantillons, est rempli avec 75 ml de la matière à analyser (Illustration 11).
- La trappe est actionnée en même temps que le chronomètre est enclenché.
- Après **1 minute**, nous relevons la longueur d'étalement de l'échantillon grâce aux graduations de l'appareil en centimètre.
- Nous répétons 5 fois cette expérience afin d'assurer l'exactitude des mesures.

Avant le début de l'expérience, nous mesurons la température de l'échantillon à tester et nous le chauffons si besoin dans l'étuve pour maintenir la température d'échantillonnage à 40 °C (température à l'intérieur des digesteurs). Nous suivons aussi la température tout au long de la manipulation. Pour ce faire, nous utilisons une thermosonde de cuisson MASTRAD F73000 m°classic.

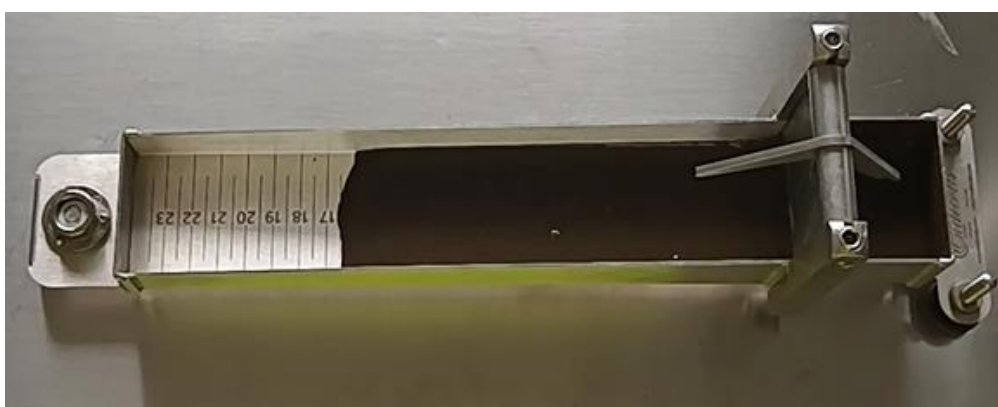


Illustration 12 – Consistomètre après ouverture de la trappe

Cette méthode d'évaluation de la viscosité des digestats possède certaines limites pour les raisons suivantes :

Tableau 8 – Paramètres affectant l'exactitude des mesures avec le consistomètre

Élément concerné	Limite	Incertitude estimée
Température	La consistance dépend grandement de la température	/
Lecture de la graduation	La lecture de la valeur mesurée est limitée par la précision de la vision et des graduations de l'échelle de mesure	$\pm 0.5 \text{ cm}$ absolue sur 25 cm
Nature de l'échantillon prélevé	La mesure varie selon l'échantillon prélevé. Plus il est hétérogène (contenant plus de paille) plus la longueur d'écoulement sera basse.	/

L'utilisation de cette méthode a permis d'observer des différences entre les intrants avant et après traitement mais pas des différences de viscosité entre les digesteurs.

3.3.3.4 Analyse de viscosité au laboratoire

Les résultats de cette expérience n'étaient pas concluants du fait de l'hétérogénéité des échantillons. Pour cela, nous avons eu recours à un laboratoire de rhéologie pour réaliser un test de viscosité lors du démarrage et à la fin de la phase de test. Les résultats obtenus dans ce cas sont plus pertinents.

- Méthode

Les mesures de viscosité réalisées sur les digestats bruts (non tamisés) sont effectuées sur un rhéomètre à contrainte imposée avec une géométrie Vane de 17.5 mm de diamètre selon les normes ISO 3219-1⁶ et ISO 3219-2⁷ régissant les bonnes pratiques de rhéométrie. Les courbes d'écoulement sont par la suite obtenues en paliers croissants suivi par des essais en paliers décroissants.

Pour la plupart des échantillons de digestats, les courbes en paliers croissants n'ont pas pu être modélisées en raison de leur hétérogénéité et destruction. Il était plus pertinent de considérer les résultats des essais en paliers décroissants.

Viscosité (Pa.s)

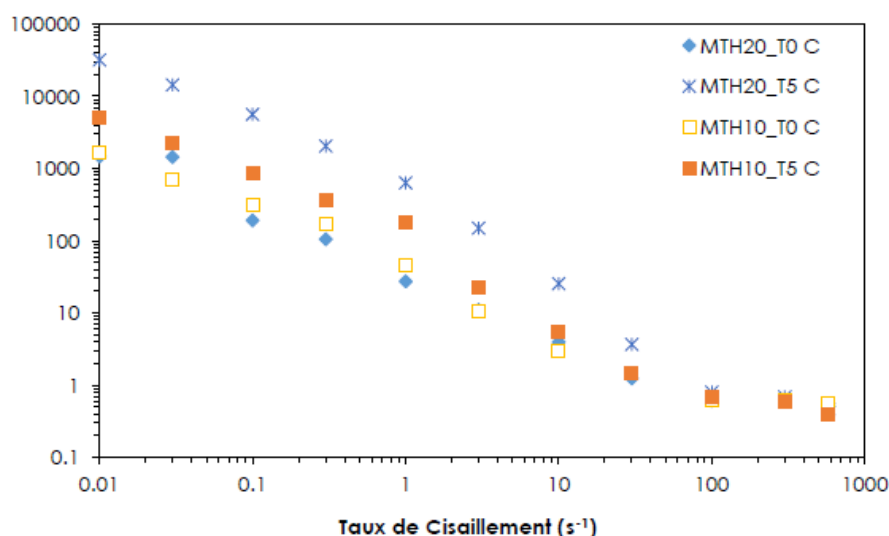


Illustration 13 – Courbes de viscosité obtenues au laboratoire. T0 : initial. T5 : après 5 mois

⁶ <https://www.iso.org/fr/standard/76032.html>

⁷ <https://www.iso.org/fr/standard/76033.html>

3.3.3.5 Fréquence d'analyse

La fréquence d'analyse diffère suivant le type de paramètre biologique et la matière à analyser, certains paramètres étant plus essentiels que d'autres. La fréquence d'analyse sélectionnée pour les tests du projet CH4+ est présentée dans le Tableau 9 .

Il a été choisi de suivre les variations directes produites par le co-traitement sur la matière intrant (Input) et après co-traitement (output). Par la suite, les variations de la matière contenue dans les digesteurs témoin et test sont suivies pour évaluer l'impact sur la durée du co-traitement globalement dans les digesteurs. En effet, l'impact sera progressif car seulement une partie du contenu de digesteur est traitée journalièrement par le co-traitement (<5% du volume utile).

Des analyses sur les intrants sont nécessaires principalement pour le calcul du potentiel méthanogène incorporé. Des analyses plus spécifiques (AGV, alcalinité, oligoéléments ou viscosité) ne sont donc pas nécessaires.

Tableau 9 – Planning d'échantillonnage

	BMP	MS/MV	AGV/ALCALI NITÉ/PH	NH4+	OLIGO	VISCOSITÉ SUR SITE	VISCOSITÉ LABORATOIRE
MTH10	Début et fin du test	Chaque mois	Chaque 2 semaines	Chaque mois	Au début du test	Chaque 2 semaines	Début et fin du test
MTH20	Début et fin du test	Chaque mois	Chaque 2 semaines	Chaque mois	Au début du test	Chaque 2 semaines	Début et fin du test
MATU	Pas d'analyse	En début, milieu et fin test			Pas d'analyse		
INPUT MODULE	En début, milieu et fin test	Chaque mois	Chaque 2 semaines	Chaque mois		Chaque 2 semaines	Début du test
OUTPUT MODULE	En début, milieu et fin test	Chaque mois	Chaque 2 semaines	Chaque mois		Chaque 2 semaines	Début du test
LISIER	En début du test	Chaque mois	Pas d'analyse	En début du test	Pas d'analyse		
FUMIER	En début du test	Chaque mois		En début du test			
ISSUES DE CÉRÉALE	En début du test	Chaque mois		En début du test			
ENSILAGE	En début du test	Chaque mois		En début du test			

3.3.4 Suivi de la consommation électrique

L'installation des compteurs d'électricité pour les équipements en lien avec le flux de co-traitement est réalisée. L'objectif de cette installation est de suivre les modifications de consommation électrique liées à la réduction de viscosité de la matière. Il est attendu que l'énergie consommée par les pompes, broyeurs et notamment les agitateurs soit réduite si la viscosité de la matière diminue. Pour cela, une analyse des équipements électriques et leurs caractéristiques est réalisée (Illustration 14). Des compteurs DirisDigiware sont installés pour suivre la consommation électrique des agitateurs (en orange sur l'illustration). Les équipements en vert sur la Illustration 14 sont équipés de variateurs de fréquence qui transmettent la puissance consommée instantanément par les équipements, ce qui permet de calculer sa consommation électrique.

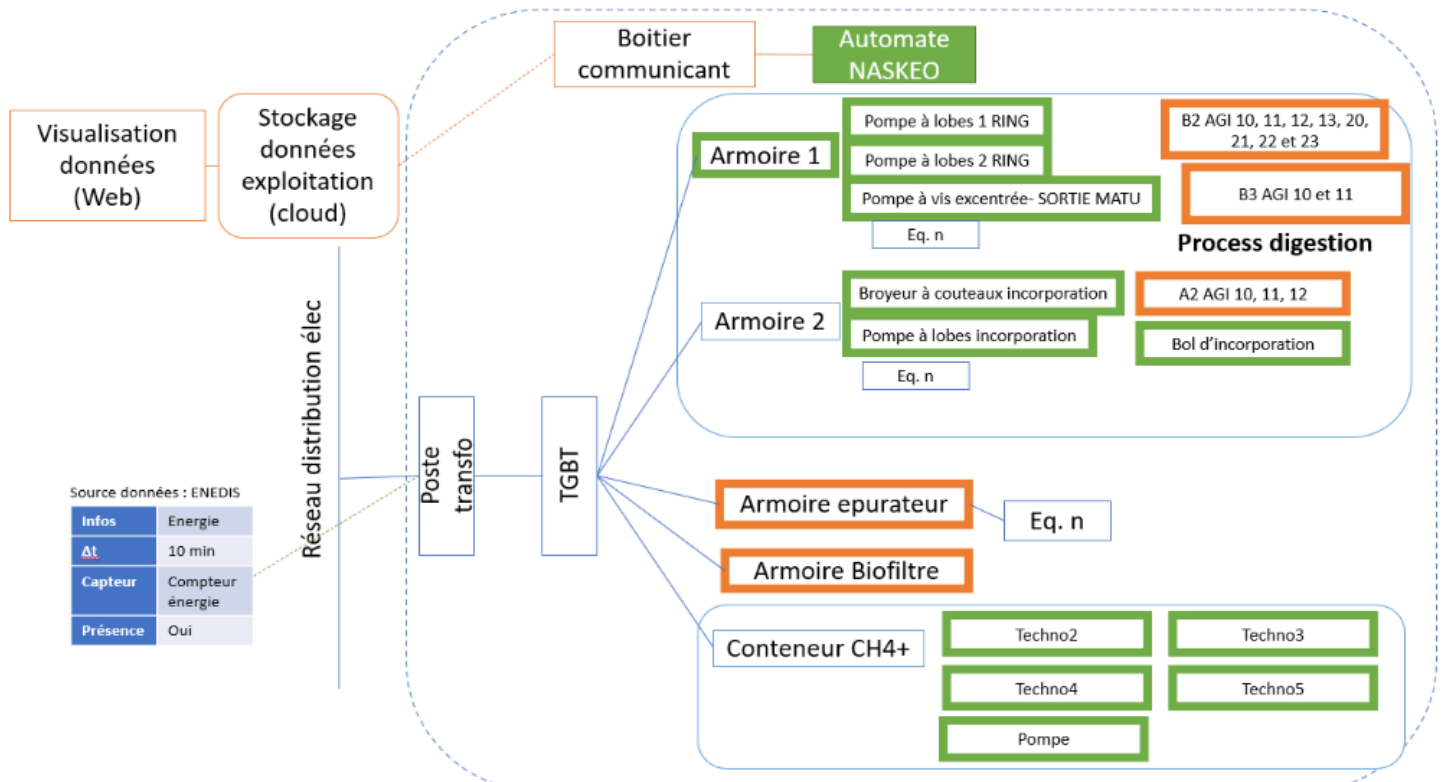


Illustration 14 – Schéma électrique simplifié du site

3.4 PILOTAGE DES ESSAIS

3.4.1 *Planning du projet CH4+* :

La planification du projet CH4+ doit s'étaler sur 3 ans étant donné qu'il s'agit de la mise en place et évaluation de 5 technologies de co-traitement à niveau industriel. Le projet a été donc décomposé en 5 lots :

- Lot 1 : Structure du projet (T0-T0+36 mois)
 - Livrable majeur : reporting du projet et états de dépenses
- Lot 2 : Conception/Montage démonstrateur et adaptation site (T0-T0+36 mois)
 - Livrable majeur : Installation complète du pilote et outils de suivi sur site
- Lot 3 : Évaluation du démonstrateur au niveau industriel (CH4+) (T0+5 mois – T0+34 mois)
 - Livrable majeur : Synthèse des performances des 5 technologies et recommandations d'utilisation
- Lot 4 : Évaluation environnementale du démonstrateur (T0+24 mois – T0+36 mois)
 - Livrable majeur : Synthèse de l'évaluation environnementale des solutions
- Lot 5 : Intégration produit, Industrialisation et Commercialisation (T0+32 mois – T0+36 mois)
 - Livrable majeur : Plans standards et d'implémentation de la solution à commercialiser

3.4.2 *Différents niveaux de réunions établis dans le cadre du projet CH4+*

Comme indiqué dans la méthodologie, les réunions de mise en place dans le projet CH4+ sont les suivantes :

- Kick-off meeting : début du projet
- Réunion de suivi en interne : hebdomadaire (1h)
- Réunion de communication avec l'exploitant : hebdomadaire pendant les tests (30 minutes)
- Comité de pilotage (COPIL) : trimestriel (2h)

Comme indiqué dans la méthodologie, un lien étroit avec l'exploitant du site est indispensable pour le bon déroulement des tests et l'obtention des résultats. Les points abordés chaque semaine sur le fonctionnement du site sont les suivants :

- **Suivi fonctionnel** : Mise à jour des événements d'exploitation
- **Suivi de performances** : Suivi de la production et de la composition du biogaz de la semaine, suivi des modifications des taux de H₂S
- **Suivi opérationnel** : Gestion de stocks (ex : outils de laboratoire, matériel d'entretien). Coordination des interventions de l'exploitant sur le pilote, visites des fournisseurs et de l'équipe R&D

3.5 CALCUL D'INCERTITUDES

3.5.1 Fiabilité des mesures liées aux équipements

Une calibration de l'analyseur de biogaz sur les valeurs de CH₄, CO₂, H₂S et H₂ est réalisée chaque 2 semaines pour éviter toute dérive sur les mesures par rapport aux bouteilles de référence. Le débitmètre biogaz pouvant calculer également le taux de méthane, il est également calibré à l'aide des mesures sur l'analyseur.

3.5.2 Incertitudes sur la production de biogaz

Pour déterminer le débit de CH₄ sortant de chaque méthaniseur, le calcul suivant est réalisé :

$$Q_{CH_4} = Q_{TOTAL} \times y_{CH_4}$$

Avec Q_{TOTAL} le débit de biogaz sortant de MTH10/MTH20 et y_{CH_4} le taux de CH₄ sortant de MTH10/MTH20. Ces deux variables sont mesurées par le débitmètre Prosonic Flow B 200. Ce capteur montre l'intérêt de pouvoir mesurer au même temps le débit de biogaz et le taux de méthane.

Les incertitudes liées à cette variable sont uniquement liées à celles sur les capteurs. Cependant, l'incertitude de mesure reste élevée par rapport à nos besoins (2% absolu). La valeur du taux de CH₄ du débitmètre est donc calibrée périodiquement selon la valeur mesurée par l'analyseur SWG 100 BIOGAS qui a une meilleure précision (0.3% absolu). Nous procédons, si nécessaire, à la calibration des débitmètres selon les données de l'analyseur, celui-ci étant plus précis. Nous intégrons par la suite les facteurs de correction dans le traitement de nos données afin d'assurer l'exactitude de ces dernières.

Par exemple, si la différence est de 3.2% entre les taux de CH₄, nous saisissons un facteur de correction égal à 0,968 initialement fixé à 1 sur les débitmètres au niveau des débits volumiques CH₄ et des pourcentages en CH₄.

- Incertitude absolue liée au débit de biométhane :

$Q_{CH_4} = Q_{TOTAL} \times y_{CH_4}$ avec Q_{TOTAL} le débit de biogaz sortant de MTH10 & MTH20 relevé à partir des débitmètres et y_{CH_4} le taux de CH₄ sortant de MTH10 & MTH20 relevé à partir de l'analyseur

$$\text{➤ Incertitude } Q_{CH_4} = \Delta_{Q_{total}} \times y_{CH_4} + \Delta_{y_{CH_4}} \times Q_{total}$$

avec $\Delta_{Q_{total}} = \text{Incertitude de mesure}_{\text{débitmètre}} \times \text{Débit}_{\text{biogaz moyen}}$

avec $\Delta_{y_{CH_4}} = \text{Incertitude absolue}_{\text{analyseur}}$

$$\text{➤ Incertitude } Q_{CH_4 \text{ relative}} = \frac{\Delta_{Q_{CH_4}}}{Q_{CH_4}}$$

En faisant le calcul, nous avons trouvé les valeurs suivantes :

$\text{Incertitude } Q_{CH_4} = 2.067 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{h} \text{ \& } \text{Incertitude } Q_{CH_4 \text{ relative}} = 2\%$

3.5.3 Incertitudes sur les analyses en laboratoire

Dans le cas du projet CH4+ les échantillons solides sont réfrigérés directement après prélèvement puis transportés dans des boites isothermes polystyrènes en présence de blocs réfrigérants.

Incertitude absolue liée au potentiel méthanogène des intrants :

En faisant le calcul d'incertitudes proposé par la méthodologie, nous avons trouvé les valeurs suivantes sur le gisement :

$$\Delta MS = 0.07\%$$

$$\Delta MV = 0.10\%$$

$$\Delta BMP = 20\%^8$$

$$\Delta \text{quantité intrants} = 10\% \text{ (Mesuré avec le grappin)}$$

La source d'incertitude ayant la plus grande incidence est le tonnage des gisements suivie par l'incertitude liée à la mesure du BMP du gisement. En effet, les gisements possèdent une composition hétérogène et une densité différente ce qui peut affecter la précision des mesures. L'utilisation d'un grappin pour mesurer les quantités des intrants issues de céréales par exemple peut entraîner des pertes ou des fuites pendant le trajet jusqu'au bol mélangeur.

De ce fait, **l'utilisation uniquement du potentiel méthanogène n'est pas conseillée pour attester l'efficacité d'un prétraitement ou d'un co-traitement à niveau industriel** car il faudrait voir un écart d'au moins 40% (20% d'erreur par digesteur) pour voir une différence significative. Par conséquent, dans ce projet de recherche, pour évaluer la significativité des différences de production de biométhane nous nous basons sur les valeurs et erreurs du débit de biométhane calculé avec les débitmètres gaz et l'analyseur de gaz (biogaz et biométhane). L'erreur relative aux tonnages des intrants individuels est évaluée et corrigée afin de s'assurer que les deux digesteurs ont une alimentation identique (pas de différence significative). A ces données s'ajoutent les données de la MS/MV montrant l'homogénéité des substrats entre les deux digesteurs tout au long de l'expérience.

Dans le but de limiter les incertitudes du BMP liées à la quantité d'intrants introduits dans le méthaniseur, il est important d'avoir la même quantité d'intrants dans les systèmes test et de référence. Pour cela, il est important d'ajuster le tonnage à un niveau hebdomadaire ou mensuel afin d'éviter toute sous- ou surestimation de l'impact de la technologie lié à une surcharge de gisement (voir dérives et action corrective sur le titre 3.6.1).

Au vu des incertitudes liées au BMP, nous utilisons ce paramètre à titre indicatif pour s'assurer du bon fonctionnement du procédé : en théorie, une augmentation du BMP doit être accompagnée d'une augmentation de production de méthane).

3.5.4 Incertitudes sur le calcul de la consommation électrique

La méthodologie de suivi de la consommation électrique par calcul de la puissance avec l'ampérage et la tension possède certaines limites car une incertitude de mesure assez élevée (Tableau 10) :

⁸ Incertitude en intégrant la mesure du BMP en lui-même et l'incertitude d'échantillonnage

Tableau 10 – Paramètres affectant l'exactitude du calcul

Variable concernée	Limite	Incertitude estimée
Ampérage	Mis à jour qu'une fois chaque 2 semaines, le reste du temps elle est considérée comme constante alors qu'en réalité elle varie.	± 15% de la mesure
Tension	Considérée comme constante alors qu'en réalité elle varie.	± 5% de la mesure
Temps de fonctionnement	Temps comptabilisé uniquement lorsque 1h est complétée.	± 2% de la mesure

3.6 ANALYSE DES PERFORMANCES

Une fois l'acquisition des données faite, il ne reste plus qu'à traiter les données pour que l'on puisse ressortir les informations nécessaires à l'évaluation de l'efficacité de la technologie. L'ensemble des graphiques qui sont présentés ci-contre sont analysés chaque semaine par l'ensemble de l'équipe de recherche du projet CH4+.

3.6.1 Quantité d'intrants dans les méthaniseurs

Il est essentiel de vérifier que la quantité de matière incorporée quotidiennement dans les deux méthaniseurs est identique. En effet, incorporer plus de matière dans un méthaniseur induirait une surproduction de biogaz qui n'est pas due à l'effet de la technologie en question. Il est important de vérifier cela pour chaque type d'intrant. Nous calculons également quotidiennement pour chaque intrant l'écart $\frac{MTH10 - MTH20}{MTH20}$ entre la quantité incorporée dans le méthaniseur test (MTH10) et le méthaniseur témoin (MTH20). En faisant le calcul d'incorporation totale du mois dans les 2 digesteurs on observe que l'ajout de matière peut être considéré comme identique :

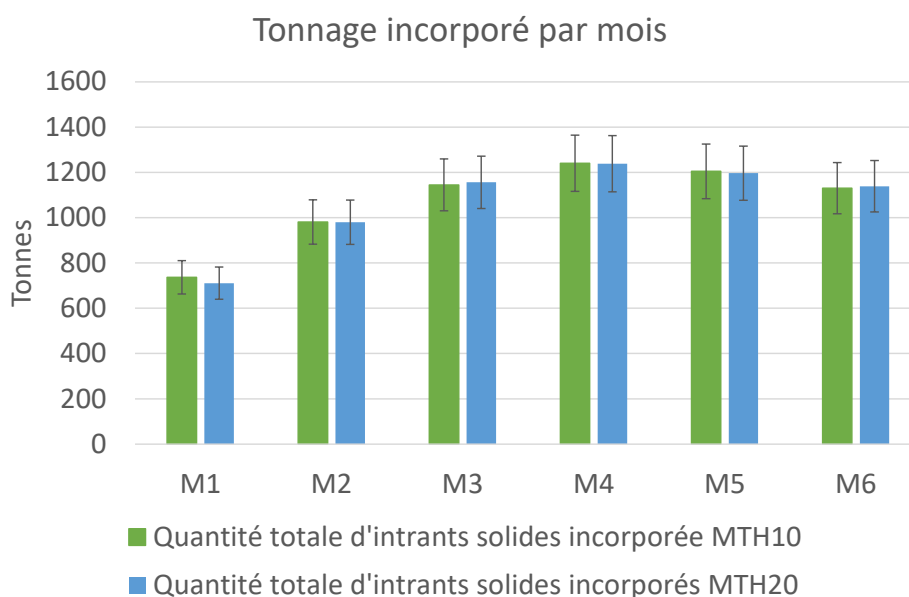


Illustration 15 – Tonnage incorporé par mois

Dérives et actions correctives :

En cas de différences au niveau des tonnages des intrants entre les deux digesteurs, l'exploitant procède à la régulation des quantités d'intrants liquides et surtout solides chaque fin de semaine et de mois afin de maintenir les mêmes conditions d'alimentation.

De plus, il pourrait exister une dérive par rapport au comptage des quantités incorporées par le grappin dans le bol mélangeur. Ceci peut arriver lorsque les tas d'intrants solides (fumier et ensilage) se trouvent proches l'un de l'autre. En conséquence, il pourrait y avoir une légère différence d'incorporation entre les digesteurs. A noter que le grappin n'est pas adapté à soulever des quantités d'issues de céréales du fait de leur texture très fine induisant une perte de matière tout au long de son trajet. Ces deux erreurs sont similaires pour les deux digesteurs.

3.6.2 Stabilité biologique

Le processus de méthanisation est biologique, cela induit qu'il est fragile et doit respecter un équilibre pour favoriser son fonctionnement. Suivre les paramètres biologiques permet de contrôler l'assimilation de la ration et l'adaptation de la flore microbienne dans chaque méthaniseur. Une instabilité dans les méthaniseurs conduirait à une baisse de production de biogaz et fausserait donc l'évaluation de l'efficacité des technologies.

Pour suivre cela, nous avons réalisé un graphique par paramètre biologique intégrant pour chacun d'entre eux les valeurs seuils à ne pas dépasser (comme montré en exemple sur l'illustration 16). Nous suivons également la moyenne et l'écart-type de l'ensemble des paramètres Illustration 17. Si la moyenne est hors des seuils ou que l'écart-type est trop important, cela signifie qu'il y a de l'instabilité dans le méthaniseur.

AGV/TAC

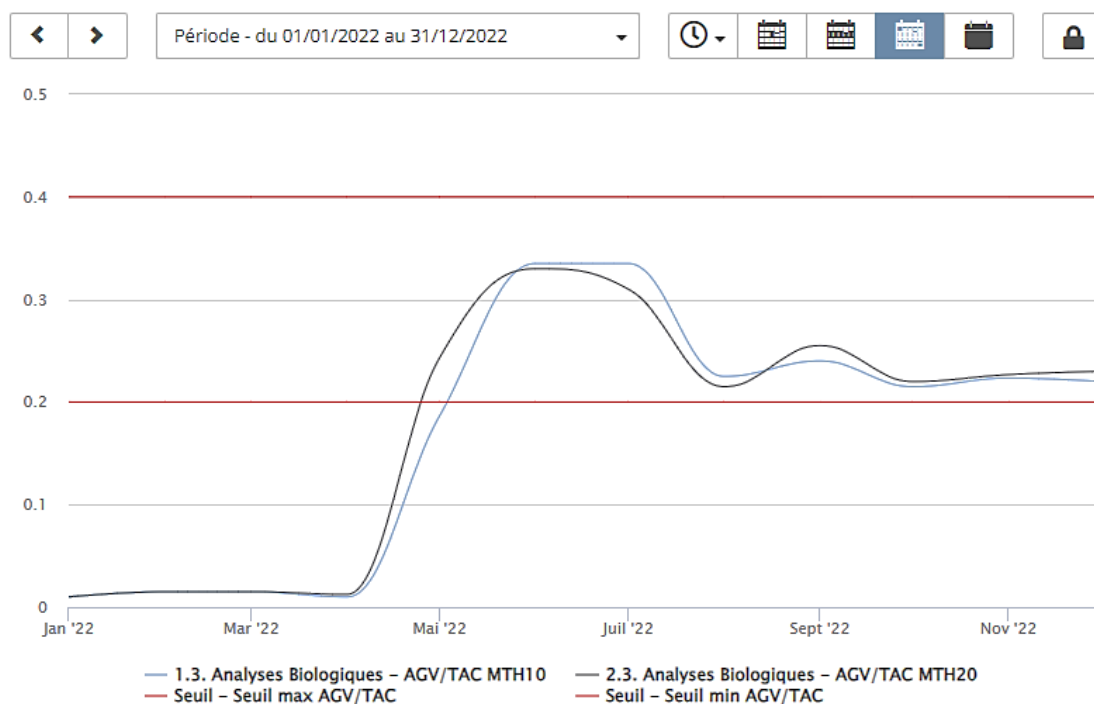


Illustration 16 – Exemple analyse graphique d'un paramètre biologique

	Unité	MTH10		MTH20		Seuil	MTH10/ MTH20
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type		
MS	g/kg	91.0	5.5	91.8	6.0	60 ; 100	99%
MV	g/kg	65.0	4.0	66.8	4.4	/	97%
AGV tot	mg/L	286.8	127.6	274.9	92.4	< 1 500	104%
pH	-	7.9	0.1	7.9	0.1	[7 ; 8]	100%
NH4+	mg/L	2 775.1	248.7	2 758.9	184.1	< 3 500	101%

Illustration 17 – Analyse moyenne / écart-type biologie

3.6.3 Production de biométhane supplémentaire

Les technologies sont testées pour augmenter la production de biométhane des unités de méthanisation, il est donc primordial de suivre avec attention la production de biométhane dans les deux méthaniseurs.

Nous calculons tout d’abord, à partir de la ration incorporée et des analyses de MS/MV et de BMP d’intrants, le potentiel méthanogène incorporé dans chaque méthaniseur (voir paragraphe 2.5.3.1, P17). Nous le comparons ensuite avec la production réelle de méthane journalière, hebdomadaire et mensuelle dans les deux méthaniseurs.

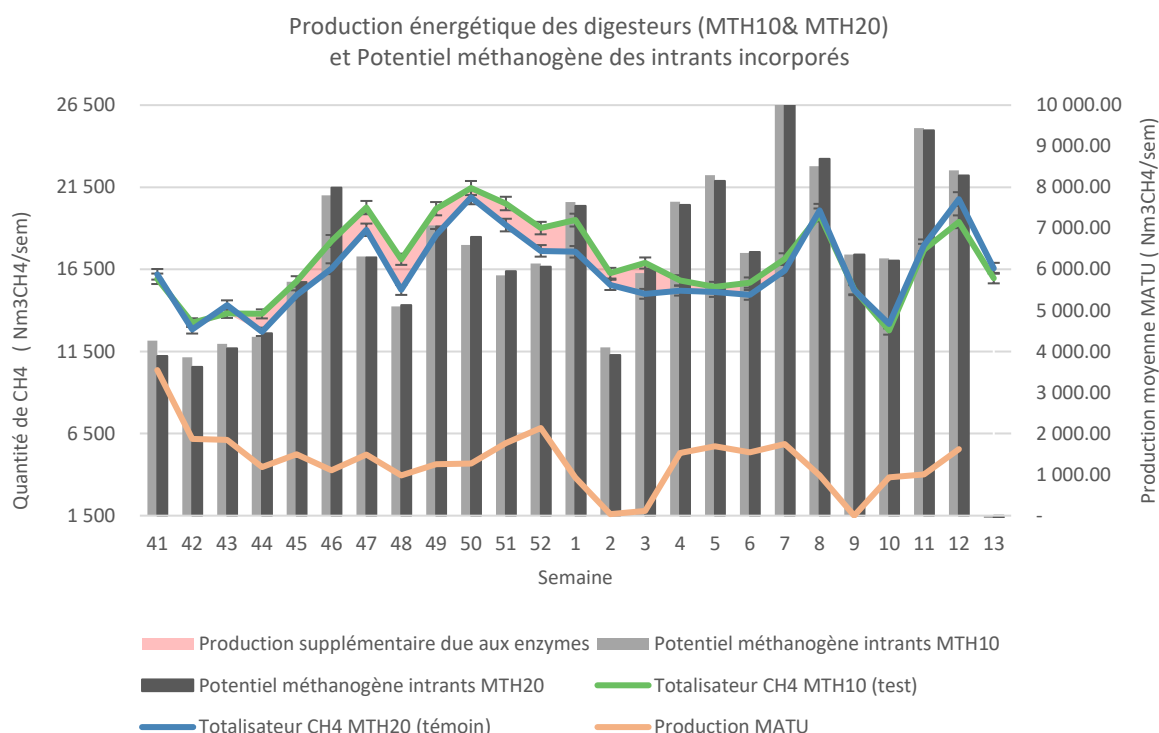


Illustration 18 – Exemple de suivi de la production/potentiel

Ce graphe représente l’évolution du potentiel méthanogène des intrants et du débit total CH₄ des deux digesteurs (MTH10 et TH20) en fonction du temps (en semaine). Il est important de rappeler que durant les 3 premières semaines, les deux digesteurs sont en phase de stabilisation après homogénéisation et que la technologie n’est pas encore utilisée sur le digesteur 1. Ceci se traduit par un total de CH₄ quasiment identique dans les deux réacteurs. A partir de la semaine 4, la

technologie est lancée. Ceci se traduit sur le graphe par une augmentation significative de la production de méthane à partir de la première application de la technologie. Une augmentation moyenne de 7% de méthane est observée pendant 16 semaines. Au-delà de cette semaine, la production des deux digesteurs devient similaire, montrant une baisse de l'efficacité de la technologie implémentée. Ceci a été relié à plusieurs hypothèses qu'il est important de réfuter ou de valider afin de pouvoir modifier la technologie de façon à éviter ces phénomènes de désactivation. L'intérêt d'effectuer cette expérience sur 20 semaines est clairement reconnu à travers les résultats obtenus. En effet, une durée expérimentale plus courte aurait potentiellement omis la neutralisation de l'effet de la technologie.

3.6.4 Composition du biogaz produit

Les technologies sont susceptibles de modifier la composition du biogaz produit. Pour suivre cela, nous avons réalisé un graphique par molécule présente dans le biogaz (CH₄, CO₂, H₂S, H₂, O₂) comparant leur taux dans MTH10, MTH20 et MATU. Nous suivons également la moyenne et l'écart-type de l'ensemble des gaz ainsi que l'écart $\frac{MTH10 - MTH20}{MTH20}$.

	Unité	MTH10		MTH20		MTH10/ MTH20
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
CH4	%	54.6	0.7	54.3	0.8	100%
CO2	%	45.5	0.4	45.8	0.5	99%
H2S	ppm	201.1	79.5	207.2	87.2	97%
H2	ppm	37.7	3.6	37.9	5.2	99%
O2	%	0.45	0.06	0.43	0.08	104%

Illustration 19 – Analyse de la moyenne et de l'écart-type pour la composition du biogaz

Taux CH4 (Analyseur)

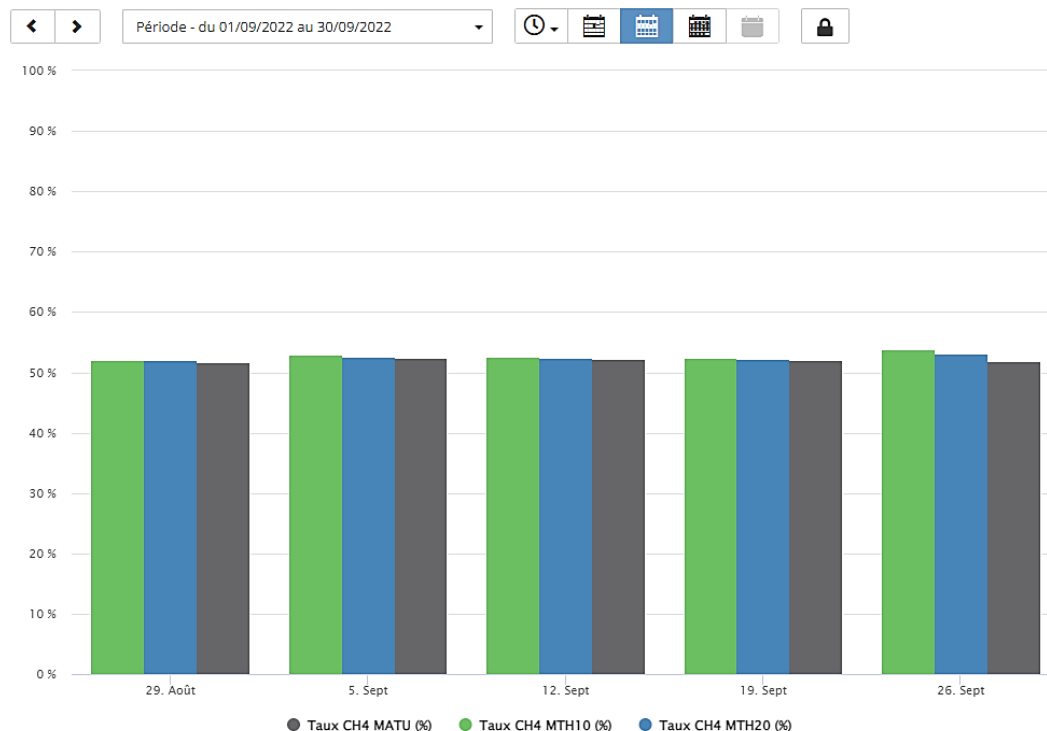


Illustration 20 – Exemple d'analyse graphique de la composition du biogaz

3.6.5 Suivi de la consommation électrique

Dans le cadre du projet CH4+, les principaux éléments déjà présents sur site et ceux installés selon le besoin du projet ont été équipés de compteurs électriques DIRIS Digiware.

Du fait du retard de livraison de certains de ces compteurs, causé par la pénurie des matériaux en 2022, nous avons eu recours, pendant la première phase de test à des formules de calcul de la consommation électrique des agitateurs, pompes et broyeurs, et ce, en utilisant des transmetteurs d'intensité et des compteurs de temps de fonctionnement.

Le calcul est le suivant :

Soit la puissance triphasée :

$$P = I \times U \times \sqrt{3} \times \cos \varphi$$

Avec I l'ampérage de l'équipement, U la tension imposée dans le circuit électrique du site (400 V dans notre cas) et le $\cos \varphi$, la mesure du déphasage entre tension et courant.

($\cos \varphi = 0.83$ pour les agitateurs submersibles *ou* $\cos \varphi = 0.85$ pour les agitateurs de traversée de paroi).

D'où l'énergie consommée par un équipement :

$$E = P \times t$$

Avec t le temps de fonctionnement de l'équipement (calculé par l'automate).

Les histogrammes suivants représentent les consommations électriques des agitateurs classés par méthaniseur ainsi que le niveau des digesteurs.

Consommation électrique AGI MTH10 et MTH20

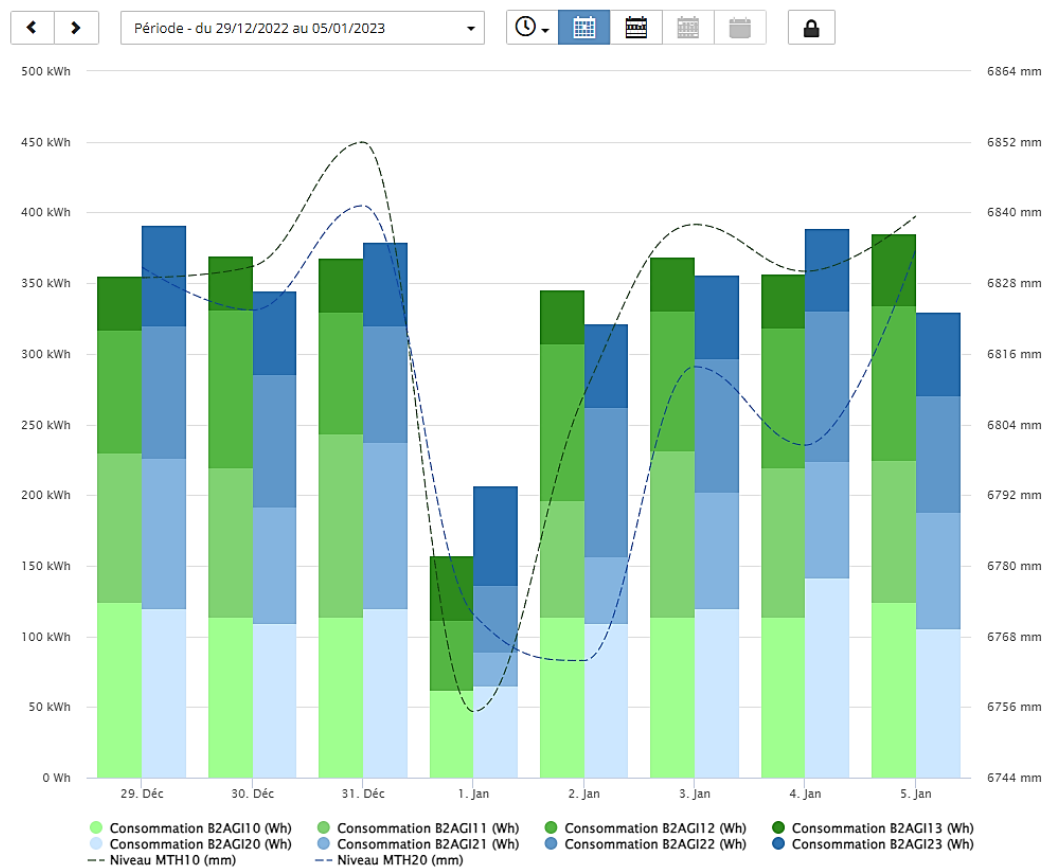


Illustration 21 – Exemple d’analyse graphique de la consommation électrique.
 La série B2AGIXX représente les capteurs installés sur différents équipements.
 Les numéro paires (à gauche de la légende) sont reliés au digesteur 1
 et leurs équivalents impaire (à droite) sont reliés au digesteur 2.

Cependant, il n’a pas été possible de relier ces consommations avec un possible réduction de la viscosité entraînant une réduction de la consommation électrique. Compte tenu des différentes erreurs et incertitudes reliées principalement à la viscosité et l’hétérogénéité de la matière, les résultats obtenus ne permettent pas de faire une conclusion en ce qui concerne le lien entre la viscosité et la consommation électrique. Pour pouvoir le faire, il faudra développer une méthode plus précise et comportant moins d’incertitudes.



3.7 ACQUISITION DES DONNÉES

La section suivante explique l'architecture du système d'acquisition des données du projet CH4+ (Illustration 22).

3.7.1 Architecture générale

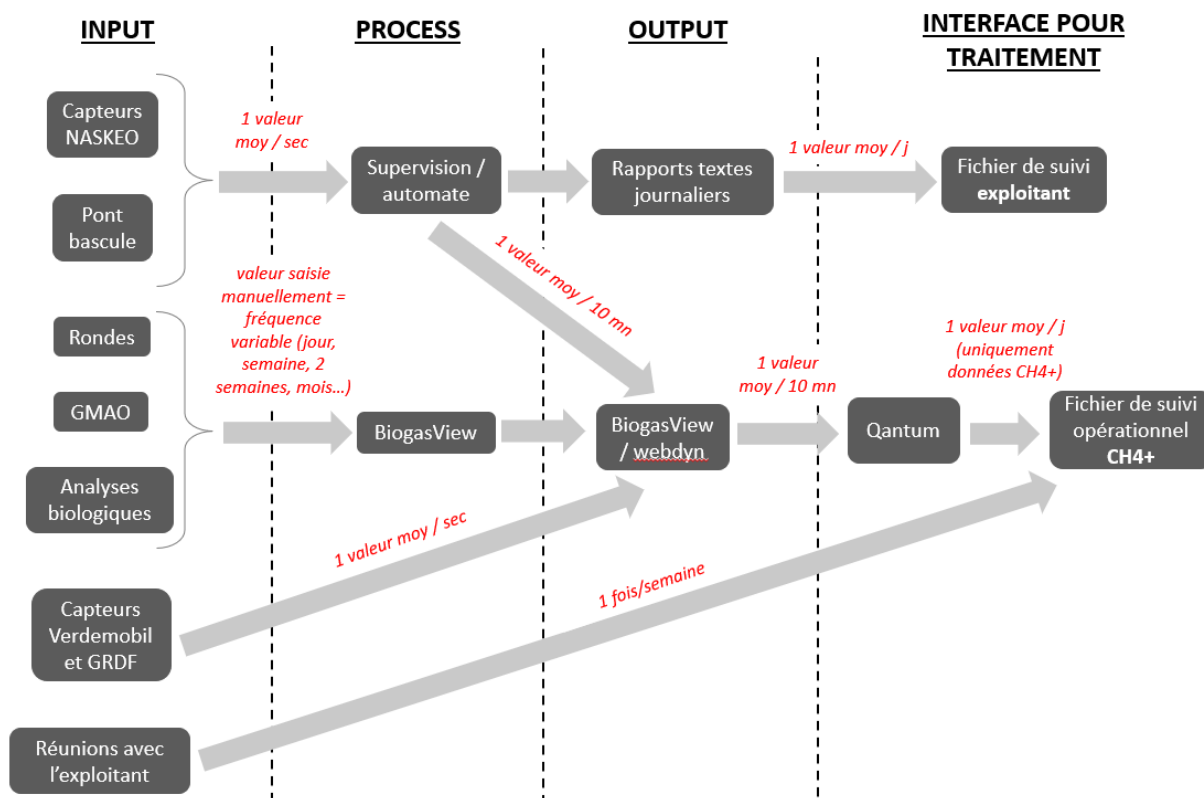


Illustration 22 – Architecture du système d'acquisition des données

3.7.2 Définitions des termes de l'architecture

- **Supervision / Automate :** Donne un état des lieux instantané du procédé et permet d'actionner directement tous les éléments pour faire fonctionner l'installation. Elle est utilisée principalement par les exploitants pour le pilotage à distance des équipements du site (Illustration 23)

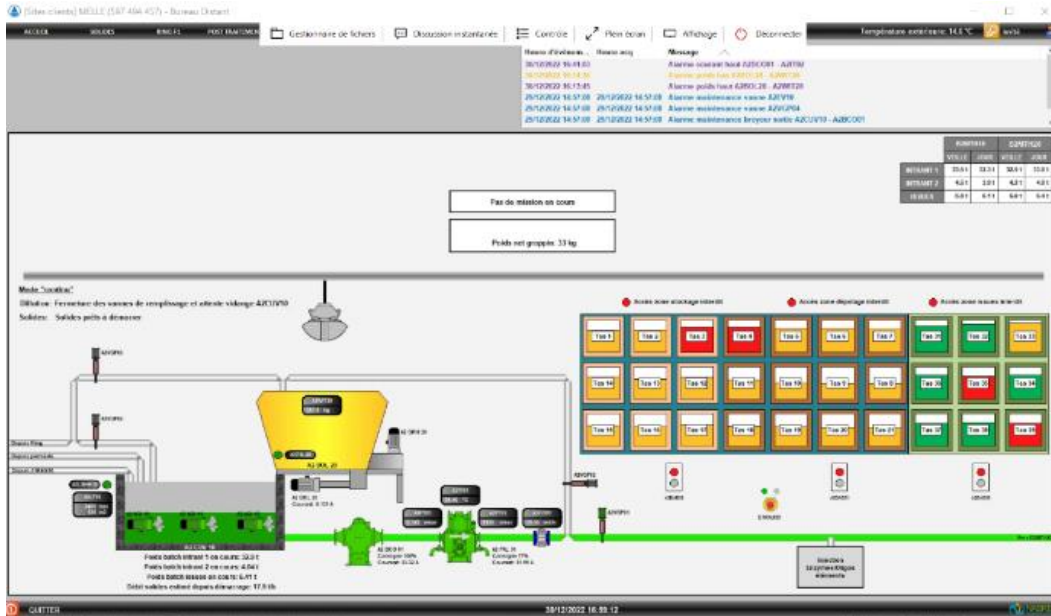


Illustration 23 – Exemple d’affichage de la supervision

- **Fichier de suivi exploitant** : Regroupe les données de l’ensemble des rapports textes en un unique fichier Excel (Illustration 24).

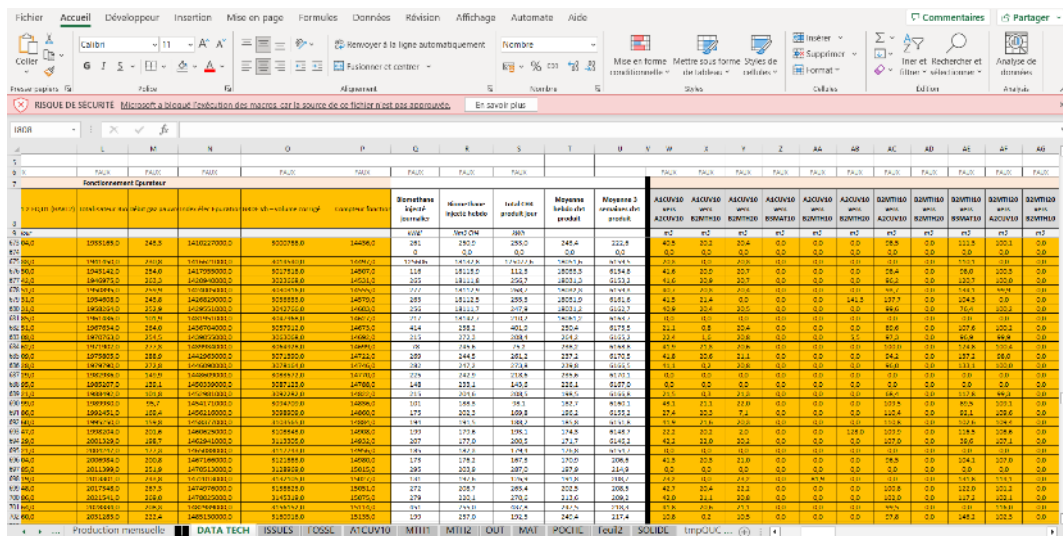


Illustration 24 – Capture d’écran du fichier de suivi exploitant

- **Rapports textes journaliers** : Donnent de manière quotidienne, selon le type de capteur, un cumul ou une moyenne de l’ensemble des valeurs obtenues au cours de la journée précédente. Un nouveau rapport est édité chaque jour (Illustration 25).

Bilan liquides

A1CUV10 vers A2CUV10: 22.398620
 A1CUV10 vers B2MTH10: 1.550350
 A1CUV10 vers B2MTH20: 20.844830
 A1CUV10 vers B3MAT10: 0.000000
 A2CUV10 vers B2MTH10: 0.000000
 A2CUV10 vers B2MTH20: 5.493341
 B2MTH10 vers A2CUV10: 97.315670
 B2MTH10 vers B2MTH20: 0.000000
 B2MTH10 vers B3MAT10: 96.949660
 B2MTH20 vers A2CUV10: 99.936340
 B2MTH20 vers B2MTH10: 0.000000
 B2MTH20 vers B3MAT10: 126.993400
 B3MAT10 vers A1CUV10: 0.000000
 B3MAT10 vers A2CUV10: 19.691840
 B3MAT10 vers B2MTH10: 0.000000
 B3MAT10 vers B2MTH20: 0.000000
 B3MAT10 vers D1PAV01: 187.144900
 B3MAT10 vers D1CEN01: 0.000000
 B3MAT10 vers D4LAG01: 0.000000
 D1CUV10 vers A2CUV10: 97.496580

Illustration 25 – Exemple de rapport texte journalier

- BiogasView/Webdyn** : Plateforme en ligne qui permet, en plus de récolter les données des capteurs, de renseigner l'ensemble des données qui ne sont pas mesurées par des capteurs (analyses en laboratoire, indications sur l'état des équipements...) (Illustration 26).



Illustration 26 – Capture d'écran de BiogasView

- Quantum** : Offre des outils pour traiter les données (graphiques, opérations...). Sur ce logiciel que nous avons créé, une interface est dédiée au projet CH4+, ne faisant apparaître que les données utiles pour évaluer l'efficacité des technologies de traitement (Illustration 27).

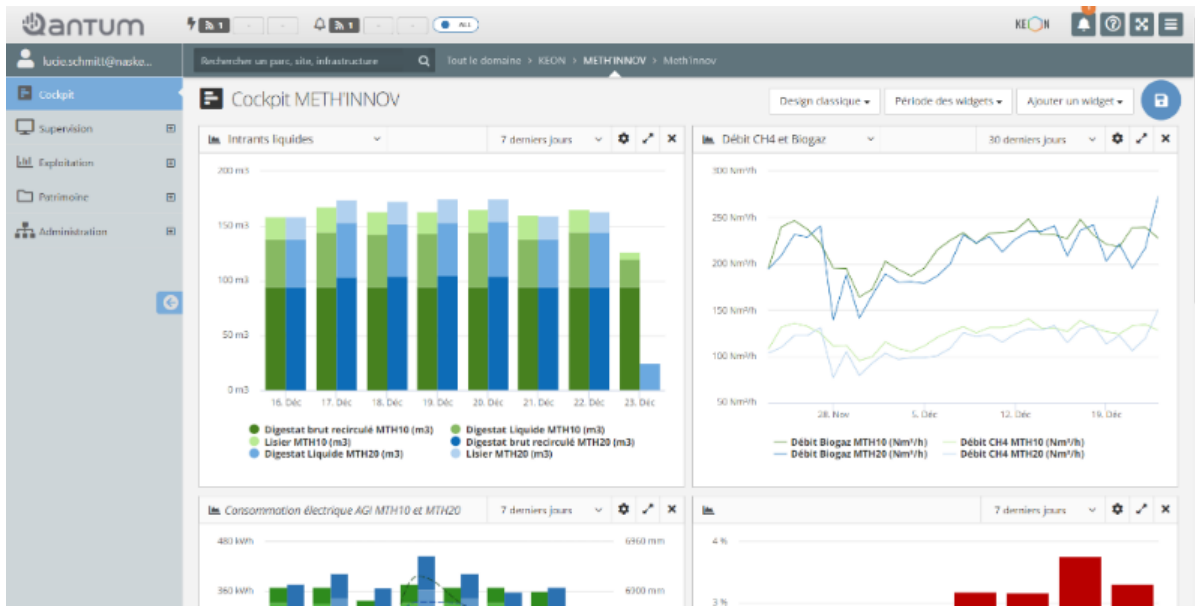


Illustration 27 – Capture d'écran de Qantum

- Fichier de suivi opérationnel CH4+** : Comporte uniquement les données essentielles pour CH4+ et regroupe également les bilans des réunions hebdomadaires réalisées avec l'exploitant dans lesquelles sont évoqués les différents événements qui sont arrivés sur le site dans la semaine (pannes, maintenance, fuite...) (Illustration 28).

Catégorie		Production de biogaz supplémentaire																				Débit Biogaz					
Date de saisie		MTH10										MTH20										Ratio débit CH4 MTH10/MTH20		MTH10			
Tâche		MTH10 (M3)					MTH20 (M3)					MTH10 (M3)					MTH20 (M3)					MTH10					
Révision		MTH10 (M3)					MTH20 (M3)					MTH10 (M3)					MTH20 (M3)					MTH10					
Date		MTH10 (M3)					MTH20 (M3)					MTH10 (M3)					MTH20 (M3)					MTH10					
N°		MTH10 (M3)					MTH20 (M3)					MTH10 (M3)					MTH20 (M3)					MTH10					
37/10-23/10	42	1754	2047	2254	1814	2070	1965	1465	1595	14286	205	1750	2550	2231	1177	2045	1847	1865	1423	174,62	121,72	102,26	81,500	122,65	95,058	70,354	104,5013557
24/10-30/10	43	1210	2073	2305	2144	2545	2130	1863	2038	28771	1072	2207	2419	2211	2491	2474	1070	2072	7143	112,87	93,883	85,187	80,97	102,17	85,338	111,16	86,15044304
31/10-06/11	44	1816	2136	2212	2329	2233	2086	2067	2094,73	1273	2227	2438	2462	2833	2529	2223	2045,14	1827,13	1331,6	129,39	102,89	123,49	132,59	130,59	108,24	96,75	130,614
07/11-16/11	45	1884	2438	2786	2725	2445	2590	2442	2676,89	1257	2546	2469	2785	2658	2599	2115	2384,57	1977,1	1324,6	129,4	98,119	122,24	107,85	99,509	106,20	115,46	107,497
14/11-20/11	46	1788	2132	2088	2584	2319	2068	1879	2050	1880	2069	2267	2276	2062	2182	2030	2098,57	1477,1	1118,9	102,48	110,54	118,58	117,88	106,80	135,08	112,149	
21/11-27/11	47	3017	2423	2547	2144	3234	3161	3091	2440	2718	2505	2478	2575	2403	2685	2037	2742,24	1977,1	1311	110,05	102,02	122,1	111,21	106,77	47,31	104,033	
28/11-04/12	48	2538	2088	2282	2872	2724	2504	2514	2929,71	1858	2488	2876	2762	2538	2342	2215,66	1512,1	1498,8	108,84	128,58	109,88	130,33	133,29	101,4	154,214		
05/12-11/12	49	2030	2054	3006	3144	2780	3100	3123	2590,2877	2240	2385	2589	2592	2099	2250	2740	2693,4289	1512,1	121,01	120,16	126,21	103,08	104,20	105,08	114,2	110,598	
12/12-18/12	50	3170	3322	3066	3141	3010	3109	3134	3166	2600	3001	3080	3189	3107	3070	3121	3028,714	1512,1	102,77	107,57	95,945	99,081	111,50	107,80	100,1	104,5528021	
19/12-25/12	51	3028								2844																	

Illustration 28 – Capture d'écran du fichier de suivi opérationnel CH4+

4 CONCLUSIONS, RETOURS D'EXPÉRIENCE ET PERSPECTIVES

Avec la crise énergétique et environnementale actuelle, la valorisation des résidus organiques pour la production d'énergie, à travers la production de biogaz, est l'un des leviers majeurs à développer et à optimiser. La rentabilité des sites de méthanisation en France reste intrinsèquement liée aux tarifs d'achat conventionnés, qui seront diminués dans les années à venir. Pour pallier cette baisse de rentabilité, il est indispensable d'identifier et de mettre en place des solutions innovantes qui permettront d'améliorer les performances globales des sites de méthanisation. L'un des leviers les plus rapides à activer est l'augmentation du potentiel de production de biogaz à partir d'un même substrat grâce aux pré- ou co-traitements.

Plusieurs technologies de traitement des substrats, avec des résultats prometteurs à niveau laboratoire ou pilote, ont du mal à être validées à niveau industriel car il est difficile de le réaliser à plusieurs niveaux (intégration du démonstrateur à l'unité, réussir un suivi détaillé avec les équipements à disposition sur place, événements d'exploitation). Le site de Methinnov' (79) a été modifié, équipé en profondeur et les équipes formées pour pouvoir appliquer ce protocole exigeant sur le volet opérationnel. Le site est désormais prêt à accueillir et tester toute technologie de traitement des substrats en vue d'évaluer leurs performances industrielles, avec le suivi des équipes R&D **NASKEO**. Pour aider à développer la filière, GrDF a lancé l'AAP « Prétraitements des intrants en méthanisation » avec un volet sur le développement d'une méthode d'évaluation des prétraitements ou co-traitements à niveau industriel. **NASKEO** a été lauréat de cette AAP pour adapter et partager publiquement la méthodologie développée dans le cadre du projet CH4+.

Le développement de cette méthodologie a permis de constater que même en voulant être très rigoureux, l'application des pré/co-traitements à niveau industriel présente divers défis. Certains ont été relevés, apportant des points forts à la méthodologie, tandis que d'autres, plus complexes, représentent des points faibles, offrant des perspectives d'amélioration. Ci-dessous nous allons décrire ces éléments.

Prise en compte des événements d'exploitation :

Concernant les points forts, la méthodologie cherche à prendre en compte et à gérer les différents événements d'exploitation pouvant impacter le fonctionnement des tests. Ces types d'événements peuvent inclure l'indisponibilité des matières premières, la panne d'un équipement, l'ajout de nouveaux équipements, l'intervention de curage, l'augmentation d'injection ou de production électrique du site, les erreurs de pesage ou l'ajout manuel de matières, entre autres. Tous ces événements doivent être consignés, et des modifications sur les données mesurées doivent être effectuées. Les principales raisons d'intégrer ces éléments sont les suivantes :

Fiabilité des résultats : Ces événements peuvent avoir un impact sur les résultats de la recherche. En les suivant et en les prenant en compte dans l'analyse, nous nous assurons de la fiabilité et de l'exactitude des conclusions tirées.

Anticipation des risques : Ils peuvent être porteurs de risques pour la réussite d'un projet de recherche, notamment la sous- ou surestimation des bénéfices. En les gérant efficacement, il serait possible d'anticiper les risques et de minimiser leurs impacts négatifs sur le projet.

Adaptation du projet : Certains événements peuvent contribuer aux ajustements de la méthodologie du projet de recherche.

Établissement d'un lien de communication étroit avec l'exploitant :

La réussite d'une expérimentation hébergée dans un site de méthanisation dépend en grande partie de la collaboration étroite entre l'exploitant du site et l'entreprise réalisant le projet. Il est nécessaire de s'assurer de sa participation active et de sa coopération tout au long du projet, car celui-ci possède une expertise spécifique de son site qui pourrait aider à la mise en place et à la gestion régulière du projet. Il pourrait également faciliter l'accès aux données opérationnelles, telles que les informations sur les paramètres de fonctionnement, les rendements, etc. De plus, il pourrait aider à apporter d'éventuelles explications quant aux problèmes rencontrés ou aux erreurs identifiées susceptibles d'avoir un impact sur le projet.

Mise en place d'une homogénéisation des cuves :

Le système d'acheminement de matière centralisé (RING), tel qu'installé par Naskeo, a été un avantage pour la faisabilité de l'expérience, notamment pour l'étape d'homogénéisation. Cette phase est essentielle pour garantir l'égalité du contenu des deux digesteurs et assurer ainsi la fiabilité des résultats obtenus.

Validation des performances sur une période de test supérieure à 2 temps de séjours :

L'intérêt d'effectuer des tests sur une durée minimale de 2 temps de séjour est de suivre de près, sur le long terme, l'effet de la technologie appliquée. En effet, dans le cas de l'exemple donné en partie 3 du document, l'arrêt prématuré de cette expérience aurait conduit à des résultats incorrects, démontrant un effet bénéfique perçu durant les 10 premières semaines. Ce n'est qu'à la phase finale du test, considérée comme stabilisée, que l'effet du traitement s'estompe. Diverses hypothèses ont été étudiées sans parvenir à corriger cette réduction de l'écart de potentiel, concluant ainsi à un manque d'intérêt pour la commercialisation de cette technologie, malgré les résultats initiaux optimistes.

Modifications du site :

Pour la mise en place de la méthodologie avec des conditions opératoires renforcés, le site de Meth'innov a été hautement instrumenté et un suivi précis a été possible. Ce site de méthanisation, en partenariat avec Naskeo, pourrait être réutilisé pour des tests futurs pour profiter des conditions du site et de l'instrumentation déjà mise en place.

Difficulté de la prise en compte des incertitudes :

Une des limites de cette méthodologie est liée à la difficulté d'intégrer les calculs d'erreur liés à la quantité de paramètres en jeu. Il a donc été choisi de renforcer les conditions opératoires contraignantes pour limiter les différences entre les digesteurs (2 lignes de production parallèles et identiques, des substrats relativement homogènes tels que le fumier, l'ensilage, les issues de céréales et le lisier). Il a été observé que la matière ajoutée à chaque digesteur n'avait pas de différence significative tout au long de l'expérience et que la production des deux cuves, après homogénéisation et avant le lancement du traitement, montrait une production équivalente. Cela montre que ce protocole exigeant permet de minimiser les incertitudes liées à la matière, permettant conserver uniquement l'incertitude liée au débitmètre pour la production de biogaz.

Il reste cependant ouvert la question de l'intégration des variations de production liées à l'inertie de certains substrats qui ont une cinétique de production lente, comme les fumiers. Selon le retour de l'exploitant, ces substrats peuvent commencer à exprimer leur potentiel jusqu'à 5 jours suivant leur incorporation alors que des substrats à dégradation rapide peuvent produire du méthane dans la journée.

Le cas particulier de la mesure de viscosité :

La mesure de la viscosité sur des substrats hétérogènes comme le digestat s'est révélée très difficile. En effet, il a été compliqué de trouver une analyse de laboratoire adaptée. L'analyse trouvée n'a pas montré de résultats dans sa configuration classique (en paliers montants de cisaillement). Nous avons obtenu des résultats plus réalistes en réalisant des mesures en paliers descendants, ce qui signifie effectuer une déstructuration initiale du digestat et une rotation au taux de cisaillement élevé pour ensuite descendre progressivement. À l'heure actuelle, ce type d'analyses au laboratoire reste onéreux, et donc, selon le budget du projet, peu de points pourraient être mesurés au long de l'expérience.

Une autre technique de mesure plus empirique, utilisant un volume connu et une pente fixe avec une graduation, a permis de comparer la vitesse d'écoulement ou la consistance des digestats, montrant des différences notamment sur les échantillons avant et après le traitement de la matière. Ces analyses ont montré en tous cas des fortes variations sur certaines mesures, ce qui n'a pas permis d'observer des différences entre la vitesse d'écoulement des digestats des deux digesteurs pendant la phase stabilisée de l'expérience (4 dernières semaines). Pour l'instant, comme les incertitudes liées à la viscosité sont relativement grandes, il n'est pas possible d'émettre de conclusion concrète et significative sur la variation de ces paramètres entre les digesteurs. Il est donc nécessaire par la suite de se focaliser plus longtemps sur ce problème afin de trouver une méthode de mesure fiable et précise.

Difficulté de la comparaison de la consommation électrique

Le principal intérêt technico-économique de réduire la viscosité du digestat est de diminuer la consommation électrique du site et l'usure des équipements. Il n'a pas été possible, avec la méthodologie proposée, de faire un lien entre la viscosité et la consommation électrique en raison de la grande variabilité des deux mesures. L'installation de compteurs s'est avérée très lente en raison des effets de la crise des matériaux de 2022. Une tentative a été faite en calculant la consommation des équipements avec le suivi des ampérages, mais l'écart de mesure est élevé et donc non exploitable. Il est donc nécessaire par la suite de se focaliser davantage sur ce problème afin de trouver une méthode de mesure fiable et précise. L'installation des compteurs d'électricité pourra pallier cette difficulté rencontrée.

Forte incertitude des mesures BMP :

Compte tenu de la grandeur de l'incertitude générée par le BMP des gisements, cette valeur n'a pas permis de calculer avec précision le taux de biogaz possible à produire avec les substrats et d'observer une différence avec la production du digesteur témoin. Nous avons donc choisi de uniquement suivre le tonnage de matière et la matière sèche pour estimer le potentiel possible, ainsi que d'utiliser uniquement les valeurs des débitmètres pour comparer la production des digesteurs test et témoin (ce qui est uniquement possible grâce à l'incorporation identique des matières dans les digesteurs).