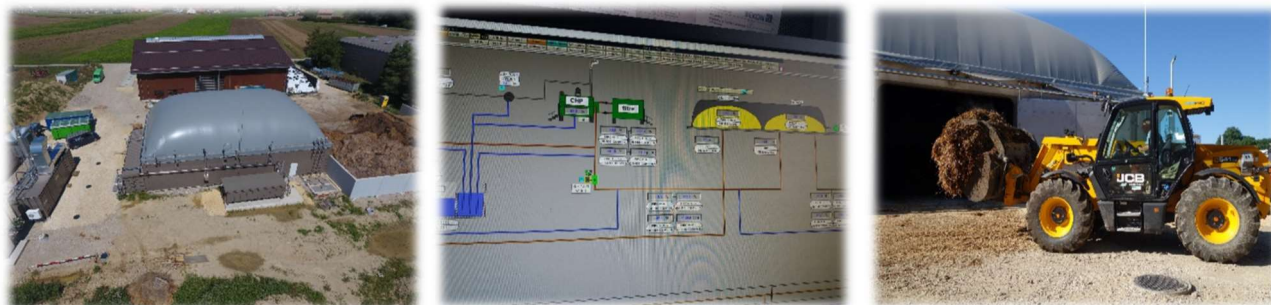




Rapport final de novembre 2022

Projet C. Morier - Installation de biogaz par voie sèche à alimentation discontinue

**Suivi des deux premières années de
fonctionnement de l'installation**



Source : BIOMAGRI



Date: le mardi 29 novembre 2022

Lieu: Berne

Prestataire de subventions:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement:

Néant.

Bénéficiaires de la subvention :

BIOMAGRI SA
p.a. Cédric Morier
Grand-Rue 29
1034 Boussens

Auteur(s):

Yves Membrez, EREP SA, yves.membrez@erep.ch
Nuria Montpart, EREP SA, nuria.montpart@erep.ch
Cédric Morier, BIOMAGRI SA, biomagri@gmail.com

Suivi du projet à l'OFEN:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Nathalie Bachmann, nathalie.bachmann@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/501371-01

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



Résumé

Le présent rapport reprend les données d'exploitation des deux premières années de fonctionnement de l'installation de biogaz de M. Cédric Morier à Boussens, basée sur une technologie par voie solide à alimentation discontinue et méthanisant des substrats d'origine agricole. L'installation a un caractère de démonstration puisqu'elle est la première de ce type à traiter des substrats agricoles en Suisse romande. L'analyse présentée vise à résumer son fonctionnement pendant toute cette période en termes d'alimentation, de production de biogaz, de valorisation énergétique, de résultats économiques,... Une estimation conservatrice évalue son rendement énergétique à 73% du théorique. Le caractère innovant de la conduite de ce type d'installation, certains dysfonctionnements survenus au cours de la période considérée et la dynamique lente du système rendent difficile l'atteinte d'un rythme de croisière, même après deux ans depuis sa mise en service. Selon son retour d'expérience, utile pour le développement de futures exploitations comparables, l'installation fonctionne correctement au niveau du processus biologique pour méthaniser des engrais de ferme et autres matières agricoles à haute teneur en matière sèche, mais sa dépendance en co-substrats pèse actuellement sur son bilan énergétique et économique. La faisabilité technique est démontrée, ce qui n'est pas encore le cas pour l'économique.

Summary

This report presents the operating data for the two first years of operation of Mr. Cédric Morier's biogas plant in Boussens (CH), which is based on a batch solid-state anaerobic digestion technology and mainly treats agricultural wastes. The analysis presented aims to summarize its operation during this entire period in terms of feeding, biogas production, energy recovery, economic results, etc. A conservative estimate evaluates its energy yield at 73% of the theoretical. The innovative character for the management of this technology, some dysfunctions occurred during the period considered and the slow dynamics of the system make it difficult to reach a steady state operation, even after two years since its start-up. The feedback from these two years is useful for the development of future biogas projects concerning the same technology, i.e. the plant works properly in terms of anaerobic degradation of livestock manure and other crops wastes but its dependence on other feedstock (e.g. wastes from food industry) currently impairs its energy and economic balance. The technical feasibility has been demonstrated, which is not yet the case for economic feasibility.

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht enthält die Betriebsdaten der ersten beiden Betriebsjahre der Biogasanlage von Herrn Cédric Morier in Boussens, die auf einer Feststofftechnologie mit diskontinuierlicher Beschickung basiert und Substrate von landwirtschaftlichen Ursprung vergärt. Die Anlage hat Demonstrationscharakter, da sie die erste ihrer Art ist, die landwirtschaftliche Substrate in der Westschweiz verarbeitet. Die Analyse soll ihren Betrieb während des gesamten Zeitraums in Bezug auf Beschickung, Biogasproduktion, Energieverwertung, wirtschaftliche Ergebnisse usw. zusammenfassen. Eine konservative Schätzung schätzt die Energieausbeute auf 73% des theoretischen Werts. Der innovative Charakter des Betriebs dieser Art von Technologie, einige Fehlfunktionen, die während des Berichtszeitraums auftraten, und die langsame Dynamik des Systems erschweren es eine befriedigende Stabilität zu erreichen. Die erlebten Erfahrungen sind nützlich für die Entwicklung künftiger vergleichbarer Anlagen, e.h. der Prozess passt zwar gut für die Vergärung von Mist und anderen landwirtschaftlichen Reststoffe mit hohem Trockensubstanzgehalt, aber ihre Abhängigkeit von anderen Co-Substraten verschlechtert derzeit ihre Energie- und Wirtschaftsbilanz. Die technische Machbarkeit ist nachgewiesen, was für die wirtschaftliche noch nicht gilt.



Table des matières

1	Introduction.....	5
1.1	Contexte du projet	5
1.2	Justification du projet.....	6
1.3	Objectifs du projet.....	6
2	Description des installations.....	6
2.1	Descriptif de l'installation	6
2.2	Dimensionnement des installations	7
3	Procédure et méthode de suivi	10
4	Travaux effectués et résultats.....	14
4.1	Les intrants méthanisés.....	14
4.2	Cycles d'alimentation.....	16
4.2.1	En phase de démarrage	16
4.2.2	En rythme de croisière.....	17
4.3	Production de biogaz.....	18
4.4	Valorisation du biogaz	19
4.4.1	Valorisation électrique	19
4.4.2	Valorisation thermique.....	21
4.5	Analyse comparative avec une technologie de digestion conventionnelle	22
5	Évaluation des performances	24
5.1	Bilan énergétique global	25
5.2	Bilan économique	26
6	A retenir pour le développement de projets comparables.....	27
6.1	Points de vigilance lors de la conception, de la réalisation et de l'exploitation de l'installation	27
6.2	Paramètres de suivi	28
6.3	Indicateurs de performance de l'installation en voie solide à alimentation discontinue à ce jour	29
7	Conclusions du suivi	31
8	Bibliographie.....	32



1 Introduction

1.1 Contexte du projet

En 2012 Monsieur Cédric MORIER présentait à l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) son projet d'installation de biogaz par voie sèche (ou solide) à alimentation discontinue, à Boussens (VD). Elle avait un caractère d'installation de démonstration sur le territoire, étant la première de ce type à traiter des substrats agricoles en Suisse romande.

Le projet prévoyait prioritairement le traitement de substrats agricoles à haute teneur en matières sèches, dont le fumier de cheval, largement disponible sur cette région vaudoise, et des résidus de cultures (p.ex. menue paille, paille de maïs, etc.). Lorsque ces matières sont méthanisées dans des technologies de digestion en voie liquide (constituant environ 90% du parc existant d'installations de biogaz en Europe), elles sont alimentées ensemble avec des matières liquides. Le traitement dans ces technologies entraîne des limites en leur incorporation et peut également entraîner des soucis d'exploitation (p.ex. la formation de couches flottantes, la sédimentation de matières minérales et la perte du volume utile de digestion, bouchage de canalisations...). La digestion en voie solide à alimentation discontinue devait permettre d'optimiser la valorisation énergétique de ces matières à haute teneur en matières sèches et une réduction des coûts de transport.

Le projet de Monsieur Morier consistait alors à méthaniser environ 3'000 tonnes par an de substrats organiques d'origine agricole dans une unité comportant 4 digesteurs de type garage. Le biogaz était valorisé dans un groupe de cogénération de 95 kW_{el} de puissance électrique avec utilisation de la chaleur excédentaire pour du séchage de céréales et de fourrage et pour le chauffage de bâtiments industriels proches du site d'implantation.

Entre 2013 et 2019, la disponibilité de plus de substrats a permis d'agrandir la taille du projet, dont la capacité de traitement a été portée à 4700 t/a, et sur cette base la concrétisation du projet a été réalisée avec la société BEKON, constructeur d'installations de méthanisation. L'ensemble de démarches administratives (demande du soutien à la production d'électricité renouvelable par le dispositif RPC ; trois procédures de mise à l'enquête ; la gestion des oppositions) ainsi que la recherche de financement ont alourdi et retardé sa réalisation. La société BiomAgri SA en tant que porteuse du projet a été créée ; son actionnariat étant constitué par un manège équestre et douze agriculteurs, fournisseurs de substrats et/ou repreneurs de digestat.

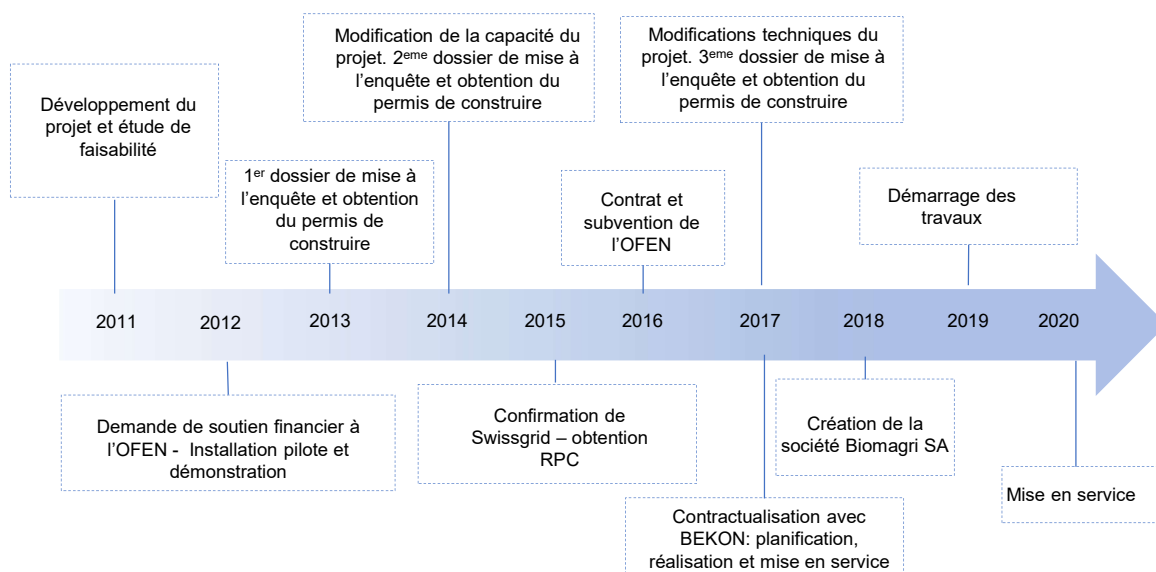


Figure 1. Chronologie du développement du projet de Monsieur Morier à Boussens.



Ce projet de biogaz agricole mettant en œuvre la technologie de la voie solide à alimentation discontinue apporte la démonstration de la faisabilité d'une solution de valorisation d'intrants solides issus principalement de l'agriculture dans une unité d'une capacité correspondant à des besoins locaux. Il peut ouvrir la voie pour d'autres initiatives de même nature pour autant que les conditions-cadres pour la création de nouvelles installations soient favorables à l'avenir.

1.2 Justification du projet

Le projet répond à la volonté d'un groupe d'agriculteurs de valoriser des intrants principalement agricoles et solides dans une installation de méthanisation mettant en œuvre la technologie de la digestion en voie solide à alimentation discontinue qui correspond aux caractéristiques et aux quantités de matières à traiter. Cette technologie devrait permettre la valorisation de ces matières de façon plus optimale, en évitant les inconvénients opérationnels de leur traitement dans des systèmes de digestion en voie liquide.

1.3 Objectifs du projet

En exploitant l'installation de biogaz de Boussens M.Cédric MORIER et ses partenaires de BiomAgri SA veulent démontrer la faisabilité technique et économique d'un modèle d'approvisionnement basé sur des intrants agricoles et des cosubstrats de provenance locale et sur une technologie de méthanisation, en voie solide à alimentation discontinue, encore très peu répandue en Suisse.

Le présent rapport reprend les données d'exploitation et les paramètres de suivi de l'installation des deux premières années de son exploitation. L'analyse présentée vise à résumer son fonctionnement pendant toute cette période et présente son état de fonctionnement actuel (substrats ciblés, production de biogaz par tonne de matière fraîche, rendement énergétique annuel, ...). Elle doit permettre aux porteurs de projets de méthanisation en voie solide à alimentation discontinue d'avoir les clés pour assurer le développement et le succès du projet.

2 Description des installations

2.1 Descriptif de l'installation

L'unité biogaz est constituée des éléments suivants :

- Réception et stockage des intrants : silos-fosses pour l'ensilage de végétaux ; fumière ; fosse de stockage d'intrants liquides (initialement des graisses de séparateur)
- Batterie de 4 digesteurs de type garages
- Valorisation énergétique du biogaz : container couplage chaleur-force et moteur à vapeur ; container chaufferie et container séchage de plaquettes de bois.
- Un biofiltre pour le traitement de l'air vicié et une torchère comme moyen de destruction du méthane ne pouvant être valorisé.

L'installation est annexée à un hangar agricole dans lequel M. Cédric MORIER regroupe les activités de son exploitation agricole.



La figure 2 schématise et rappelle les aspects les plus importants du fonctionnement de l'installation de méthanisation agricole de BiomAgri SA. Les rubriques « substrats prévus » ainsi que les « valeurs cibles » correspondent aux prévisions lors de la phase de conception de cette installation.

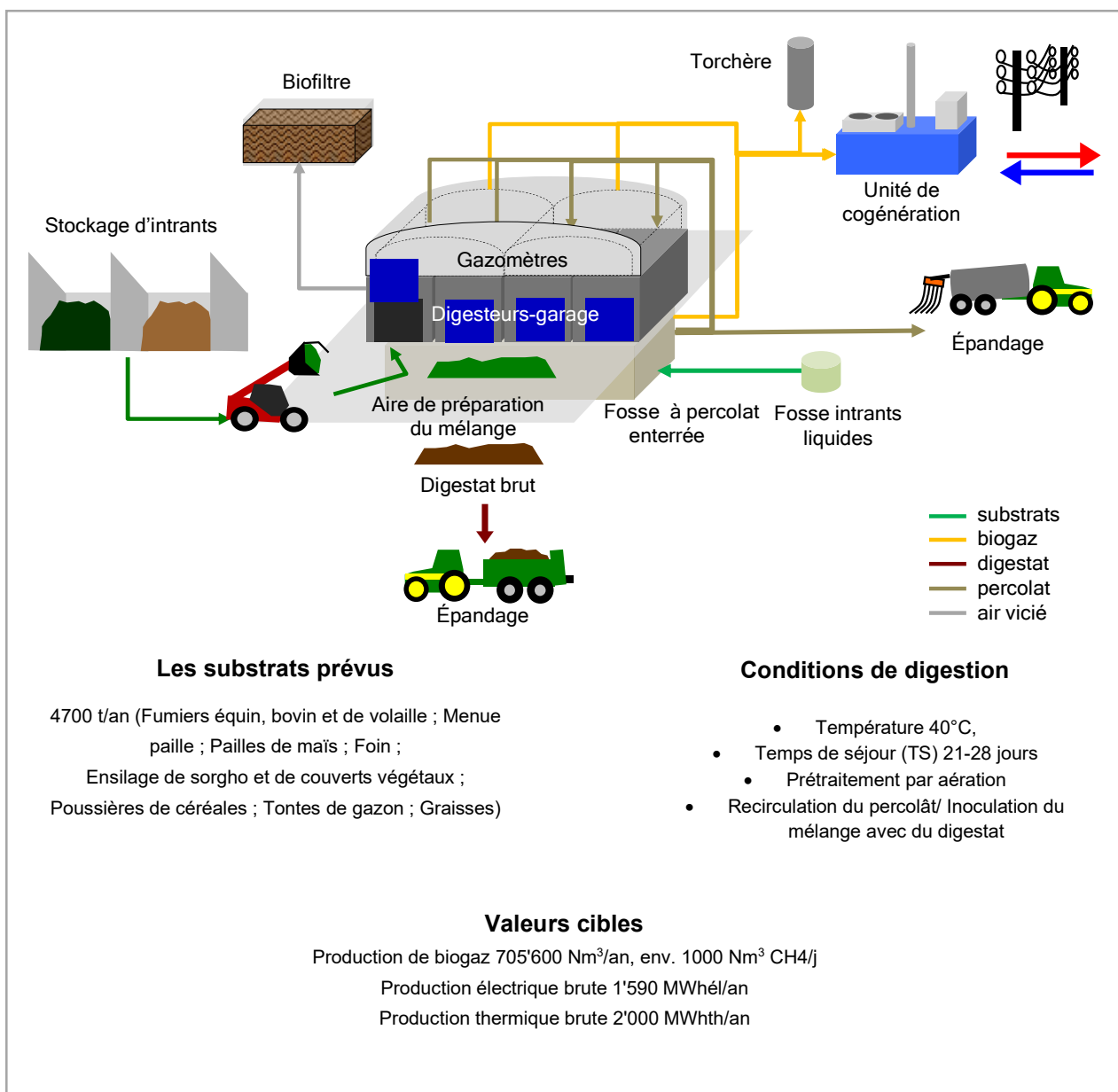


Figure 2. Schéma de fonctionnement de l'installation de biogaz par voie sèche à alimentation discontinue de BiomAgri SA

La description des différentes unités composant l'installation figure au chapitre suivant.

2.2 Dimensionnement des installations

Réception des intrants et alimentation

- Intrants solides : Les fumiers d'exploitations agricoles environnantes, les menues pailles, les poussières de céréales et les tontes de gazon sont livrés à l'installation et déversés sur



une fumière dédiée exécutée en béton d'une surface de 70 m², dont le lixiviat est collecté pour son introduction dans les digesteurs. Quant à l'ensilage de couverts végétaux, il est préparé dans des silos-fosses.

- Intrants liquides (tels que graisses de séparateurs, mélasse, etc) : Ils peuvent être réceptionnés et stockés dans une fosse enterrée et pouvant être chauffée dont le volume utile est de 23 m³. La fosse est fermée au moyen d'un couvercle étanche assurant l'isolation thermique et le confinement pour limiter tout risque d'émission d'odeur. L'air vicié de cette fosse est capté et traité par le biofiltre.

Incorporation des intrants

- Intrants solides : À l'aide d'un chargeur télescopique, les quantités adéquates des substrats à alimenter sont déplacées, mélangées sur l'aire située devant les digesteurs-garages, puis introduites dans le digesteur-garage à alimenter. L'alimentation des digesteurs-garages est réalisée de manière séquentielle afin d'avoir une production de gaz régulière.
- Intrants liquides : Le contenu de la fosse à intrants liquides est acheminé dans la fosse à percolât via le dessableur grâce à une pompe péristaltique.

Digesteurs en voie solide à alimentation discontinue

Le système proposé par la société Eggersmann Anlagenbau se présente sous la forme de 4 garages en béton hors sol avec arrosage des contenus des digesteurs avec le percolât (fraction liquide collectée à la base des digesteurs-garage). Le percolât permet l'inoculation du mélange à méthaniser et maintien sa température. Une partie de la matière digérée (issue du cycle de digestion précédent), le digestat, est mélangée avec les intrants afin de contribuer à son inoculation.

Avant le démarrage de la digestion anaérobie, un prétraitement par aération forcée est réalisé, permettant que les premières étapes de dégradation de la matière organique aient lieu rapidement et entraînant une augmentation de la température du mélange à digérer.

La batterie de digesteurs est surmontée d'un gazomètre composé de deux chambres indépendantes. La première permet de recueillir le biogaz produit au début de chaque cycle de digestion. En effet, ce biogaz étant pauvre en méthane, il est ensuite mélangé au biogaz de bonne qualité, stocké, lui, dans la seconde chambre. Ceci permet d'assurer en continu une qualité moyenne du biogaz pour l'unité de couplage chaleur-force.

Le dimensionnement des digesteurs est le suivant :

- Nombre de digesteurs-garages : 4
- Régime de température : Mésophile (40°C)
- Volume utile par digesteur : 150 m³
- Volume total par digesteur : 264 m³
- Aucun brassage
- Système de chauffage : Chauffage du percolât via un échangeur de chaleur externe
- Temps de séjour au sein d'un digesteur : 21 à 28 jours
- Intervalle entre les chargements des digesteurs : 6 à 7 jours



La fosse à percolât

Le percolât, est acheminé dans un dessableur avant d'être stocké dans une fosse dédiée à ce produit, depuis laquelle il est recirculé vers les digesteurs-garage. Le dessableur et la fosse à percolât sont situés sous les garages. En cas d'excès de percolât et afin d'éviter son enrichissement en nutriments, celui-ci peut être extrait de la fosse et utilisé en agriculture comme engrais et amendement organique. Une aération du ciel gazeux de cette fosse permet que la désulfuration biologique du biogaz ait lieu. Le percolât est chauffé et permet le maintien de la température des digesteurs-garages.

Le dimensionnement du dessableur et de la fosse à percolât est le suivant :

- Volume du dessableur : 113 m³
- Volume total de la fosse à percolât : 750 m³
- Aucun brassage
- Système de chauffage : Chauffage du percolât via un échangeur de chaleur externe

Stockage du digestat brut

Une aire de stockage bétonnée d'une surface de 400 m² permet le stockage du digestat brut. Celui-ci est destiné à être épandu sur les terres agricoles.

Biofiltre

Au début de chaque cycle de digestion, après la fermeture des portes, le contenu de chaque digesteur est aéré de façon intensive avec de l'air frais, ceci afin d'augmenter la température des tas. L'air vicié qui résulte de cette opération est récupéré et traité dans un biofiltre. L'air vicié de la fosse à intrants liquides est également capté et traité par le biofiltre.

Dans le biofiltre, d'une surface de 15 m², l'air vicié traverse une couche de matériau filtrant, biologiquement actif (population bactérienne fixée sur des résidus végétaux), qui va dégrader les composés malodorants en composants neutres. L'air purifié est ensuite rejeté de façon diffuse dans l'atmosphère.

Valorisation énergétique du biogaz

Le biogaz est produit dans chaque digesteur-garage et dans la fosse à percolât par digestion anaérobie. Les estimations de production de biogaz de l'installation sont dépendantes des caractéristiques des gisements à méthaniser (teneur en matière sèche, teneur en matière organique et potentiel méthanogène) et des quantités alimentées. Lors de sa phase de conception du projet, la production annuelle de biogaz de l'installation avait été estimée à env. 705'600 Nm³.

Le biogaz est valorisé par cogénération d'électricité et de chaleur au moyen d'un couplage-chaleur-force de puissances électrique et thermique installées de 200 kWél et 265 kWth respectivement. L'électricité produite est injectée dans le réseau après autoconsommation des équipements de l'installation. La chaleur, disponible sous forme d'eau chaude à 80-90°C, est d'abord utilisée pour le chauffage du percolât et le maintien en température des quatre fermenteurs. La chaleur excédentaire est utilisée dans un séchoir à plaquettes et à foin ainsi que pour chauffer le hangar agricole.

Un équipement supplémentaire, appelé moteur à vapeur, valorise la chaleur issue du refroidissement des gaz d'échappement sous forme d'électricité. L'unité a une puissance électrique équivalente à 16 kW. L'électricité nette produite est injectée dans le réseau électrique.



Torchère

Une torchère permet de brûler le biogaz pauvre en méthane ne pouvant pas être valorisé. Lors de travaux de maintenance de l'unité de cogénération ou d'une panne, le biogaz doit également être acheminé à la torchère pour y être brûlé.

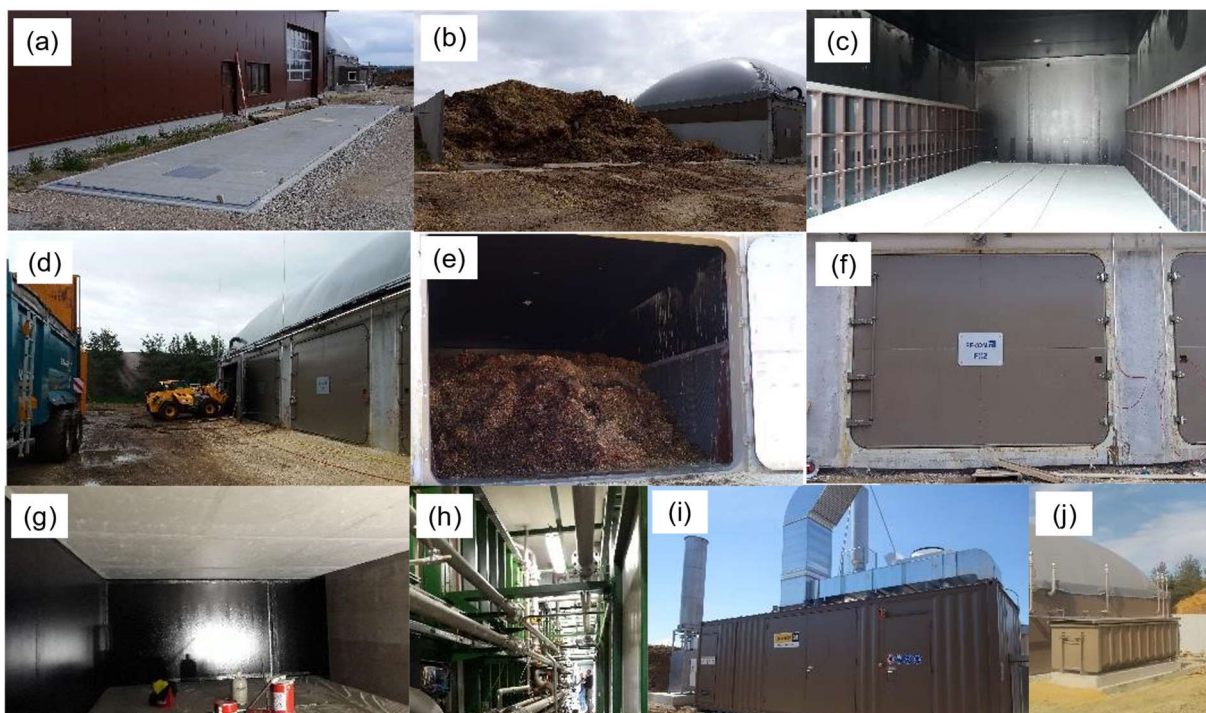


Figure 3. (a) Balance (b) Fumière (c) Digesteur-garage vide (d) Place de préparation du mélange et alimentation de digesteur-garage 1 à l'aide d'un chargeur télescopique (e) Mélange à digérer dans digesteur-garage (f) Fermeture des portes étanches (g) Cuve à percolât vide après application de revêtement époxy (h) Conduites de gaz des quatre digesteurs-garages situées dans la halle technique (i) moteur de cogénération et torchère (j) Biofiltre pour épuration de l'air vicié. (Source EREP)

3 Procédure et méthode de suivi

Afin de suivre le fonctionnement de l'installation et de pouvoir analyser l'évolution des performances, un protocole de suivi a été défini. La méthodologie a été déterminée sur la base de documents de référence dans la filière de la méthanisation [1,2,3].

Pour le suivi de l'installation, les paramètres décrivant l'état du processus de digestion, le fonctionnement de l'installation et/ou sa performance sont à déterminer. Ces paramètres de suivi peuvent être mesurés en ligne (idéalement de façon continue) ; mesurés hors-ligne sur site ou dans un laboratoire externe ainsi que calculés à partir des données issues du suivi :

- Paramètres de suivi mesurés en ligne (volume et qualité du biogaz, temps d'aération du mélange en digestion, température percolât, pH, quantité d'électricité produite, heures de fonctionnement du moteur de cogénération et du moteur à vapeur)
- Paramètres de suivi mesurés hors-ligne (quantité et qualité du mélange entrant, taux d'inoculation avec du digestat, teneur en azote du percolât,...)



- Paramètres de fonctionnement et de performance (temps de séjour, valorisation énergétique du biogaz,...)

Le suivi d'une installation de méthanisation à alimentation discontinue est soumis au mode de fonctionnement par charges de celui-ci (comprenant la préparation du mélange, l'alimentation et la fermeture du digesteur-garage, la digestion de la matière et finalement l'ouverture et la vidange du digestat). Les caractéristiques de la matière alimentée dans les digesteurs-garages changent tout au long de la durée du cycle de digestion, au fur et à mesure qu'elle est dégradée. Ainsi la surveillance de son évolution serait pertinente. Cependant, le suivi en ligne n'est pas toujours possible (outil de suivi en ligne pas installé sur l'installation ou simplement inexistant sur le marché). Dans ces cas les mesures hors-ligne ne s'avèrent pas non plus possibles techniquement, car l'échantillonnage de matière en digestion dans les digesteurs-garage n'est pas possible. En plus, le percolât étant unique (une seule cuve à percolât servant pour tous les digesteurs-garages), les mesures sur cette matière ne sont pas forcément représentatives de ce qui se passe dans le digesteur-garage concerné ; elles n'ont qu'une valeur indicative.

L'installation de BiomAgri SA compte plusieurs outils de mesure et de suivi en ligne du processus, dont les données sont toujours stockées et disponibles pour l'exploitant (format exportable en Excel). D'autres paramètres peuvent être réglés au fur et à mesure à partir du système de commande de l'installation en fonction des résultats de l'exploitation.

Les paramètres de suivi sont indiqués dans le tableau 1. L'intérêt du suivi de ces paramètres ; la procédure pour réaliser ce suivi et la notion de fréquence de suivi conseillée y sont également indiqués.

Tableau 1. Paramètres de suivi, intérêt, procédure et fréquence

Paramètre	Intérêt du suivi	Procédure de mesure / relevé	Fréquence de mesure / relevé			
			Régulier en période de suivi de performances	Journalier	A chaque cycle	Annuel
Composition du mélange (quantité et qualité)	Permettre d'estimer la production de biogaz	Comptage de godets de taille définie	X		X	
Porosité (consistance) du mélange	Prévoir la capacité de percolation et de libération du biogaz	Evaluation visuelle	X		X	
Taux d'inoculation avec du digestat	Permettre un démarrage plus rapide de la méthanisation et l'augmentation du temps de séjour	Comptage de godets de taille définie	X		X	
Hauteur initiale du mélange	Eviter le tassement et la perte de porosité	Mesure hors ligne	X		X	



Tableau 1 (Suite). Paramètres de suivi, intérêt, procédure et fréquence

Temps d'aération du mélange	Ensemble avec la production de méthane donne une idée de la biodégradabilité des entrants.	Paramètre de réglage sur système commande	X		X	
Temps de séjour	Equilibrer la production par cycle et le débit de biogaz	Théorique, en fonction de la quantité du mélange	X		X	
Cycles de percolation	Optimiser la percolation en fonction de l'évolution de la porosité du tas (tendance au tassement)	Paramètre de réglage sur système commande	X		X	
Température du percolât issu du digesteur	Pilotage des transferts thermiques ; détecter problèmes techniques ligne percolât (encrassement, sédiments dans la cuve,...)	En ligne	X	X		
N-NH ₄ du percolât	Indication de dysfonctionnement biologique	Echantillon et envoi à laboratoire spécialisé ¹				X
Niveau cuve à percolât	Identifier surproduction ou déficit de jus		X	X		
Production de biogaz	Indicateur du bon déroulement de la digestion	En ligne	X	X		
Composition du biogaz	Evaluation de la production brute d'énergie, détection gaz non-souhaités	En ligne	X	X		
pH du percolât	Indication de dysfonctionnement biologique (acidose, alcalose)	En ligne	X			X
Alcalinité du percolât	Identification de la capacité à tamponner le pH du milieu de digestion	Echantillon et analyse sur site par titrage ²	X			X
Heures fonctionnement moteur cogénération	Optimisation maintenance moteur	Relevé manuel	X	X		



Tableau 1 (Suite). Paramètres de suivi, intérêt, procédure et fréquence

Production d'électricité brute et nette	Bilan énergétique et financier de l'installation	Relevé manuel	X	X		
Production de chaleur brute et nette	Bilan énergétique et financier de l'installation	Relevé manuel	X	X		
Rendement énergétique	Bilan énergétique de l'installation	Théorique, en fonction de la production et l'utilisation	X	X		

¹ Institut de Génie Thermique, HEIG-VD (Yverdon-les-Bains) ou Scitec Research SA (Lausanne)

² Prestations de suivi analytique d'EREP SA

Des paramètres tels que la teneur en acides gras volatils (AGV), la température du mélange, le pH du mélange ou la charge organique volumique ne sont pas pertinents ou ne sont pas réalisables sur l'installation de BiomAgri SA.

L'alimentation de substrats qui sont facilement biodégradables et pourraient entraîner une production trop rapide d'acides gras volatils (p.ex. le graisses de séparateur), demanderait un suivi particulier du pH du mélange et du rapport FOS/TAC (rapport AGV/alcalinité). La seule option pour le suivi de ce dernier est l'échantillonnage du percolât et son l'analyse hors ligne. Ceci est réalisé notamment à titre comparatif et doit être en tout cas lié à l'évolution du reste des paramètres mesurés (p.ex. chute de production de biogaz, diminution du pH du percolât,...). L'analyse est réalisée lors de périodes de risque de dysfonctionnement biologique, sur site, par titration automatique.

Le suivi de la production par digesteur-garage n'est pas possible. BiomAgri SA réalise périodiquement des tests de pression dans le ciel gazeux des garages. Ceci permet d'identifier l'allure du profil de production de biogaz pour un cycle de digestion. Pour ce faire, les exploitants chronomètrent le temps pour augmenter la pression de 5 mbar dans un garage à différents moments du cycle de digestion. Plus le temps est long moins la production est importante. La courbe de tendance qui résulte du traitement de ces données est aussi utilisée pour modéliser la production de biogaz totale en fonction des cycles d'alimentation des garages.

Les paramètres indiqués dans le tableau précédent sont suivis de manière régulière lors de la période de suivi de performances. Une fois que le régime de fonctionnement normal de l'installation est atteint, le suivi de certains de ces paramètres n'est plus nécessaire, car leur valeur de réglage est déjà établie pour les conditions adéquates de fonctionnement de l'installation. Cependant, si un changement important de la composition du mélange à digérer est à prévoir, il peut s'avérer nécessaire de suivre l'évolution de certains paramètres.

Des fiches de collecte des données qui ne sont pas suivies en ligne (notamment quantité alimentée ou taux d'inoculation avec du digestat) sont régulièrement remplies par les exploitants de l'installation dans un journal d'exploitation.

Concernant l'évaluation du rendement énergétique de l'installation, les données mesurées de production de biogaz, de production d'électricité et de production de chaleur doivent être comparées avec le potentiel théorique attendu selon l'alimentation des digesteurs. Ce potentiel théorique est issu de données bibliographiques présentant des tests de potentiel méthanogène réalisés pour les mêmes types de substrats que ceux traités sur le site.



4 Travaux effectués et résultats

4.1 Les intrants méthanisés

La tableau 2 liste les intrants méthanisés pendant ces deux années d'exploitation ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques. L'incorporation des co-substrats dans les digesteurs-garages ou dans la cuve à percolât répond à une logique saisonnière. Les mélanges à alimenter dans les digesteurs-garages sont conçus pour assurer une consistance permettant la percolation et une bonne répartition des produits avec un pouvoir méthanogène plus intéressant. Le chapitre 4.2 présente la contribution des différents substrats à l'alimentation de chaque digesteur-garage.

Tableau 2. Intrants méthanisés et caractéristiques physico-chimiques issues de données bibliographiques

Substrat	Intrants méthanisés			Caract. physico-chimiques		
	Tonnes alimentées année 1 *	Tonnes alimentées année 2**	Total tonnes alimentées année 1 et 2	% MS (% de MF)	% MSV (% de MS)	BMP (Nm ³ CH ₄ /t MF)
Substrat d'origine agricole	83.3% du poids total	80.2% du poids total				
Fumier de chevaux	1896	1788	3684	35	85.7	60
Fumier bovin	374	345	719	22	75	36
Fumier de poulets	302	451	753	65	65	123
Ensilage de couverts végétaux	143	0	143	30	90	88
Menue paille de blé	0	5	5	88	92	196
Paille de maïs	0	209	209	86	72	282
Foin	15	7	22	88	89	222
Sorgho ensilé	132	15	147	35	95	90
Seigle	0	207	207	32	95	90
Co-substrats (origine non agricole)	16.7% du poids total	19.8% du poids total				
Poussières de céréales	136	65	202	87	94	207
Tontes de gazon	3	92	95	30	90	67
Mélasses	147	0	147	75	95	314
Vinaigre des fûts	191	74	265	7.5	71	30
Marc de pommes	11	20	31	42	77	98
Déchets de pommes de terre	0	33	33			
Soapstock (co-produit du raffinage d'huiles végétales)	23	0	23	80	80	256
Glycérine (résidu production biodiesel)	63	463	526	90	82	385
TOTAL	3435	3775	7211			

MS : Matière sèche ; MSV : Matière sèche volatile, équivalente à la teneur en matière organique ; MF : Matière fraîche ; BMP : Potentiel méthanogène

*Année 1 correspond à la période entre le 23 juin 2020 et le 30 juin 2021

** Année 2 correspond à la période entre le 1^{er} juillet 2021 et le 20 juin 2022



Au cours des années 1 et 2 la part des substrats d'origine non agricole est restée en dessous de 20%, permettant l'installation d'être conforme à son statut d'installation de biogaz de type agricole (selon la loi sur l'aménagement du territoire, LAT), et de garantir la perception du bonus agricole inclus dans la rétribution à prix coûtant pour l'électricité injectée (selon la loi sur l'énergie, LEne).

L'évaluation du bilan matière pour l'installation de biogaz permet d'estimer de façon théorique les flux sortants de l'installation sur la base de la quantité et de la qualité des intrants introduits (teneur en matière sèche, teneur en matière organique, potentiel méthanogène). Des écarts par rapport à ces valeurs théoriques sont souvent liés aux variations des caractéristiques physico-chimiques de différentes matières. Les différences entre les valeurs théoriques et réelles peuvent aussi être indicatives de dysfonctionnements dans le processus de digestion ou dans le fonctionnement des équipements de l'installation. Pour les deux années d'exploitation la figure 4 présente schématiquement le bilan matière de l'installation.

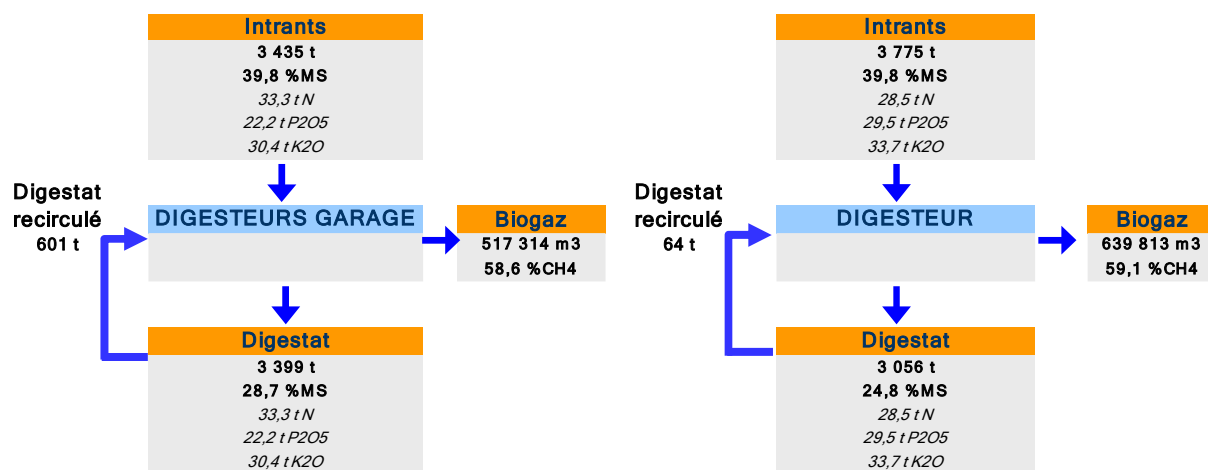


Figure 4. Schéma du bilan matière pour la première année d'exploitation (gauche) et pour la deuxième année d'exploitation (droite)

Puisque chaque intrant a des caractéristiques différentes, sa contribution à la production globale de biogaz est également différente. La figure 5 montre cette contribution pour les deux premières années d'exploitation. La production de biogaz provient notamment des substrats agricoles, qui participent à hauteur de 63% pour la première année et de 67% pour la deuxième, le reste de la production provenant des co-substrats, et notamment de la mélasse et de la glycérine respectivement.

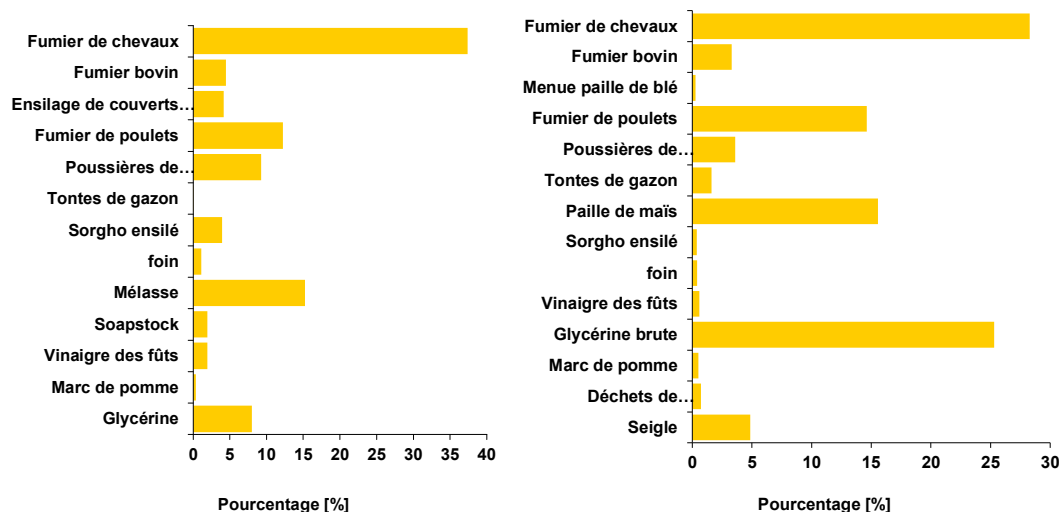


Figure 5. Répartition de la production de méthane selon les différents intrants méthanisés pour la première année (gauche) et pour la deuxième année (droite)

4.2 Cycles d'alimentation

Avec un temps de séjour compris entre 21 et 28 jours, chaque digesteur-garage a réalisé au total entre 26 et 34 cycles de digestion pendant ces deux premières années d'exploitation. L'alimentation de ces cycles est présentée de manière graphique dans les figures 6 et 7. Les 8 premiers cycles concernent la période de démarrage de l'installation. Ensuite un rythme de croisière a été atteint au niveau de l'alimentation, bien qu'il existe une certaine variabilité liée à la saisonnalité et à la disponibilité de certains co-substrats.

4.2.1 En phase de démarrage

En période de démarrage de l'installation, les variations de composition des mélanges alimentés dans les différents cycles répondent à différentes circonstances :

- La diversité d'intrants introduits augmente progressivement avec le temps. Ceci permet de donner aux microorganismes responsables de la digestion un temps d'adaptation pour la dégradation de ces matières.
- Pendant cette période une quantité plus importante de digestat est recirculée afin d'accroître l'activité biologique du système.
- Lors des cycles d'alimentation n° 7 et 8 une quantité plus importante de digestat a été introduite, car avec les substrats disponibles une production de biogaz plus importante était recherchée par bioaugmentation.

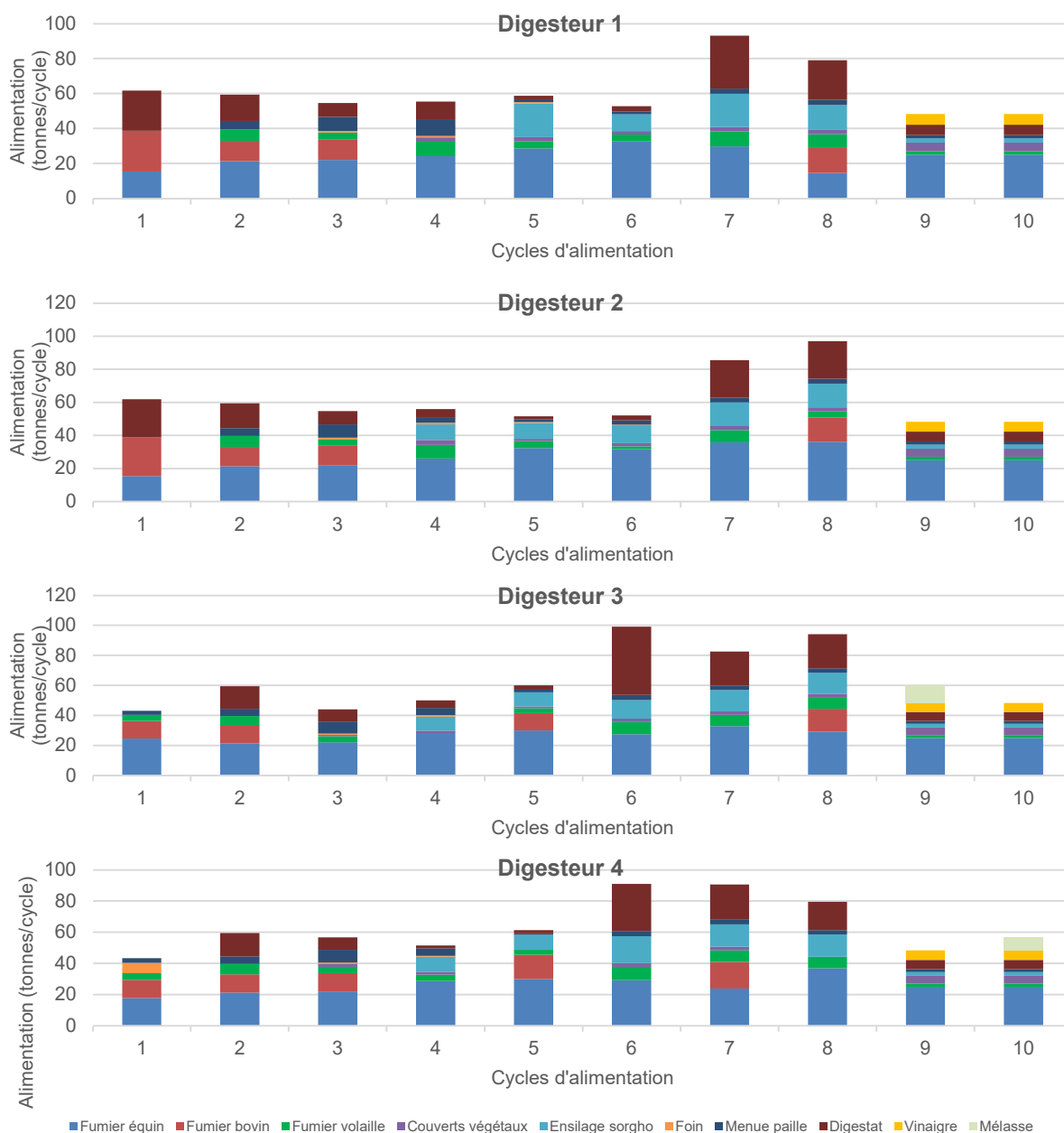


Figure 6. Composition de l'alimentation pour chaque cycle de digestion des quatre digesteurs-garage pendant la phase de démarrage

4.2.2 En rythme de croisière

Suite à la phase de démarrage, une certaine régularité dans l'introduction des intrants agricoles a été atteinte. Des variations des quantités d'alimentation entre cycles sont la conséquence de mélanges changeants en termes de densité (suite à une période de pluie ou suite au mélange d'un substrat très pailleux, par exemple), qui permettent de remplir plus ou moins un digesteur-garage.

Concernant les co-substrats, leur utilisation est justifiée selon :



- La faisabilité technique de leur incorporation. Les exploitants ont rencontré des difficultés à incorporer les graisses, d'où leur motivation à rechercher d'autres co-substrats pouvant les remplacer (en utilisant le même système de stockage et d'alimentation que celui prévu initialement pour les graisses). La mélasse fait ainsi partie de l'alimentation depuis de 9^{ème} cycle de digestion. Celle-ci a été remplacée par de la glycérine provenant de la fabrication du biodiesel.
- La disponibilité saisonnière de certains intrants, comme c'est le cas des tontes de gazon, du vinaigre de fûts de cornichons, etc.

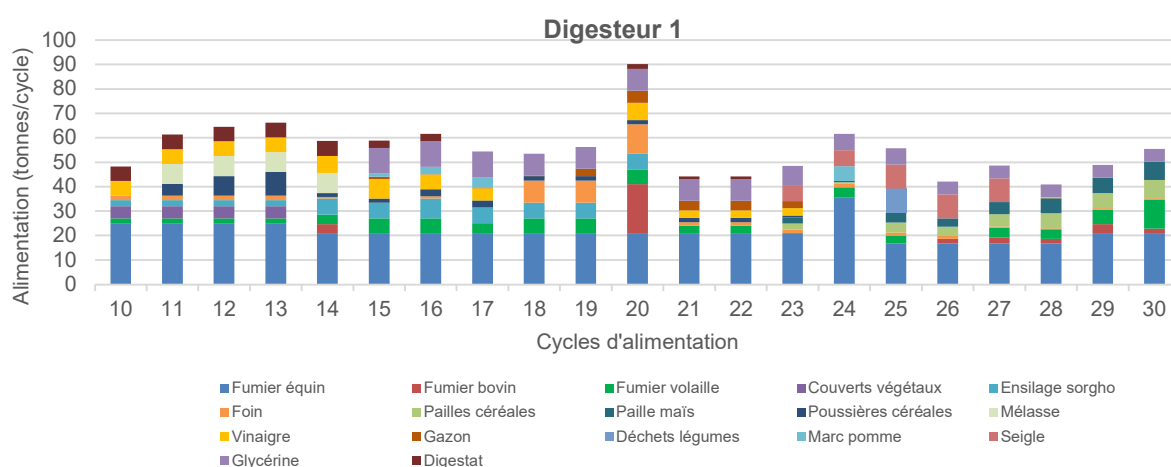


Figure 7. A titre d'exemple, composition de l'alimentation pour chaque cycle de digestion du digesteur-garage 1 pendant la phase de croisière

L'alimentation en rythme de croisière des digesteurs-garage correspond à un temps de séjour de la matière de 21 jours. La diminution du temps de séjour de 28 à 21 jours avait pour but de favoriser la production des premiers jours du traitement (pour lesquels la production est plus importante) et de traiter plus de matières. Le suivi de la production grâce aux tests de pression permet d'identifier si un digesteur est encore en phase de production importante. Dans ce cas, l'ouverture des digesteurs pour certains cycles de digestion peut être repoussée jusqu'à 28 jours. En moyenne, le temps de séjour de chaque cycle de digestion pendant la première année d'exploitation a une durée de 24.6 jours ; cette valeur diminue à 21.1 jours pour la deuxième année.

NB. Au moment de rédaction de ce rapport, une alimentation basée sur une participation de fumier bovin plus importante (équivalent à 1500 t/an) en détriment du fumier équin et sur la substitution de la glycérine par d'autres co-substrats moins onéreux (e.g. perméat de lait et vinaigre de fûts) montre des avantages au niveau technique (soit la régularité en la production de biogaz) et économique.

4.3 Production de biogaz

Lors d'un cycle de digestion, la production de biogaz n'est pas régulière dans le temps. Le fonctionnement de plusieurs digesteurs en parallèle, dont les cycles d'alimentation sont décalés dans le temps, permet de lisser dans une certaine mesure la production totale. La production de méthane théorique, pour chaque digesteur et pour l'ensemble de l'installation (Figure 8 et Figure 9), est calculée par rapport aux intrants alimentés (Figure 6 et 7) à défaut d'un débitmètre individuel pour chaque digesteur disponible sur le site. Les tests de pression du ciel gazeux des digesteurs permettent de



modéliser cette production globale pour la première année d'exploitation. Cette production est mise à l'écart de la production de méthane globale réelle produite.

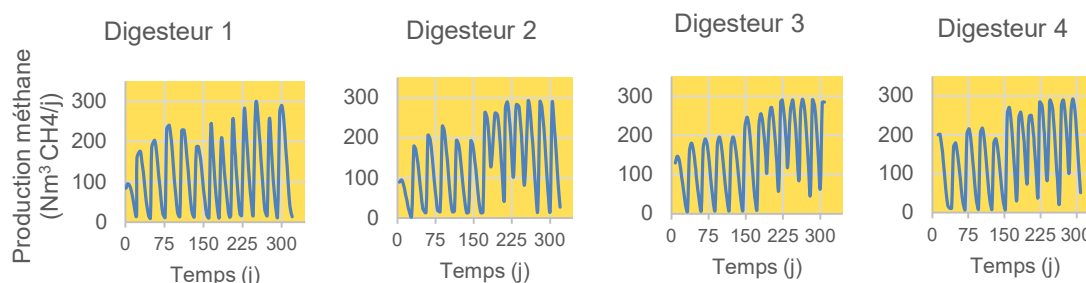


Figure 8. Production de méthane théorique dans chaque digesteur-garage pour la première année d'exploitation

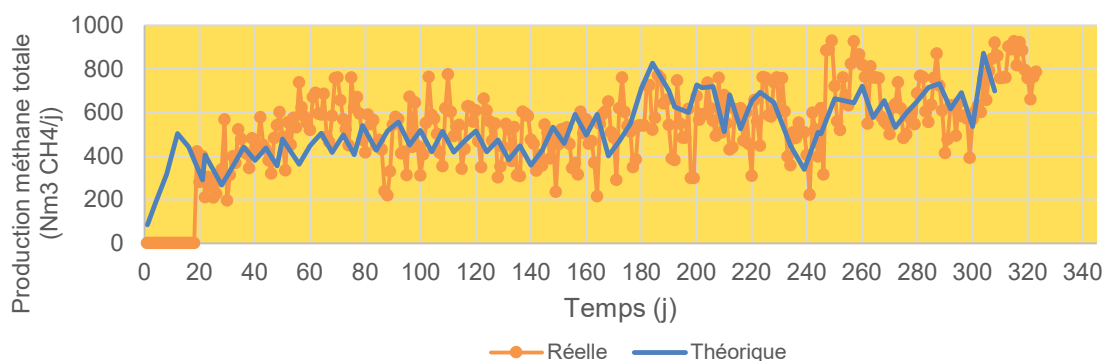


Figure 9. Production de méthane réelle et théorique pour l'ensemble de l'installation pour la première année d'exploitation

De la même façon que la production réelle de méthane, les résultats de cette modélisation montrent une production totale théorique de méthane peu stable, notamment depuis le jour 180 d'exploitation, correspondant à l'introduction des co-substrats dans l'alimentation. Le fait que les temps de séjour par cycle ne sont pas réguliers (à minima 21 jours, mais pouvant aller jusqu'à 28 jours en fonction du cycle de digestion) peut expliquer ces résultats. Avec une alimentation stable des fluctuations importantes de la production de méthane ne devraient pas avoir lieu si le reste de paramètres restent stables.

4.4 Valorisation du biogaz

4.4.1 Valorisation électrique

La production de biogaz théorique permet de calculer la production théorique d'électricité et de la comparer avec la production électrique réelle mesurée (Figure 10). Les points suivants sont à souligner :

- Comme l'est la production théorique, la production réelle d'électricité est irrégulière. Cette irrégularité peut être une conséquence des différents problèmes de fonctionnement rencontrés (moussages, présence de soufre, difficulté de percolation, etc.) ainsi que des variations du temps de séjour.
- La production réelle d'électricité correspond aux valeurs théoriques attendues. La création d'une courbe de référence (au moyen des tests de pression) décrivant la production de biogaz



selon la saisonnalité de l'alimentation, permettrait de modéliser avec moins d'erreur la production depuis le jour 180. La réalisation de cette courbe n'a pas été possible.

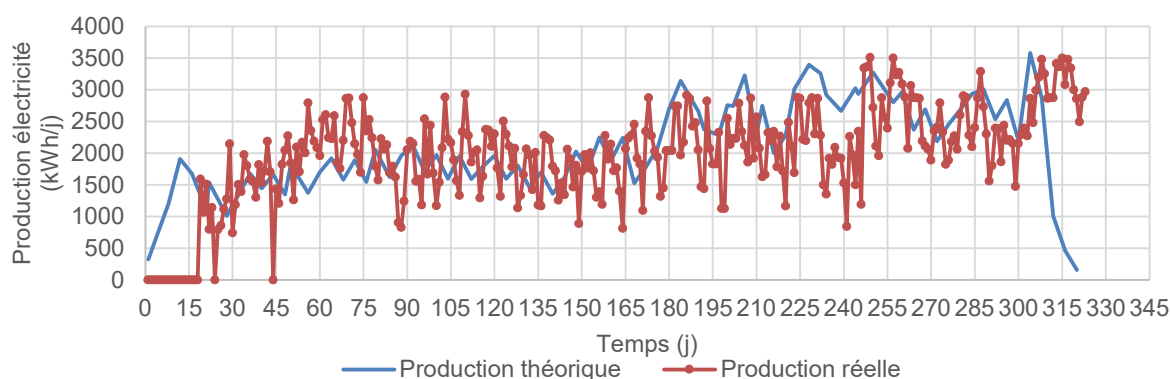


Figure 10. Comparaison de la production d'électricité théorique et réelle de l'installation pour la première année d'exploitation

La figure 11 présente la production réelle d'électricité du moteur CCF et la production théorique moyenne, calculée sur la base de l'alimentation de trois périodes différenciés, soit la période de démarrage de l'installation (entre jour 0 et 240) ; la période d'alimentation de mélasse en tant que co-substrat principal (entre jour 240 et 370) et la période d'alimentation de glycérine en tant que co-substrat principal (dès jour 370).

Il est observé qu'il existe des variations importantes de la production théorique et de la production réelle pour la période d'alimentation de la glycérine en tant que co-substrat principal. Il est important de souligner que l'origine de ce co-substrat, ainsi que ses caractéristiques, peuvent varier d'une livraison à l'autre. De ce fait le potentiel méthanogène de cet intrant peut changer (conséquence d'une teneur en MS ou en MSV différentes, de la présence de substances plus ou moins biodégradables ou même potentiellement toxiques).

En termes globaux, la production électrique du moteur CCF des deux premières années a été de 1.83 GWhél, ce qui représente 73% du potentiel énergétique attendu selon l'alimentation de l'installation et les caractéristiques physico-chimiques considérées.

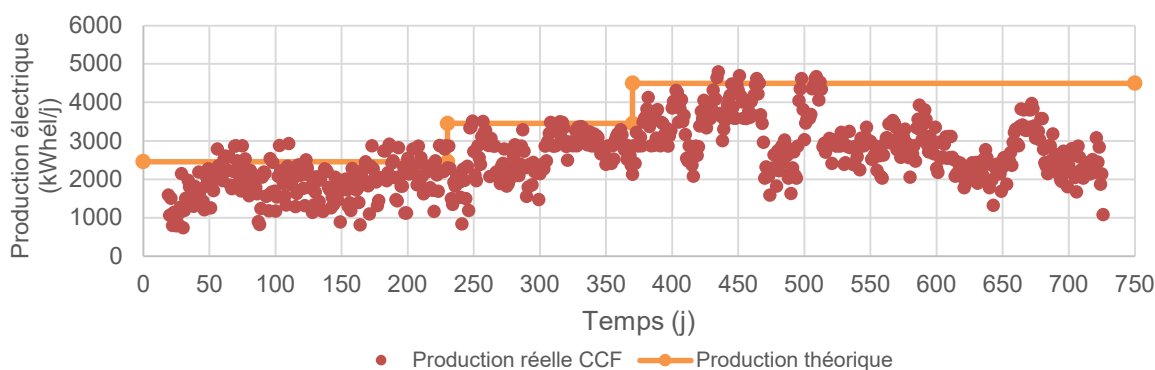


Figure 11. Production électrique du moteur CCF et production électrique théorique selon trois périodes d'alimentation différenciés (démarrage, utilisation de mélasse et utilisation de glycérine)

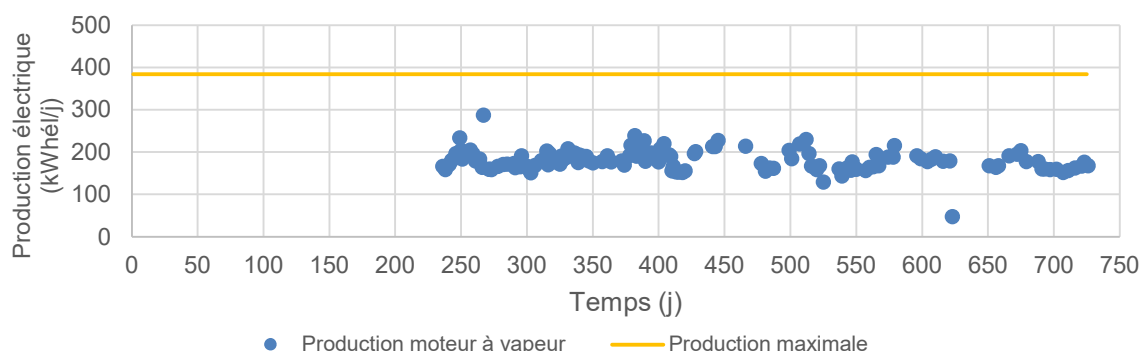


Figure 12. Production électrique du moteur à vapeur et production maximale.

En termes d'autoconsommation, l'installation de biogaz utilise en moyenne 5% de l'électricité produite par le CCF, qui est une valeur faible comparée à des installations de biogaz conventionnelles. L'existence de moins d'équipements électromécaniques (comme des équipements d'incorporation des intrants ou des brasseurs) explique cette différence.

En ce qui concerne le moteur à vapeur (figure 12), celui-ci a pu être démarré depuis que le CCF fonctionne à plus haut rendement et avec une production électrique plus régulière (figure 11, dès jour 236). Par rapport à la capacité de production annoncée par le fournisseur (env. 8% de la puissance maximale du CCF) le moteur à vapeur en a atteint la moitié.

Le tableau 3 résume les données de fonctionnement des unités de valorisation du biogaz et les données de production électrique du site pour les deux premières années d'exploitation.

Tableau 3. Données de production et consommation électrique du site pour les deux premières années d'exploitation

	kWhél	Observations
Production électrique théorique	2'505'595	Rendement CCF env 0.37 ; caractéristiques physico-chimiques selon tableau 2.
Production électrique CCF	1'831'731	
Production électrique moteur à vapeur	66'408	
Autoconsommation électrique installation biogaz	91'585	

4.4.2 Valorisation thermique

La figure 13 reprend les données de production et d'utilisation de chaleur de l'installation (données disponibles depuis mi-novembre 2020, jour 145). Environ 13% de la chaleur produite est consommée pour le chauffage des digesteurs. Une petite partie a été utilisée pour les besoins de chauffage du hangar, le reste étant valorisé par le moteur à vapeur (env. 55%) et finalement dans le séchoir à bois (bûches) Lenz. La chaleur restante en sortie du séchoir n'est pas mesurée, cependant une estimation de la chaleur utilisée dans cette unité est possible, car la quantité d'eau évaporée est suivie (mesures du poids d'entrée et de sortie des matières à sécher). Le séchoir permet ainsi de valoriser presque un quart de la chaleur produite. Globalement le niveau d'utilisation de chaleur est très élevé, se situant à plus de 90%.

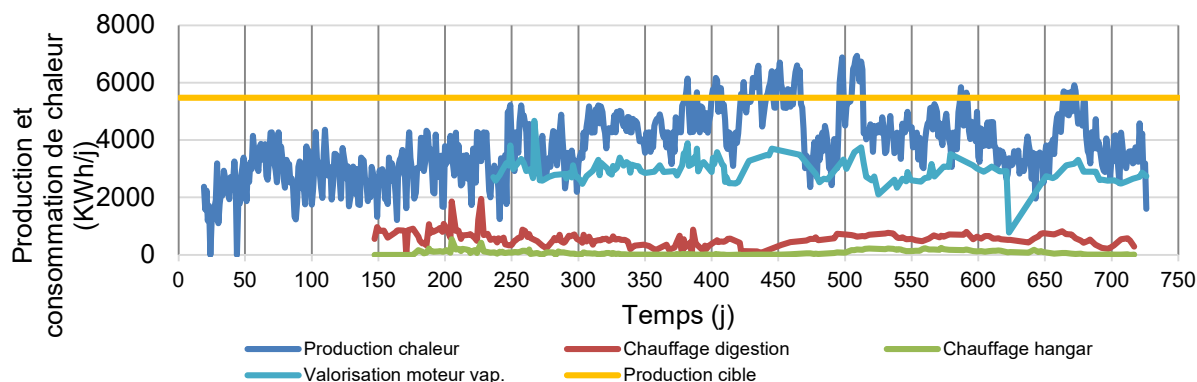


Figure 13. Production de chaleur de l'unité de couplage chaleur-force et consommations du chauffage des digesteurs, le chauffage du hangar et du moteur à vapeur.

4.5 Analyse comparative avec une technologie de digestion conventionnelle

Certains éléments de l'exploitation de l'installation de BiomAgri SA ont été mis en comparaison avec une installation conventionnelle de méthanisation agricole, soit une technologie en voie liquide continue dans un digesteur infiniment mélangé (figure 14). La comparaison est réalisée pour une puissance électrique installée équivalente de ces deux technologies. Les données pour une technologie conventionnelle se basent sur des moyennes identifiées lors de plusieurs campagnes de suivi réalisées par des organisations faitières du biogaz, en Suisse et en Europe [4,5,6].

Il est indispensable de souligner les limites de la pertinence de cette comparaison, car les intrants prévus pour méthaniser dans le projet de C.Morier, n'auraient pas pu à eux seuls faire objet d'une méthanisation dans un digesteur infiniment mélangé. Ces matières auraient été stockées et épandues et dans le meilleur des cas compostées en bord de champ.

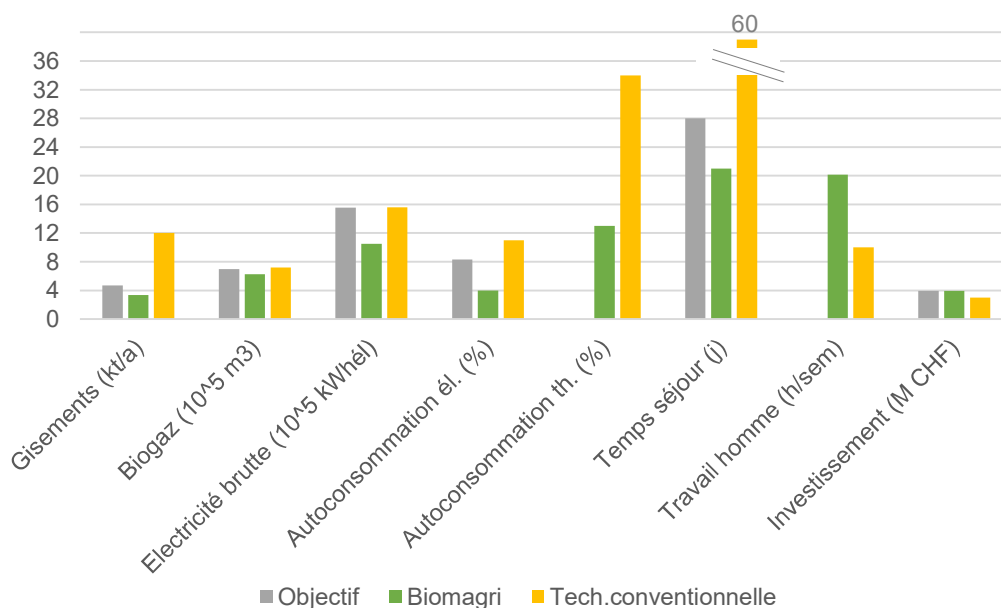


Figure 14. Eléments de comparaison entre la technologie en voie solide à alimentation discontinue et la technologie conventionnelle de taille équivalente



Concernant les gisements traités et la production de biogaz, pour une production comparable la quantité de gisements traités est bien entendu plus importante dans une installation conventionnelle, conséquence d'une teneur plus élevée en eau des intrants en méthanisation. BiomAgri n'a cependant pas atteint la quantité de gisements à traiter par année prévus lors du développement du projet, qui était estimés à 4700 t/an. En termes d'autoconsommation électrique du site, la technologie mise en œuvre permet une production nette d'électricité plus importante, l'autoconsommation en électricité étant plus faible. Le besoin en chaleur pour l'installation en voie solide à alimentation discontinue est également plus faible.

Des grosses différences sont évidentes pour le temps de séjour des matières en méthanisation, qui comparé à 21 jours d'un cycle de digestion par garage, ce paramètre est en moyenne de 60 jours pour une technologie conventionnelle. La fosse à percolât, quant à elle, agit comme une unité de digestion en voie liquide où, dans ce cas, le seul brassage est lié au mouvement du percolât introduit et extrait depuis et vers les digesteurs (selon les cycles de percolation) et les chemins préférentiels sont évités avec l'aide de déflecteurs installés dans la cuve. Le temps de séjour pour cette cuve est très long (>100 jours) et doit donc permettre la complète dégradation de la matière organique qu'y arrive.

En termes de charge de travail, le temps passé par les exploitants est deux fois plus important pour une technologie discontinue, et ceci juste pour la conduite des digesteurs. C'est la conséquence d'une automatisation moins importante notamment pour l'alimentation et la vidange des digesteurs-garages. La figure 15 présente le détail de la charge de travail pour les différentes tâches nécessaires à réaliser sur le site.

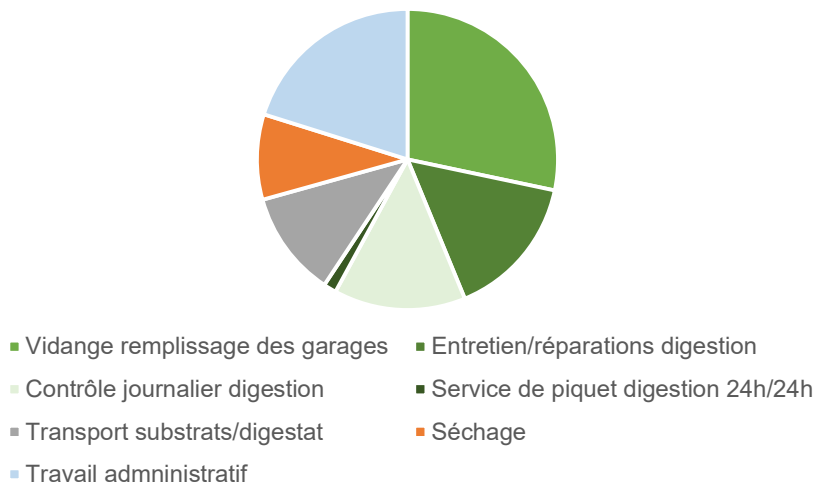


Figure 15. Répartition des heures de travail de BiomAgri SA.

L'investissement pour l'installation complète (incluant ouvrages de digestion, équipements et gros œuvre) est légèrement supérieur pour la technologie en voie solide à alimentation discontinue. Quant à l'investissement lié aux ouvrages de digestion, l'investissement nécessaire est deux fois celui requis pour une technologie en voie liquide infiniment mélangée. L'existence de moins de constructeurs et l'exigence technique des digesteurs-garages (système de percolation-drainage, étanchéité des garages,...) sont les causes de ces différences. Rapporté à la capacité de traitement du site, l'investissement spécifique pour BiomAgri SA est de 675 CHF par tonne de substrat méthanisé.



5 Évaluation des performances

Un certain temps pour atteindre les objectifs de production de gaz attendus est nécessaire suite à la mise en service d'une installation de biogaz. Ce temps d'attente est lié à deux facteurs : (i) le développement des populations microbiennes responsables de la digestion, qui devront s'adapter aux substrats alimentés dans l'installation et qui progressivement vont augmenter en nombre dans le système ; et (ii) le réglage du fonctionnement de l'installation, concernant par exemple le temps de prétraitement des matières, la définition du bon mélange pour une consistance souhaitée, le temps de séjour dans les digesteurs, etc.

Depuis sa mise en service l'installation de biogaz en voie solide à alimentation discontinue de BiomAgri SA fonctionne correctement et, une année après son démarrage, elle avait atteint les valeurs théoriques de production. Les modifications d'alimentation par rapport au mélange initialement envisagé entraînent une légère diminution de la performance énergétique de l'installation prévue lors de la phase de conception du projet.

L'alimentation des graisses s'est avérée impossible, celles qui étaient réceptionnées ayant des caractéristiques physico-chimiques qui ne correspondaient pas à celles attendues (teneur en eau élevée, présence importante de corps étrangers, pompage impossible). Après plusieurs essais pour permettre l'introduction de ces matières, BiomAgri SA a décidé d'arrêter l'alimentation de ce substrat. Les graisses ont un potentiel de production de méthane très important. En absence de ce substrat la production de biogaz de l'installation est plus faible que celle attendue.

D'autres problèmes techniques sont apparus au cours de cette période de démarrage de l'installation, comme l'alimentation d'un substrat trop chargé en matière organique, l'apparition de mousses dans le dessableur, l'augmentation de la teneur en H_2S du biogaz, etc. Ces perturbations ont permis à BiomAgri SA d'apprendre à agir en situation de dysfonctionnement biologique de l'installation et de connaître parfaitement le fonctionnement des éléments techniques du site.



Afin de résoudre les dysfonctionnements, d'apprendre à gérer au mieux l'installation et d'améliorer sa performance, BiomAgri SA a mis en place pendant toute cette période plusieurs méthodes : la caractérisation des intrants réceptionnés (mesures de densité, tests qualitatifs de potentiel de production de méthane) ; l'évaluation de l'évolution de la production de biogaz par digesteur à l'aide de tests de pression ; des essais de réglage de paramètres de fonctionnement comme le temps d'aération pour le prétraitement des matières et la fréquence de percolation.

Figure 16. Dispositif pour réaliser sur site des tests de potentiel de production de méthane (source: EREP)



Ces aspects ont certainement des conséquences sur le rendement énergétique et sur le rendement économique de l'installation, étroitement liés à la production de biogaz et aux dysfonctionnements techniques, qui engendrent des temps de travail et des coûts d'exploitation plus importants.

5.1 Bilan énergétique global

Globalement, la production d'énergie de BiomAgri SA représente presque 75% du potentiel énergétique théorique attendu selon l'alimentation de l'installation et les caractéristiques physico-chimiques considérées. En sachant que les caractéristiques des co-substrats comme la glycérine peuvent être variables en fonction de la livraison, on peut espérer que le rendement du site comparé à son potentiel théorique soit supérieur à celui observé, car le potentiel théorique est certainement surestimé. Malheureusement on ne dispose pas d'autres informations et cette évaluation conservative est nécessaire.

Le bilan énergétique global de l'installation, concernant la valorisation du biogaz et comprenant les informations détaillées ci-dessus, est schématisé dans la figure 17.

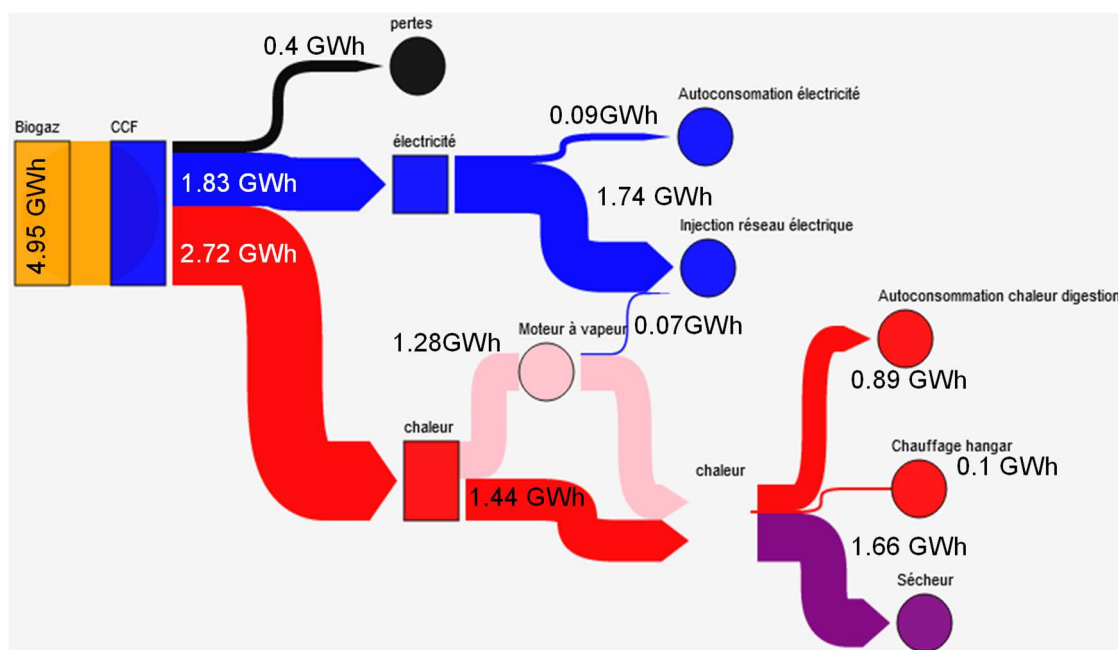


Figure 17. Flux énergétiques pour la valorisation du biogaz

Les autres flux énergétiques qui contribuent à l'exploitation de l'installation concernent la consommation du carburant, utilisé pour le transport de matières (notamment fumier équin) ou pour faire tourner les autres véhicules utilisés par l'installation, soit le chargeur télescopique, le tracteur et l'épandeur. Selon le bilan des deux années d'exploitation écoulées, cette consommation s'élève à environ 0.16 GWh par an.

De l'analyse de ce bilan énergétique il peut être constaté que 1.81 GWh électriques par an sont injectés dans le réseau, ce qui correspond à la consommation d'environ 450 ménages en Suisse. Il est également observé que la valorisation énergétique du biogaz est efficace, le séchage de plaquettes de bois permettant de maximiser la valorisation de l'énergie thermique produite et des pertes énergétiques faibles étant observées au niveau du moteur de cogénération.



Afin d'améliorer davantage ce bilan énergétique l'augmentation de la production de biogaz de l'installation serait prioritaire.

5.2 Bilan économique

Les recettes, les frais et les coûts de personnel sont présentés pour la deuxième année d'exploitation de l'installation de BiomAgri SA (figure 18). Ces postes sont également comparés avec les objectifs posés lors du développement du projet et avec le bilan économique typique pour une technologie conventionnelle de digestion (digestion en voie liquide infiniment mélangée), dont les données proviennent de plusieurs campagnes de suivi réalisées par des organisations faitières de la branche [4,5,6].

Les valeurs issues de la deuxième année d'exploitation sont reprises, notamment en ce qui concerne l'électricité injectée dans le réseau ; l'utilisation de la chaleur pour les prestations de séchage ; les frais de transport des matières traitées, etc. D'autres données qu'y sont présentées ont été extrapolées du bilan comptable de 2021 (p.ex. consommation des carburants, main d'œuvre, frais d'assurances, ...). La superposition de ces deux sources d'informations pour la réalisation du bilan économique peut avoir, certes, quelques déviations. Cependant cette approche permet d'avoir une vision suffisamment représentative du fonctionnement économique actuel de l'installation.

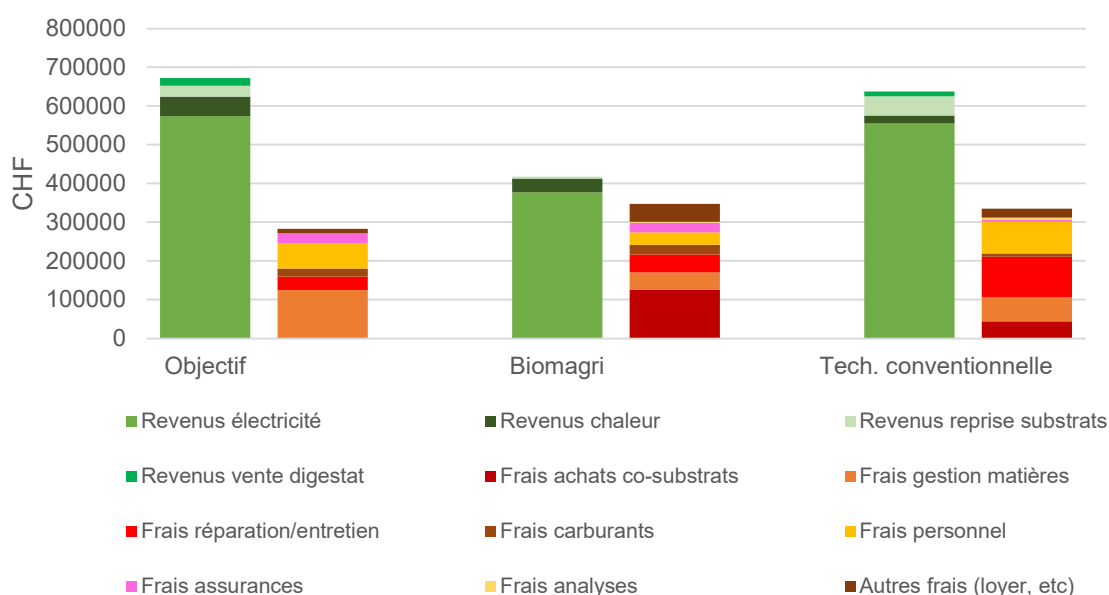


Figure 18. Comparatif des revenus et des frais annuels actuels de BiomAgri SA avec ceux typiques pour la technologie conventionnelle de digestion

Le bilan économique pour la deuxième année d'exploitation, incluant les recettes, les frais et les charges de personnel, démontre que l'excédent brut de l'exploitation est légèrement positif. Cependant dès que les frais financiers et d'amortissement sont inclus dans ce bilan le résultat devient sans aucun doute négatif. Les charges liées à l'achat des co-substrats pèojent notablement ce résultat. En effet, BiomAgri a dû remplacer le potentiel de production de biogaz attendu à partir de la digestion de graisses par d'autres sources. Ainsi, en dépit de leur coût, l'achat et l'utilisation de co-substrats comme la mélasse



ou la glycérine a été réalisé. L'augmentation de la production de biogaz de l'installation n'a pas suffi pour atteindre les revenus attendus lors du développement du projet.

Comparée avec une technologie conventionnelle de digestion de même capacité de production d'énergie, certains avantages de la méthanisation en voie solide à alimentation discontinue en fonctionnement chez BiomAgri SA étaient attendus. Notamment le fait de travailler à des teneurs en matière sèche plus importantes, et respectivement moins d'eau, pouvait réduire les coûts de transport des intrants à méthaniser ainsi que la taille des ouvrages de digestion nécessaire. Ces avantages ne sont pas encore visibles après deux années d'exploitation.

Tel qu'évoqué avant, la pertinence en la comparaison des ces deux technologies a des limites. Cependant, de son analyse il en découle, pour le moment, que pour l'installation de BiomAgri SA :

- (a) les frais d'achat des co-substrats sont trop importants ;
- (b) les frais liés à l'entretien et la réparation des équipements est plus faible ;
- (c) les frais d'assurances sont plus élevés ;
- (d) les frais de carburants sont plus importants.

Afin de changer ces conditions d'exploitation de l'installation, il semble essentiel de minimiser la reprise de co-substrats payants et de privilégier la reprise de déchets organiques avec une redevance pour sa gestion et son traitement. Commercialiser davantage le digestat, ou lui attribuer une valeur plus adaptée à ses caractéristiques fertilisantes, seraient des pistes à explorer. Concernant les frais de gestion des matières (incluant les frais liés à l'utilisation de la chargeuse), ainsi que les frais de personnel, ils pourraient diminuer avec une exploitation optimisée des digesteurs-garages. Un allongement du temps de séjour du mélange dans les digesteurs-garages bénéficierait à l'économie de ces deux postes.

Concernant les carburants, qui sont attribués aux frais de transport pour la collecte du fumier équin, dans les prochains temps BiomAgri souhaite demander aux manèges concernés un défraiement pour la collecte de cette matière qui actuellement est reprise gratuitement.

6 A retenir pour le développement de projets comparables

6.1 Points de vigilance lors de la conception, de la réalisation et de l'exploitation de l'installation

Mettre en route une installation de biogaz n'est pas une tâche évidente, d'autant plus pour une technologie de digestion en voie solide à alimentation discontinue, dont le retour d'expériences est bien plus faible que pour les technologies conventionnelles de digestion.

Au-delà du processus biologique de méthanisation, qui nécessite des conditions spécifiques et stables (température, pH, charge organique, ...), les composantes techniques de l'installations doivent être parfaitement maîtrisées pour que le fonctionnement global de l'installation soit satisfaisant. En lien avec les principaux dysfonctionnements rencontrés lors des deux premières années d'exploitation, des points de vigilance pour d'autres installations futures utilisant la même technologie sont présentés dans la figure 19.

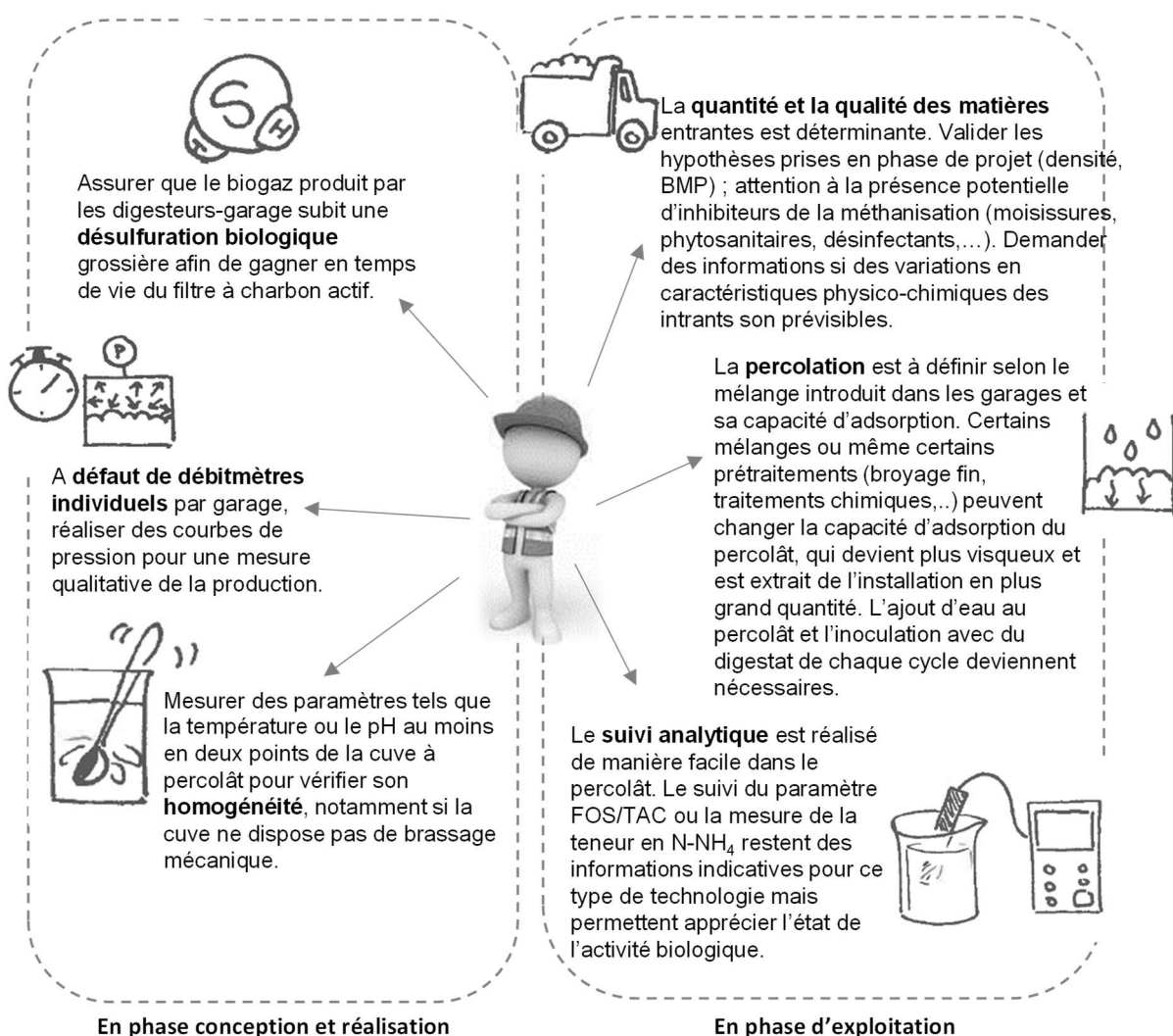


Figure 19. Schéma sur les points de vigilance identifiés par BiomAgri SA à prendre en compte lors des différentes phases de développement du projet

6.2 Paramètres de suivi

Dès la mise en service de l'installation le suivi de certains paramètres de fonctionnement est essentiel. Mis à part les paramètres typiques de suivi pour des installations de biogaz (quantité et qualité des intrants, production de biogaz ou d'électricité, consommation énergétique, ...), une installation en voie solide à alimentation discontinue demande de suivre particulièrement :

- La qualité du mélange, en termes de structure et de porosité, pour assurer une bonne percolation et faciliter la libération du biogaz vers le ciel gazeux ;
- La température du percolât, pour détecter des dysfonctionnements liés au transfert de chaleur qui ne permettent pas de maintenir la température du processus de digestion ;
- Le niveau de remplissage de la cuve de percolât, afin de détecter la perte de percolât avec le digestat issu des digesteurs-garages ;



- La durée et la fréquence des cycles de percolation, à définir selon les changements des mélanges alimentés en digestion ;
- Le pH du percolât, pouvant fournir des informations sur le bon déroulement du processus de digestion dans les digesteurs et dans la cuve à percolât.

Le suivi de ces paramètres permettra de corriger des éventuelles perturbations dans le fonctionnement de l'installation.

D'autres paramètres à suivre de façon régulière dans le journal d'exploitation permettront de comprendre quels modes de fonctionnement sont les plus appropriés (temps de séjour des matières dans les digesteurs garages, fréquence d'alimentation des substrats liquides dans la cuve à percolât, composition des mélanges, ...).

6.3 Indicateurs de performance de l'installation en voie solide à alimentation discontinue à ce jour

Dans le chapitre 4.5 certains paramètres de l'exploitation de l'installation de BiomAgri SA ont été mis en regard d'une technologie conventionnelle de digestion de matières agricoles. Il en ressort que, pour une même puissance électrique installée, l'installation de digestion en voie solide à alimentation discontinue présente une consommation électrique et thermique plus faible, conséquence de l'absence ou de la diminution d'équipements électromécaniques de brassage ou pompage et conséquence du traitement des matières avec une teneur en eau moins importante. De la comparaison ressort également que le temps de séjour en digestion est bien plus faible pour cette installation et le principal effet qui en découle est la quantité d'électricité brute produite plus modeste.

Le tableau 4 reprend des valeurs de référence identifiées par le Benchmark d'installations de biogaz agricoles en Suisse [7]. Les résultats d'exploitation de l'installation de BiomAgri SA sont exprimés sous ces mêmes termes de performances pour permettre sa comparaison et d'identifier la marge d'amélioration à atteindre.

Tableau 4. Comparatif des indicateurs de performance de BiomAgri SA avec ceux de référence selon le Benchmark des installations agricoles en Suisse

Indicateur de performance	BiomAgri SA	Benchmark installations agricoles en Suisse
Production de biogaz par tonne de matière fraîche (Nm ³ /t MF)	125	65
Production de méthane par tonne de matière fraîche (Nm ³ /t MF)	67.5	n.d.
Production de biogaz par tonne de matière organique (Nm ³ /t MO)	353	557
Temps de séjour en digestion (jours)	21	67
Rendement électrique par tonne de matière fraîche (kWh _e /t MF)	254	145
Productivité – heures de pleine charge (h/an)	5250	6156
Productivité – Puissance équivalente	120	227
Productivité – Taux d'utilisation du moteur CCF (%)	60	66.5
Utilisation de la chaleur (hors chauffage digesteurs) (%)	79	37.7
Autoconsommation d'électricité (%)	5	11.2
Rendement électrique utilisé en externe (%)	35.1	40.7
Rendement électrique des besoins propres en électricité (%)	1.9	5.2
Rendement thermique utilisé (%)	45.7	17.8
Rendement énergétique global utilisé (%)	82.7	63.7



Il est à souligner que l'évaluation de ces indicateurs de performance pour une technologie en voie solide devraient être meilleurs lors qu'ils sont rapportés au tonnage de matières fraîches alimentées, si le fonctionnement de l'installation est normal. La marge d'amélioration sera notamment visible lorsqu'ils sont rapportés au tonnage des matières organiques traitées.

Concernant la productivité électrique, l'utilisation du moteur de cogénération pour ces deux premières années de fonctionnement est encore modérée par rapport à sa capacité nominale. Une tendance au surdimensionnement des unités de cogénération est observée pour les installations participant au benchmark et doit permettre aux installations d'avoir une augmentation en la production ainsi qu'une souplesse en son exploitation.

En termes d'utilisation de la chaleur (hors besoins pour le chauffage des digesteurs), BiomAgri SA dispose des deux bons outils permettant sa valorisation : le moteur à vapeur et le séchoir de bûches de bois et de céréales. Avec ces outils le taux d'utilisation de la chaleur augmente significativement, ayant également une influence positive pour le rendement énergétique global utilisé, qui est très élevé pour cette installation.

Tableau 5. Indicateurs de performance économiques

Indicateur de performance	BiomAgri SA
Coûts d'investissement spécifique (CHF/t)	675
Coûts d'investissement spécifique (CHF/t MS)	1680
Coûts de production de l'électricité (ctCHF/kWh _{él})	40.6

Le tableau 5 présente des indicateurs de performance économiques. Ils reprennent les coûts d'investissement et de production présentés dans ce rapport (figure 14 et 18), mais ils prennent également en compte les frais financiers (remboursement de l'emprunt, amortissement, intérêts).

Rapporté à la capacité de traitement du site, l'investissement spécifique pour BiomAgri SA est de 675 CHF par tonne de substrat méthanisé. Pour une technologie de méthanisation en voie liquide, ce coût se situe à env.150 CHF par tonne selon le retour de la filière [5,6] (soit un investissement se situant entre 1000 et 1500 CHF si exprimé sur la base de la matière sèche traitée).

Pour la deuxième année d'exploitation, BiomAgri SA atteint un coût de production de l'électricité de 40.6 ct par kWh électrique produit, ce qui correspond à peu près au tarif de rachat de l'électricité dont la société bénéficie. Un fonctionnement économiquement rentable est très difficile d'assurer avec ces conditions. Pour ce faire diminuer les frais liés à l'achat de co-substrats et optimiser d'autant que possible la production de biogaz sera impératif à l'avenir.



7 Conclusions du suivi

Deux ans après la mise en service, les conclusions suivantes sont à tirer du suivi de l'exploitation de l'installation de BiomAgri SA :

- BiomAgri SA réalise un suivi très rigoureux du fonctionnement de son installation, dont la conduite est irréprochable ;
- L'installation fonctionne correctement et elle a atteint les performances énergétiques théoriques pendant plusieurs phases de son exploitation. De manière globale, son rendement énergétique atteint 73% de son potentiel énergétique théorique selon les matières méthanisées jusqu'à ce jour ;
- Comparé aux objectifs posés lors de la phase conception du projet, des écarts avec la production d'énergie et les résultats économiques d'exploitation sont à attendre du fait que l'alimentation disponible est différente de celle initialement envisagée ;
- Mis à part les intrants d'origine agricole, les co-substrats contribuent en bonne partie à la production de biogaz. La dépendance envers les co-substrats, parfois très saisonniers en termes de quantité disponible et de qualité, affecte fortement la stabilité de la production de biogaz ;
- Le système a une dynamique lente, qui rend difficile la définition des paramètres optimaux pour un fonctionnement stable et performant. Le mélange adéquat d'intrants selon la saison, et en conséquence la définition des paramètres opérationnels appropriés (notamment le réglage de la percolation) est difficile à identifier après seulement deux ans d'exploitation, pendant lesquels de petits dysfonctionnements ralentissent cette identification ;
- Le temps de séjour de 21 jours pour un cycle de digestion dans un garage est court. Cependant c'est une stratégie pour permettre le traitement de plus de matières sur l'année et donc, potentiellement, plus de production de biogaz. Cependant cette approche devrait être comparée avec une stratégie d'alimentation basée sur des cycles de digestion plus longs, où le potentiel de production de biogaz disponible serait mieux exploité ;
- Les fluctuations de la production de biogaz sont très liées à l'introduction de matières très facilement dégradables. La stabilité et la régularité de l'alimentation, notamment pour ces matières doit permettre d'avoir un fonctionnement plus fluide de l'unité de valorisation du biogaz. Également, un nombre de digesteurs-garages plus important, jouerait un rôle pour la stabilité en la production de biogaz. Au moment de rédaction de ce rapport, une alimentation avec plus de participation de fumier bovin et la substitution de la glycérine par d'autres co-substrats moins méthanogènes permet une production de biogaz plus régulière.
- Le suivi des paramètres de digestion dans le percolât permet d'avoir une indication de l'état de l'activité biologique. Malgré les limitations dans son interprétation ce point de mesure est une bonne référence pour ce type de technologie ;
- Afin d'améliorer le bilan énergétique et économique de l'installation de BiomAgri SA, plusieurs pistes sont envisagées. Réduire l'utilisation des co-substrats qui ont un coût significatif et dont la qualité n'est pas connue semble essentiel ;
- La faisabilité technique est démontrée pour cette technologie de méthanisation en voie solide à alimentation discontinue traitant des engrais de ferme et d'autres matières agricoles à haute teneur en matière sèche. Ce n'est pas encore le cas pour sa faisabilité économique ;
- Grâce à tous les apprentissages réalisés depuis le démarrage, les exploitants acquièrent une connaissance très poussée dans la conduite de cette installation de démonstration. Son retour d'expérience est et sera précieux pour le développement d'autres projets comparables.



8 Bibliographie

- [1] « Manuel Qualité Biogaz », Biomasse Suisse, 2016.
- [2] "Guide méthodologique pour le suivi d'une installation de méthanisation", ADEME (France), 2014.
- [3] « La méthanisation en voie sèche discontinue- Guide et préconisations », ADEME Bourgogne-Franche-Comté (France), 2018.
- [4] "Analyse technico-économique de 84 unités de méthanisation agricole. PROdige : programme d'acquisition et de diffusion de références sur la méthanisation agricole" publiée par l'ADEME (France) en 2022.
- [5] «Biogas- Messprogramm III». FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Allemagne), 2021.
- [6] «Typische Kosten von Biogasanlagen in der Schweiz», Biomasse Suisse, 2020 (non publié)
- [7] « Rapport sur le benchmarking du biogaz 2017 », Ökostrom Schweiz, 2018.