

Stockage et prétraitements des intrants avant alimentation de digesteurs de méthanisation

Etat des connaissances et recommandations



C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000/ 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**STOCKAGE ET PRETRAITEMENTS DES INTRANTS AVANT
ALIMENTATION DE DIGESTEURS DE METHANISATION**

ETAT DES CONNAISSANCES ET RECOMMANDATIONS

RAPPORT FINAL

septembre 2022

**S. BERGER, I. DESNEULIN – SOLAGRO
F. MONLAU, C. PEYRELASSE – APESA
H. CARRERE – INRAE-LBE**



Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

RECORD, Stockage et prétraitements des intrants avant alimentation de digesteurs de méthanisation - Etat des connaissances et recommandations, 2022, 151 p, n°20-0420/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

Comité de suivi de l'étude :

Gérard ANTONINI - RECORD, Rémy BAYARD – INSA DE LYON/RECORD, Patricia CAMACHO - CIRCEE – SUEZ, Bénédicte COUFFIGNAL - RECORD, Patricia DIRRENBARGER - INRS, Farah DOUMIT – ENGIE, Boris EFREMENKO - VEOLIA, Arthur FENART – SECHE ENVIRONNEMENT, Loïc FRANCKE - TOTAL, Hélène GUY - GROUPE SECHE, Robert LASSARTESSSES - RENAULT, Laurent LEVIN - RENAULT, Roman MOSCOVIZ - CIRCEE - SUEZ, Bastien PRAZ - GRDF, Marie-Laure – RABOT QUERCI - EIFER, Jacques WIART - ADEME

© RECORD, 2022

RESUME

L'introduction des matières en digestion et l'obtention de l'expression maximale du potentiel méthanogène des intrants sont des questions essentielles pour la faisabilité technique et économique des projets de méthanisation, qu'ils soient agricoles, territoriaux ou industriels.

L'analyse bibliographique montre que de nombreuses technologies (mécaniques, physiques, biologiques, thermique) existent et sont mises sur le marché. L'enquête auprès des exploitants d'unités montre que les pré-traitements apportent des bénéfices au niveau des performances de la méthanisation mais également sur des aspects plus techniques (facilité de mélange, réduction des pannes), même si les coûts d'investissement et les charges (maintenance, électricité) peuvent limiter leur mise en œuvre. En outre, le potentiel de développement de la méthanisation à l'horizon 2030 reposant sur des intrants agricoles, des efforts de R&D sur ce type de ressources, ainsi que sur l'analyse élargie des impacts des procédés d'un point de vue environnemental, énergétique et sanitaire ont notamment été identifiés comme des leviers pour l'amélioration de la filière.

MOTS CLES

Pré-traitement, méthanisation, stockage, broyage, sonication, cavitation, hydrolyse, biomasse agricole, boues urbaines, biodéchets, biogaz, potentiel méthanogène

SUMMARY

The introduction of resources into anaerobic digesters and the production of maximum of biogas are important technical and economic issues for biogas units, whether agricultural, territorial or industrial.

The literature review shows that many technologies (mechanical, physical, biological, thermal) exist and are available on the market. The survey of plant operators shows that pre-treatment brings benefits in terms of anaerobic digestion performance but also on more technical aspects (ease of mixing, reduction of breakdowns), even if investment costs and charges (maintenance, electricity) may limit their implementation. In addition, the development potential of anaerobic digestion by 2030 based on agricultural inputs, R&D efforts on this type of resource, as well as a broader analysis of the environmental, energy and health impacts of the processes have been identified as leverages for improving the sector.

KEY WORDS

Pre-treatment, anaerobic digestion, storage, shredding, sonication, cavitation, hydrolysis, agricultural biomass, urban sludge, biowaste, biogas, methanogenic potential

Liste des acronymes et abréviations

ACV : Analyse du Cycle de Vie
AGV : Acides Gras Volatils
BMP : Potentiel méthanogène
CAPEX : Dépense d'investissement
CIMS : Cultures Intermédiaires Multi-Services
CIVE : Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique
DCT : Déchets de Cuisine et de Table
ENH : Electrode Normale à Hydrogène
ETM : Éléments Traces Métalliques
FFOM : Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères
GMS : Grandes et Moyennes Surfaces
HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
IAA : Industrie Agro-Alimentaires
IM : Infiniment Mélangé
MVS : Matière Volatile en Suspension
MS : Matière Sèche
MSV : Matière Sèche Volatile
OPEX : Dépense d'exploitation
PCL : Polycaprolactone
PHA : Polyhydroxyalcanoate
PLA : Acide polylactique
SPAN : Sous-Produits Aimaux
STEP : STation d'EPuration ou STEU : Station de Traitement des Eaux Usées
TAC : Titre Alcalimétrique Complet
TPS : Amidon thermoplastifié

SOMMAIRE

LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS.....	4
LISTE DES TABLEAUX.....	7
LISTE DES FIGURES.....	8
INTRODUCTION.....	10
VOLET 1 : IDENTIFICATION DES GISEMENTS MOBILISABLES ET DES FACTEURS.....	11
1.1. Hypothèses retenues pour la mobilisation des ressources.....	11
1.2. Potentiel énergétique des gisements disponibles.....	13
1.2.1. Détermination des potentiels méthanogènes par catégories de gisements.....	13
1.2.2. Synthèses des données de potentiels méthanogènes.....	15
1.3. Les ressources mobilisées en 2020.....	17
1.4. Le potentiel de mobilisation à l'horizon 2030.....	17
1.5. Les principaux facteurs limitant l'expression du potentiel méthanogène.....	20
1.5.1. Considérations générales.....	20
1.5.2. Déjections animales.....	25
1.5.3. Résidus agricoles et productions végétales.....	25
1.5.4. Déchets verts des collectivités.....	26
1.5.5. Déchets et effluents des industries.....	27
1.5.6. Boues et graisses de stations d'épuration des eaux usées.....	28
1.5.7. Biodéchets.....	28
1.5.8. Algues.....	29
1.5.9. Synthèse des facteurs limitants et leviers d'actions.....	31
VOLET 2 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE ET PRÉTRAITEMENTS DES INTRANTS EN MÉTHANISATION.....	37
2.1. Introduction.....	37
2.2. Les technologies de prétraitements et leur positionnement.....	37
2.3. Visualisation de l'état de l'art au niveau National et International.....	40
2.3.1. Niveau National.....	40
2.3.2. Niveau International.....	46
2.4. Application de solution de stockage et de prétraitements afin de conserver ou améliorer le pouvoir méthanogène.....	52
2.4.1. Déjections animales.....	53
2.4.2. Résidus agricoles et productions végétales.....	54
2.4.3. Boues de stations d'épuration.....	66
2.4.4. Graisses : Déchets graisseux et coproduits animaux.....	70
2.4.5. Biodéchets.....	71
2.4.6. Plastiques biodégradables.....	73
2.4.7. Algues.....	74
VOLET 3 : RETOURS D'EXPÉRIENCES TERRAIN SUR L'APPLICATION DE TECHNOLOGIES DE STOCKAGE ET PRÉTRAITEMENTS.....	77
3.1. Méthodologie mise en œuvre.....	77
3.2. Retours d'enquêtes terrain.....	79
3.2.1. Déjections animales.....	79
3.2.2. Résidus agricoles et productions végétales.....	79
3.2.3. Boues de stations d'épuration.....	85
3.2.4. Graisses.....	86
3.2.5. Biodéchets.....	86
3.2.6. Algues.....	87
3.3. Synthèse des entretiens d'acteurs.....	89
VOLET 4 : PERSPECTIVES R&D, FICHES PAR TECHNOLOGIES, FICHES PAR INTRANTS.....	92
4.1. Perspectives R&D sur les prétraitements en méthanisation.....	92
4.2. Fiches par technologies.....	94

4.3. Fiches par intrants.....	112
ANNEXE 1 : OUTIL BACUS DE SOLAGRO.....	117
ANNEXE 2 : RATIOS C/N DES PRINCIPAUX SUBSTRATS MÉTHANISÉS.....	119
ANNEXE 3 : PERFORMANCES DES PRÉTRAITEMENTS APPLIQUÉS À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE OU PILOTE/LABORATOIRE POUR LES MATIÈRES LIGNO-CELLULOSIQUES.....	120
ANNEXE 4 : PERFORMANCES DES PRÉTRAITEMENTS APPLIQUÉS À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE OU PILOTE/LABORATOIRE POUR LES BOUES DE STATIONS D'ÉPURATION.....	125
ANNEXE 5 : PERFORMANCES DES PRÉTRAITEMENTS APPLIQUÉS À L'ÉCHELLE PILOTE/LABORATOIRE SUR LES DÉCHETS GRAISSEUX ET COPRODUITS ANIMAUX.....	131
ANNEXE 6 : PERFORMANCES DES PRÉTRAITEMENTS APPLIQUÉS À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE ET PILOTE/LABORATOIRE SUR LES BIODÉCHETS.....	135
ANNEXE 7 : PERFORMANCES DES PRÉTRAITEMENTS APPLIQUÉS À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE ET PILOTE/LABORATOIRE SUR LES ALGUES.....	138
BIBLIOGRAPHIE.....	142

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ressources mobilisables retenues (RECORD, 2022).....	11
Tableau 2 : Hypothèses agricoles (Compilation RECORD 2022) (Afterres 2050 https://afterres2050.solagro.org/decouvrir/scenario).....	12
Tableau 3 : Hypothèses non agricoles (Compilation RECORD 2022) (Outil BACUS, Solagro).....	12
Tableau 4 : Potentiels méthanogènes moyens considérés pour les gisements identifiés (Compilation RECORD 2022) (Base de données APESA, 2021).....	16
Tableau 5 : Concentrations stimulatrices et inhibitrices pour la méthanisation, valeurs en mg/L (Compilation RECORD 2022).....	23
Tableau 6 : Détail des thèses qui sont en cours dans les différents instituts (RECORD, 2022).....	43
Tableau 7 : Détail des projets qui sont en cours dans les différents instituts (RECORD, 2022).....	44
Tableau 8 : Caractéristiques des procédés de prétraitements mécaniques appliqués aux matières lignocellulosiques (non exhaustif) (Compilation RECORD 2022).....	58
Tableau 9 : Caractéristiques des procédés commerciaux de cavitation et sonication (non exhaustif) (Compilation RECORD 2022).....	60
Tableau 10 : Caractéristiques des procédés de prétraitements biologiques commerciaux (non exhaustif) (Compilation RECORD 2022).....	63
Tableau 11 : Caractéristiques des procédés d'hydrolyse thermique commerciaux, (Compilation RECORD 2022)(adapté de Devos et al. 2020).....	67
Tableau 12 : Caractéristiques des procédés d'hydrolyse thermique/biologique (Compilation RECORD 2022).....	67
Tableau 13 : Caractéristiques des procédés commerciaux de sonication (Compilation RECORD 2022)	68
Tableau 14 : Caractéristiques des procédés d'homogénéisation hautes pressions commerciaux (Compilation RECORD 2022).....	69
Tableau 15 : Caractéristiques des procédés de désintégration électrocinétique.....	69
Tableau 16 : Caractéristiques des procédés d'hydrolyse thermique/chimique commerciaux (Compilation RECORD 2022).....	70
Tableau 17 : Données recueillies dans le cadre des enquêtes d'acteurs (Compilation RECORD 2022)	78
Tableau 18 : Synthèse des retours d'expérience sur les dispositifs de prétraitements suite aux entretiens d'acteurs (Compilation RECORD 2022).....	89

Liste des figures

Figure 1 : Les grands principes du scénario Afterres2050 (Solagro, 2016).....	12
Figure 2 : Ratio MSV / MS (%) pour les différentes catégories de substrats (Compilation RECORD 2022) (Base de données APESA, 2021).....	13
Figure 3 : Valeurs de BMP (Nm ³ /tonnes PB) pour les différentes catégories de substrats. Entre parenthèse le nombre de substrats utilisés pour chaque catégorie. (Compilation RECORD 2022) (Base de données APESA, 2021).....	14
Figure 4 : Valeurs de BMP (Nm ³ /tonnes MSV) pour les différentes catégories de substrats. Entre parenthèse le nombre de substrats utilisés pour chaque catégorie. (Compilation RECORD 2022) (Base de données APESA, 2021).....	15
Figure 5 : Répartition du tonnage entrant en méthanisation en 2020 sur la base des projets en injection identifiés par l'ADEME (Compilation RECORD 2022) (SOLAGRO issu ADEME 2021).....	17
Figure 6 : Evolution du gisement prospectif méthanisable entre 2010 et 2030, en tonnes/an (Compilation RECORD 2022) (outil BACUS Solagro 2021).....	18
Figure 7 : Evolution du gisement prospectif méthanisable entre 2010 et 2030, en TWh/an (Compilation RECORD 2022) (outil BACUS Solagro 2021).....	18
Figure 8 : Répartition de ressources prospectives méthanisables à l'horizon 2030, en tonnes (Compilation RECORD 2022) (outil BACUS Solagro 2021).....	19
Figure 9 : Répartition de ressources prospectives méthanisables à l'horizon 2030, en énergie (Compilation RECORD 2022) (outil BACUS Solagro 2021).....	19
Figure 10. Photo APESA, installation du GAEC Oudet.....	21
Figure 11 : Liste des paramètres utilisés pour la caractérisation des intrants et du digestat, suivi biologique (APESA, 2021).....	21
Figure 12 : Ratios C/N des intrants de méthanisation. Entre parenthèse le nombre de substrats utilisés pour chaque catégorie. (Compilation RECORD 2022) (APESA 2021, IFIP 2018, Fisgativa et al., 2018a; Frigon et al., 2013; Milledge et al., 2019).....	22
Figure 13 : Les technologies de prétraitements et de stockage par catégories (RECORD, 2022).....	38
Figure 14 : Différentes configurations de couplage des procédés de prétraitements et de méthanisation Source : (Carrère et al., 2021).....	39
Figure 15 : Laboratoires publics ou centre de recherche impliqués dans les thèses autour de la problématique stockage et prétraitement de la matière avant méthanisation (RECORD, 2022).....	41
Figure 16 : Origine des gisements étudiés dans les thèses autour de la problématique stockage et prétraitement de la matière avant méthanisation (RECORD, 2022).....	41
Figure 17 : Les projets autour du stockage et du prétraitement de la matière avant méthanisation par catégories de biomasses et gisements (RECORD, 2022).....	45
Figure 18 : Les financeurs des projets R&D (RECORD, 2022).....	46
Figure 19 : Nombre de publications sur le sujet prétraitement et méthanisation publiées ces dernières années 2000-2021 (RECORD, 2022).....	46
Figure 20 : Typologies d'ouvrages sur le sujet prétraitement et méthanisation publiés ces dernières années 2000-2021 (RECORD, 2022).....	47
Figure 21 : Organisations publiant le plus sur le sujet prétraitement et méthanisation ces dernières années 2000-2021 (RECORD, 2022).....	47
Figure 22 : Pourcentage d'ouvrages réalisés sur le sujet par continents ces dernières années sur la tranche 2000-2010 et 2010-2021 (RECORD, 2022).....	48
Figure 23 : Nombre d'ouvrages réalisés par pays sur la tranche 2000-2010 et 2010-2021 (RECORD, 2022).....	49
Figure 24 : Auteurs ayant le plus publié sur le sujet sur la tranche 2000-2010 et 2010-2021 (RECORD, 2022).....	50
Figure 25 : Mapping sur VOS VIEWER des keywords cités au moins 50 fois dans le pool des 5923 ouvrages. Visualisation des interactions entre les keywords (RECORD, 2022).....	51
Figure 26 : Mapping sur VOS VIEWER des pays ayant au moins 80 publications dans le pool des 5923 ouvrages. Visualisation des interactions entre les pays (RECORD, 2022).....	51
Figure 27 : décomposition de la lignocellulose sous l'effet d'un prétraitement (Schwietzke et al., 2009) adapté de (Hsu, 1980; Mosier et al., 2005).....	55
Figure 28 : Photo d'un système Premix de Vogelsang (Vogelsang, 2022).....	57
Figure 29 : Illustration du fonctionnement du procédé GasMix de Landia (Landia, 2014).....	57

Figure 30 : Comparaison de l'efficacité des prétraitements pour augmenter la production de méthane de matières lignocellulosiques (échelle industrielle et pilote) (RECORD, 2022).....	65
Figure 31 : Performances des prétraitements pour augmenter la production de méthane des microalgues (données issues d'essais pilote) (Compilation RECORD 2022).....	75
Figure 32 : Photo de broyeur à couteaux avec récupérateur de cailloux (SOLAGRO, 2021).....	80
Figure 33 : Photo de broyeur à marteaux BHS (SOLAGRO, 2021).....	81
Figure 34 : Photo de broyeur à chaînes TQZ (THM recycling solutions, 2021).....	82
Figure 35 : Photo de broyeur à déchets verts Hantsch Willibald Mini-Shark (SOLAGRO, 2021).....	82
Figure 36 : Photo du système Biobang® installé sur l'une unité de méthanisation Reims Biométhane (Biobang, 2021).....	84
Figure 37. Schéma de principe de l'unité de méthanisation de Solrød au Danemark (IEA Bioenergy, 2015).....	88
Figure 38 : Différentes perspectives laboratoires et industrielles sur l'application de prétraitement en méthanisation et analyse multicritère proposés pour évaluer les bénéfices d'un prétraitement (adapté de Elalami et al. 2019).....	94

Introduction

L'introduction des matières en digestion et l'obtention de l'expression maximale du potentiel méthanogène des intrants sont des questions essentielles pour la faisabilité technique et économique des projets de méthanisation, qu'ils soient agricoles, territoriaux ou industriels.

Les technologies de stockage et de pré-traitements des intrants sont des leviers intéressants pour optimiser les performances des installations.

De nombreuses technologies et équipements existent aujourd'hui, qu'ils bénéficient de nombreux retours d'expériences, ou qu'ils soient en cours de développement ou au stade de pilote de laboratoire.

Ainsi, afin d'alimenter les acteurs de la filière, des utilisateurs notamment, avec des informations à jour concernant les pré-traitements et le stockage des intrants avant alimentation en méthanisation, l'Association RECORD a souhaité la réalisation d'un état de l'art sur cette thématique.

Ce document issu du travail de bibliographie et de retours de terrain synthétise l'ensemble des données aujourd'hui à disposition sur les pré-traitements et le stockage de différents types d'intrants (déjections animales, biomasse végétale, biodéchets, boues urbaines...) concernant leurs objectifs, leurs caractéristiques, leurs performances ainsi qu'une mise en perspective des besoins de R&D.

Ce document est découpé en 4 volets :

- Volet 1 : Identification des gisements mobilisables et des facteurs
- Volet 2 : Synthèse bibliographique des technologies
- Volet 3 : Retours d'expériences terrain
- Volet 4 : Perspectives R&D, fiches par technologies, fiches par intrants

Volet 1 : Identification des gisements mobilisables et des facteurs

1.1. Hypothèses retenues pour la mobilisation des ressources

Les enjeux des dispositifs de prétraitement de la matière première en méthanisation sont directement liés à la typologie et au potentiel de mobilisation des gisements méthanisables. L'étude des prétraitements nécessite donc une évaluation des matières traitées en méthanisation à l'heure actuelle mais aussi dans les prochaines années et décennies. Les potentiels énergétiques de chaque type d'intrants est un facteur essentiel à considérer pour déterminer les matières à fort enjeux et focaliser l'attention sur ces dernières. La liste des intrants a été définie sur la base des retours du groupe de travail intrants porté par la filière biométhane en relation avec le Ministère de l'agriculture et la DGEC et pour lequel Solagro a réalisé le diagnostic et synthétisé les propositions.

Les gisements mobilisables retenus sont synthétisés ci-dessous :

Tableau 1 : Ressources mobilisables retenues (RECORD, 2022)

Famille	Sous-famille
Déjections animales	Fumier
	Lisier
	Fiente
Résidus agricoles	Paille céréale
	Canne de maïs
	Menues paille
Production végétale	CIVE
	Ensilage herbe
Déchets verts des collectivités	DV tonte
	DV broyat
Déchets et effluents des industries	Effluent IAA
	Lactosérum
	Graisses IAA
	Graisses et déchets d'abattoirs
Boues de station d'épuration des eaux usées	Boues biologiques
	Graisse STEU
Biodéchets	FFOM
	GMS
	Biodéchets de cantine
Algues	Macroalgues
	Microalgues

Pour l'ensemble de ces ressources, il est estimé le potentiel de valorisation en méthanisation en 2020 et à l'horizon 2030. Les estimations sont basées sur l'outil de modélisation BACUS (voir Annexe 1) développé par Solagro, sur les hypothèses du scénario Afterres2050¹ (Solagro, 2016), sur le Rapport de l'Observatoire National des Ressources en Biomasse (FranceAgrimer, 2020), sur les données compilées de GrDF (2020) ainsi que sur l'Étude estimative de la production de biodéchets au sein des établissements de restauration (Groupement National de la Restauration, 2011).

¹ le scénario Afterres2050 propose un scénario visant l'utilisation des terres agricoles et forestières pour satisfaire les besoins alimentaires, énergétiques, en matériaux, et réduire les gaz à effet de serre. Le scénario Afterres2050 est le compromis d'hypothèses qui a paru à Solagro, en 2016, le plus cohérent, le plus réaliste et le plus soutenable. Il n'est pas le seul envisageable et est évolutif

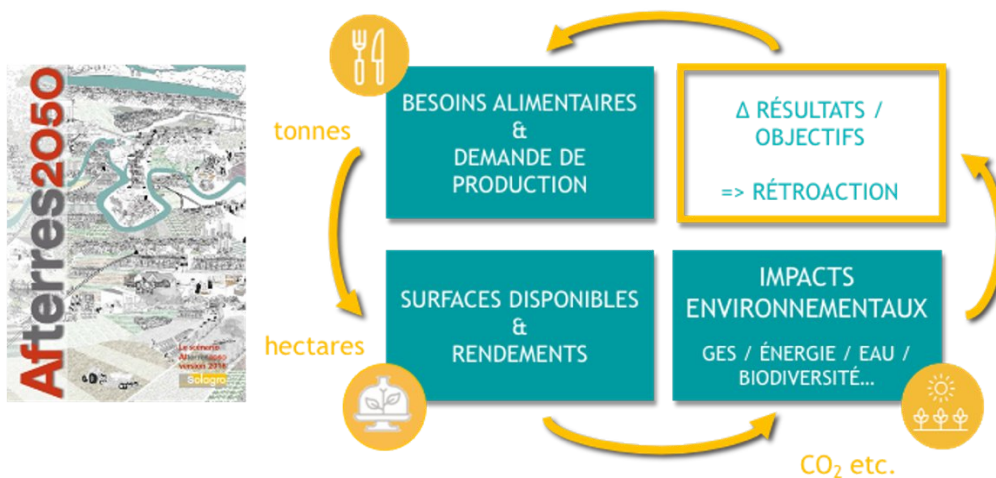


Figure 1 : Les grands principes du scénario Afterres2050 (Solagro, 2016)

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

Tableau 2 : Hypothèses agricoles (Compilation RECORD 2022) (Afterres 2050
<https://afterres2050.solagro.org/decouvrir/scenario>)

<i>Hypothèses gisement agricole</i>
1) Diminution de l'élevage avec libération des surfaces pâturées. Diminution de la production d'effluents d'élevage (fumier, lisier, fiente)
2) Maintien des prairies permanentes en valorisant une partie de l'herbe en méthanisation
3) Allongement des rotations culturales avec implantation de couverts végétaux. Augmentation importante de la production de CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique)
4) Augmentation de la part des légumineuses pour diminuer l'apport d'engrais azotés

Tableau 3 : Hypothèses non agricoles (Compilation RECORD 2022) (Outil BACUS, Solagro)

<i>Hypothèses gisement non agricole</i>
1) FFOM : 45 kg/hab/an
2) GMS : 30 kg/m ² à 50 kg/m ² selon type de GMS
3) Boues urbaines : 12 kgMS/hab/an, hors STEP qui méthanisent déjà et STEP < 5000 EH
4) Déchets et effluents IAA : ratios selon code NAF
5) Algues : donnée nationale 14 TWh (ENEA, INRIA et ADEME, Évaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à l'horizon 2030. Juillet 2014)

1.2. Potentiel énergétique des gisements disponibles

1.2.1. Détermination des potentiels méthanogènes par catégories de gisements

A l'issu de l'analyse des gisements méthanisables et mobilisables à l'horizon 2030, l'APESA a défini un potentiel méthanogène moyens par catégories de substrats. Ce potentiel méthanogène est basé sur des analyses disponibles dans la base de données BMP de l'APESA. Seule la catégorie algues (micro et macroalgues) regroupe des données internes de l'APESA mais aussi issu de la bibliographie, nos bases de données n'étant pas assez étayées pour ces substrats (Frigon et al., 2013; Jard et al., 2013).

L'APESA est un acteur reconnu de la méthanisation et réalise environ 300 tests de potentiel méthanogène annuellement. L'APESA a participé à l'étude inter-laboratoires National sur le BMP (Ribeiro et al., 2020) et au niveau International (Hafner et al., 2020). Il n'existe pas aujourd'hui de protocole normé sur le BMP mais les études inter-laboratoires ont permis de définir des bonnes pratiques que l'APESA a mises en place dans son protocole interne.

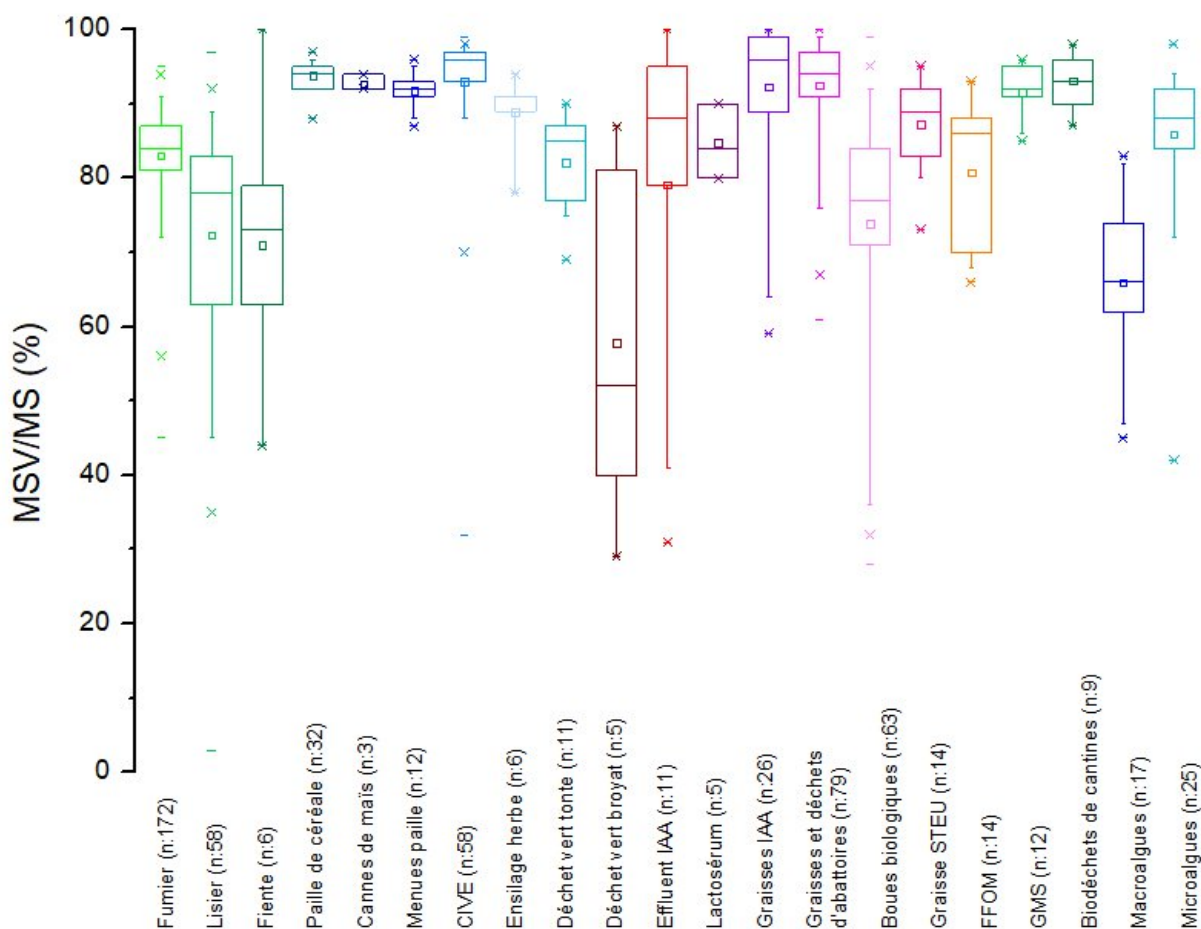


Figure 2 : Ratio MSV / MS (%) pour les différentes catégories de substrats (Compilation RECORD 2022) (Base de données APESA, 2021)

La Figure 2 présente pour chaque catégorie de substrats le ratio MSV / MS (%). Il est intéressant de noter que certaines catégories de substrats présentent une forte teneur en cendres, c'est notamment le cas des lisiers, fientes, déchets verts, boues et macroalgues. Les macroalgues et les déchets verts présentent les plus fortes teneurs en cendres moyennes avec 37% MS et 48%MS respectivement. Ces fortes teneurs peuvent être attribuées aux sels résiduels sur les macroalgues et à la terre présente sur certains déchets verts.

Les Figures 3 et 4 présentent en format box-plot les valeurs de potentiels méthanogènes exprimés en Nm^3/TPB et $Nm^3/tMSV$. Les valeurs exprimées en PB sont celles généralement utilisées sur les sites industriels mais difficilement exploitables ici car certains échantillons ont été traités en laboratoires

(séchage, centrifugation...). Nous avons donc exploité par la suite les résultats exprimés en Nm^3/tMSV . D'une manière générale les déchets gras (graisses IAA, graisses abattoirs, graisses STEU, lactosérum...) sont les déchets qui ont la plus forte production en méthane. Les FFOM, GMS et biodéchets de cantines suivent avec des valeurs de potentiels méthanogènes variant de 472 à 602 $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{tMSV}$. Enfin les algues et les biomasses agricoles sont celles qui présentent le plus faible potentiel méthanogène.

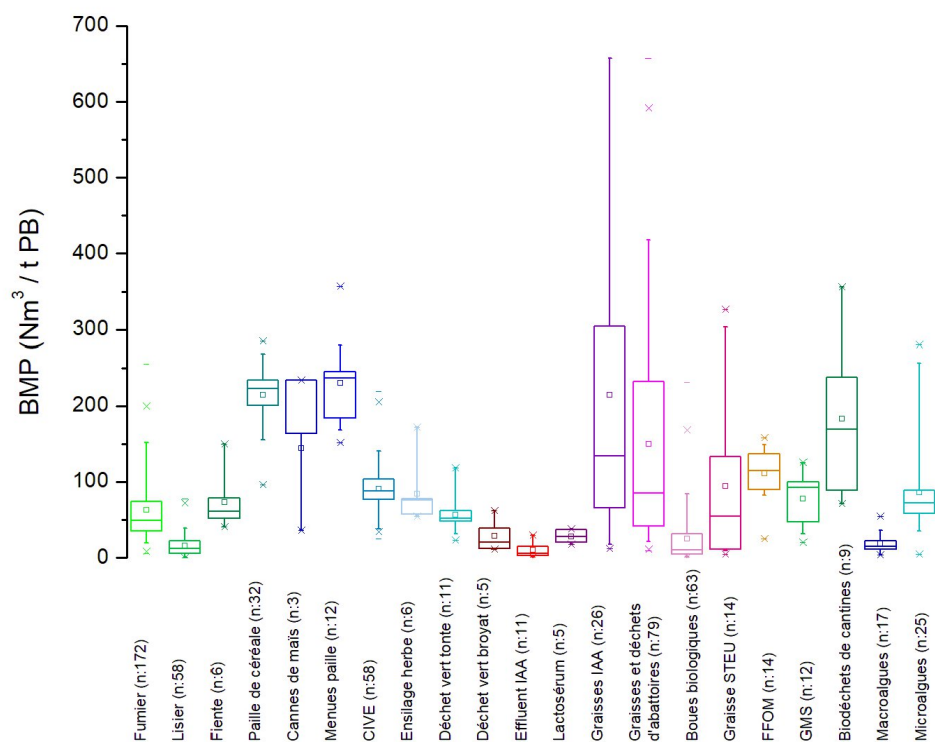


Figure 3 : Valeurs de BMP ($\text{Nm}^3/\text{tonnes PB}$) pour les différentes catégories de substrats. Entre parenthèse le nombre de substrats utilisés pour chaque catégorie. (Compilation RECORD 2022) (Base de données APESA, 2021)

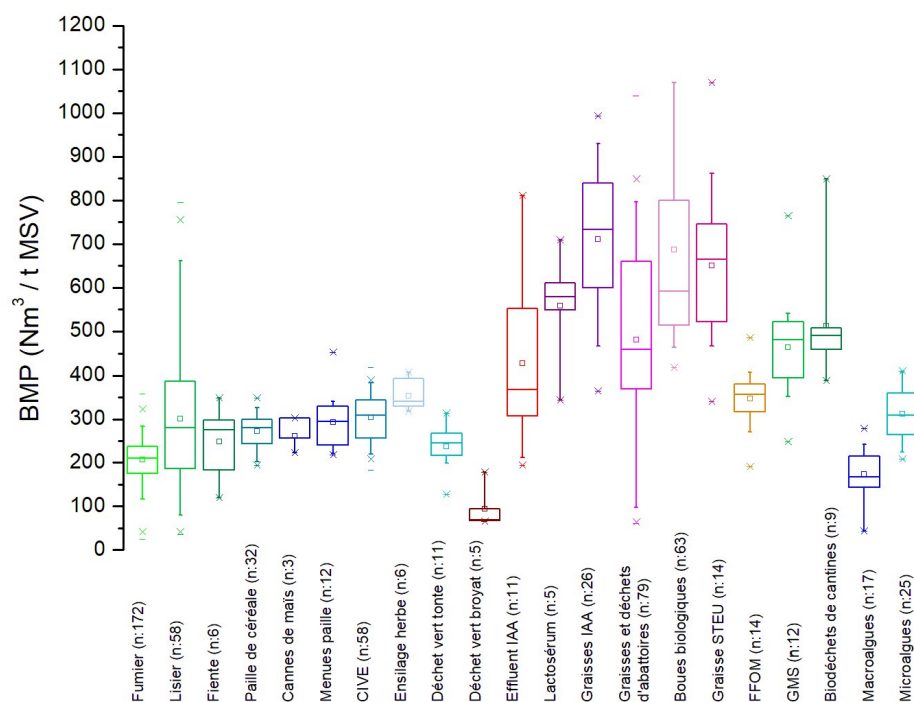


Figure 4 : Valeurs de BMP (Nm³/tonnes MSV) pour les différentes catégories de substrats. Entre parenthèse le nombre de substrats utilisés pour chaque catégorie. (Compilation RECORD 2022) (Base de données APESA, 2021)

1.2.2. Synthèses des données de potentiels méthanogènes

Les potentiels méthanogènes des ressources prises en compte pour l'évaluation des gisements sont issus de la base de données de l'APESA regroupant les essais BMP réalisés au laboratoire. Etant donné la diversité des taux de matière sèche sur une même typologie de matière, seul le potentiel méthanogène ramené à la matière sèche (Nm³ CH₄/t_{MS}) est pris en compte pour l'évaluation énergétique des ressources.

Tableau 4 : Potentiels méthanogènes moyens considérés pour les gisements identifiés (Compilation RECORD 2022) (Base de données APESA, 2021)

Famille	Sous-famille	Matière sèche (%MS)	Moyenne BMP (Nm ³ CH ₄ /t _{MS})	Moyenne BMP (Nm³ CH₄/t_{MS})
Déjections animales	Fumier	35	63	171
	Lisier	7	16	216
	Fiente	44	73	176
Résidus agricoles	Paille céréale	84	215	255
	Canne de maïs	58	145	240
	Menues paille	85	230	270
Production végétale	CIVE	33	91	283
	Ensilage herbe	27	84	315
Déchets verts des collectivités	DV tonte	29	57	194
	DV broyat	48	29	55
Déchets et effluents des industries	Effluent IAA	3	10	338
	Lactosérum	6	28	474
	Graisses IAA	33	215	630
	Graisses et déchets d'abattoirs	30	150	447
Boues de station d'épuration des eaux usées	Boues biologiques	12	25	185
	Graisse STEU	14	95	597
Biodéchets	FFOM	38	111	281
	GMS	20	78	427
	Biodéchets de cantine	41	183	477
Algues	Macroalgues	17	19	114
	Microalgues	33	87	268

1.3. Les ressources mobilisées en 2020

Les données prises en compte sont issues de la Base de données de l'ADEME des projets d'injection de biométhane bénéficiant d'un récépissé d'identification ADEME sur la période de 2012 à novembre 2020 (ADEME, 2021). A noter que cette base de données n'intègre pas les projets en cogénération. Ainsi les résultats présentés ici ne comptabilisent pas les unités en cogénération, du fait de l'absence, à la connaissance des auteurs, d'une base de données à jour et diffusable concernant cette typologie d'installations.

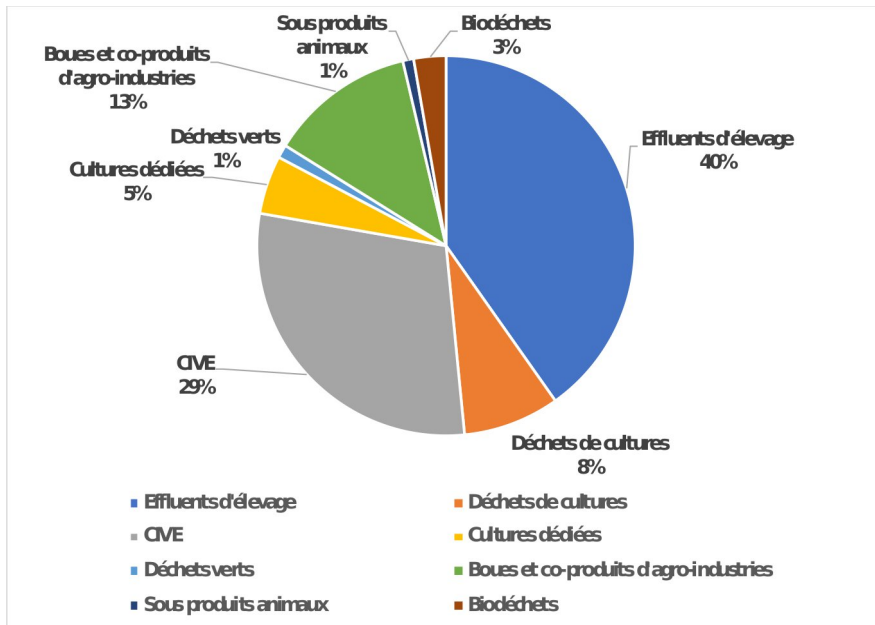


Figure 5 : Répartition du tonnage entrant en méthanisation en 2020 sur la base des projets en injection identifiés par l'ADEME (Compilation RECORD 2022) (SOLAGRO issu ADEME 2021)

1.4. Le potentiel de mobilisation à l'horizon 2030

L'estimation des ressources méthanisables à l'horizon 2030 met en évidence une augmentation de la part de productions végétales intermédiaires (CVE) et une diminution de la part des effluents d'élevage. Cette estimation repose sur les hypothèses évoquées plus haut, prenant en compte une diminution progressive de l'élevage dans les prochaines décennies.

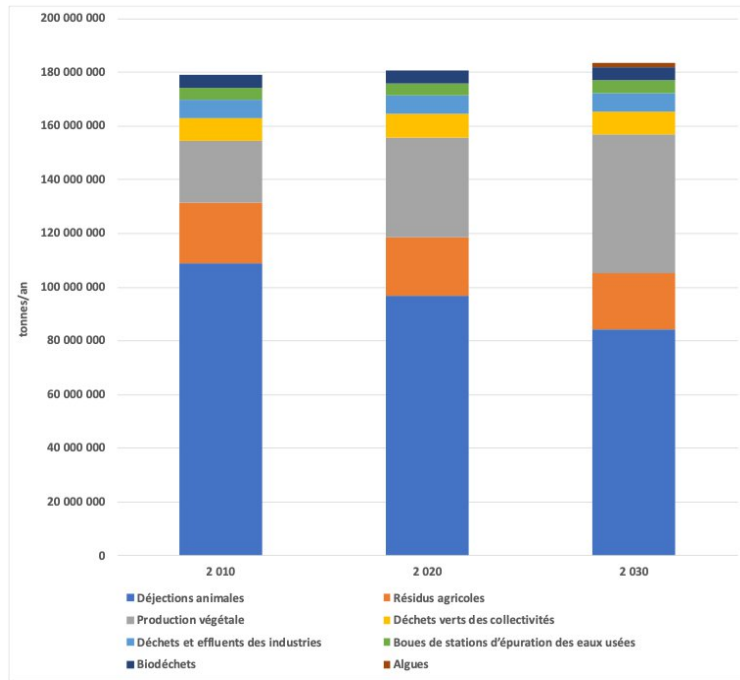


Figure 6 : Evolution du gisement prospectif méthanisable entre 2010 et 2030, en tonnes/an (Compilation RECORD 2022) (outil BACUS Solagro 2021)

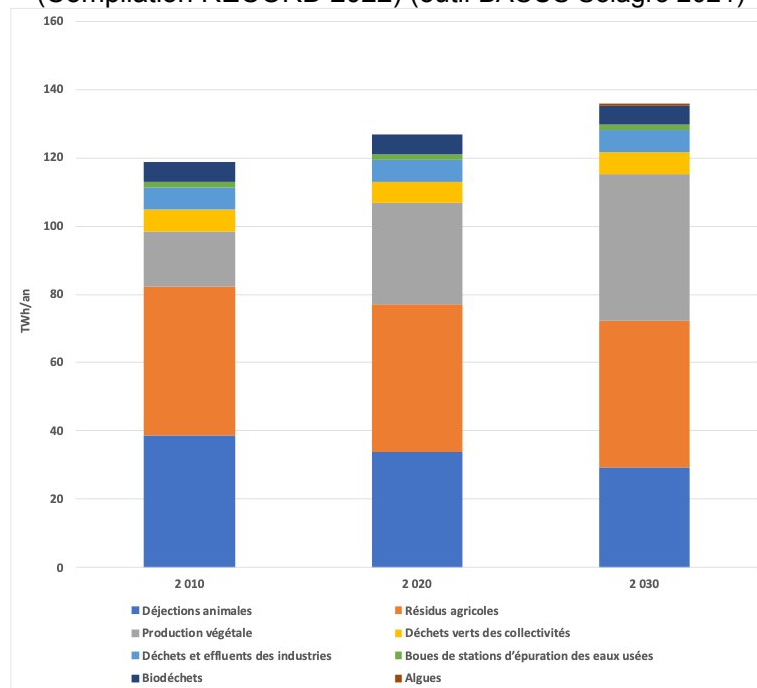


Figure 7 : Evolution du gisement prospectif méthanisable entre 2010 et 2030, en TWh/an (Compilation RECORD 2022) (outil BACUS Solagro 2021)

Le gisement méthanisable à l'horizon 2030 représente 136 TWh/an. Cette valeur est supérieure aux résultats de l'évaluation réalisée pour l'étude « Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation », ADEME, 2013. Les différences reposent principalement sur une augmentation de la mobilisation des ressources agricoles végétales (CIVE) basées sur le scénario AFTERRES 2050 et une baisse de la quantité de déjections d'élevage (diminution progressive de l'élevage).

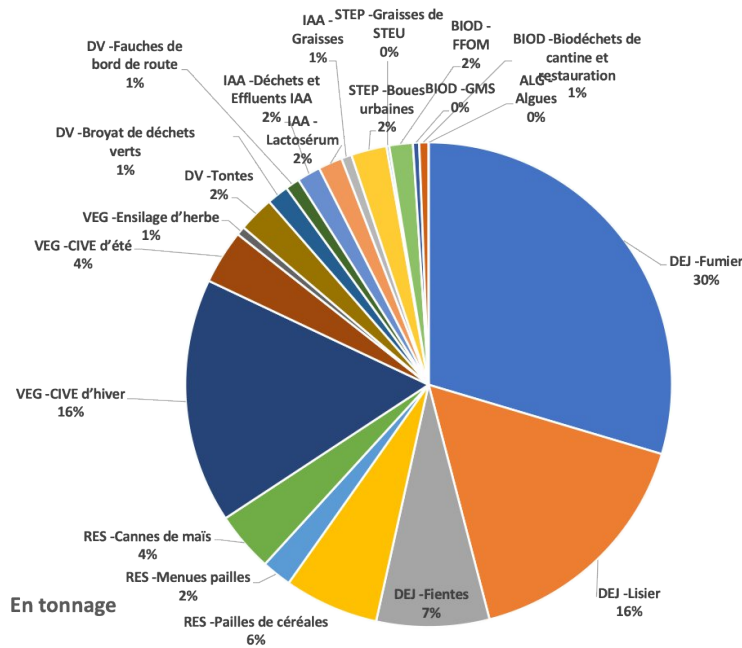


Figure 8 : Répartition de ressources prospectives méthanisables à l'horizon 2030, en tonnes (Compilation RECORD 2022) (outil BACUS Solagro 2021)

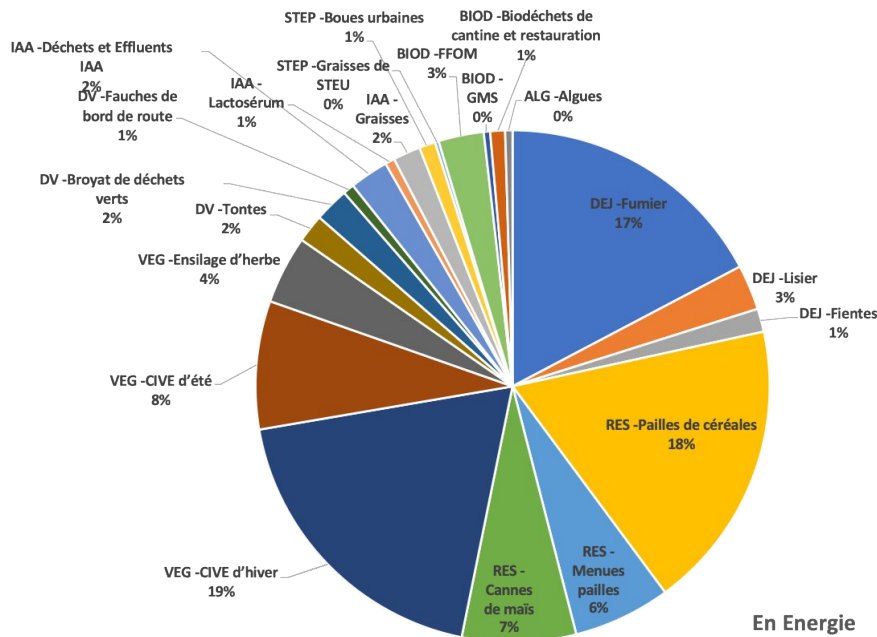


Figure 9 : Répartition de ressources prospectives méthanisables à l'horizon 2030, en énergie (Compilation RECORD 2022) (outil BACUS Solagro 2021)

Les matières agricoles représentent 85% du gisement mobilisable en tonnage et en énergie. Concernant le potentiel énergétique, la répartition est la suivante :

- Les résidus de cultures : 1/3 du potentiel énergétique en 2030
- Les productions végétales (CIVE, cultures) : 1/3 du potentiel énergétique en 2030
- Les fumiers/fientes : près de 20% du potentiel énergétique en 2030

A l'horizon 2030, les autres déchets représentent 15% du potentiel énergétique et sont déjà assez bien mobilisés :

- Les déchets des collectivités : 10% du potentiel énergétique en 2030
- Les déchets des industriels : 5% du potentiel énergétique en 2030

Les enjeux des prétraitements se concentrent donc sur les matières agricoles représentant la proportion la plus importante du gisement mobilisable, en tonnage et en énergie. De plus, il s'agit de matières majoritairement fibreuses nécessitant une première étape de dégradation en amont du processus de digestion anaérobie.

1.5. Les principaux facteurs limitant l'expression du potentiel méthanogène

1.5.1. Considérations générales

La charge introduite dans le méthaniseur dépend de la teneur en matière organique des intrants (MS/MSV), de leur biodégradabilité (BMP), du volume de digestion et de la technologie de méthanisation.

La caractérisation des matières à digérer est nécessaire pour établir la recette d'intrants et s'assurer que les équilibres biologiques nécessaires à la digestion anaérobie sont respectés. Les analyses généralement réalisées sur les intrants comprennent la MS, MSV, l'azote Kjeldahl et le phosphore. Le soufre est analysé en complément pour anticiper de potentielles problématiques liées à la production d'H₂S. Le potentiel méthanogène des intrants est mesuré en laboratoire pour évaluer la production de méthane du digesteur et lisser la production dans le temps lors de la préparation de la ration. L'analyse des éléments traces et potentiels inhibiteurs sera nécessaire sur des substrats peu connus.

Le bon fonctionnement de la digestion est contrôlé par le suivi biologique du digesteur en complément de la qualité et de la quantité de biogaz produit. Sont principalement mesurés :

- Le pH qui doit rester autour de la neutralité : 7 à 8,5,
- Le potentiel redox qui doit être caractéristique de conditions anaérobies : < - 300 mV/ENH,
- La concentration en AGV (Acides Gras Volatils) qui doit rester faible < 2 -3 g/L sans quoi un risque d'acidification du digesteur peut intervenir (acidose) (Ademe Bourgogne, 2014),
- Le ratio AGV/TAC² qui permet de contrôler que le pouvoir tampon du digestat est suffisant au regard de la quantité d'acides gras présents. Ce ratio doit être inférieur à 0,5 (Ademe Bourgogne, 2014). Un ratio qui augmente est caractéristique d'une diminution du pouvoir tampon et indique un risque d'acidose,
- La concentration en ammonium qui doit rester en deçà de 3 g/L dans le digesteur pour éviter une alcalose qui se traduit par une augmentation du pH et une diminution de la production de biogaz.

Les principaux paramètres mesurés sur les intrants et le digestat (suivi biologique) sont représentés sur la Figure 11.

² Titre Alcalimétrique Complet



Figure 10. Photo APESA, installation du GAEC Oudet

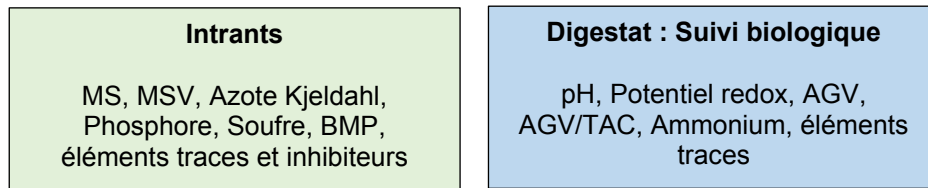


Figure 11 : Liste des paramètres utilisés pour la caractérisation des intrants et du digestat, suivi biologique (APESA, 2021)

1.5.1.1. Equilibres biologiques : besoins en macroéléments

Des macroéléments (carbone, azote, phosphore et soufre) sont nécessaires à la croissance et à la survie des microorganismes impliqués dans la digestion anaérobie.

Le ratio C/N est utilisé pour évaluer la proportion de carbone organique par rapport à l'azote total de la matière organique. Le ratio optimal est généralement compris entre 20 et 30 (Couturier & Galtier, 1998) avec un optimum à 25 (Hills, 1979). Une concentration insuffisante en azote dans la ration limitera la quantité de carbone qui pourra être dégradée. A l'inverse, une concentration excessive sera aussi pénalisante puisqu'elle engendrera un risque d'inhibition en raison d'une accumulation d'azote ammoniacal généré par la réduction de l'azote organique au cours de la digestion anaérobie. L'inhibition est principalement liée à la forme libre NH_3 dont la proportion est augmentée lorsque le pH et la température sont élevés (Moletta et al., 2008). La digestion thermophile est par conséquent plus sensible à l'inhibition à l'azote.

Les substrats présentent des ratio C/N très variables, les résidus agricoles et les graisses présentent les ratios les plus élevés au contraire des déjections animales de type lisier (Figure 12).

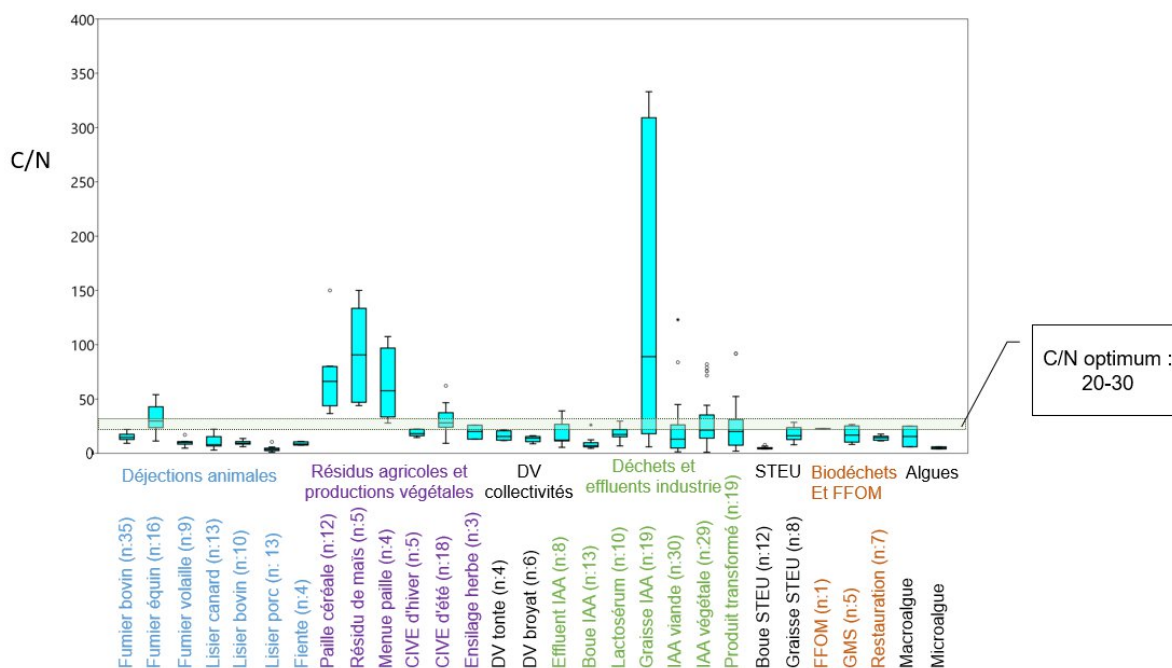


Figure 12 : Ratios C/N des intrants de méthanisation. Entre parenthèse le nombre de substrats utilisés pour chaque catégorie. (Compilation RECORD 2022) (APESA 2021, IFIP 2018, Fisgativa et al., 2018a; Frigon et al., 2013; Milledge et al., 2019).

Ces différents ratios sont présentés en Annexe 2.

Le phosphore est aussi un élément nutritionnel indispensable au bon fonctionnement de la méthanisation; le rapport optimal C/P est généralement compris entre 100 et 150 (Solagro, 1998).

Le soufre est nécessaire car c'est un constituant des principaux acides aminés et un nutriment essentiel pour la croissance des bactéries méthanogènes (Mao et al., 2015; Vintiloiu et al., 2012). Un ratio C/S de 600/1 est suffisant (Weiland, 2010).

1.5.1.2. Eléments traces

Des éléments traces minéraux sont nécessaires à la croissance microbienne, en particulier pour les Archées méthanogènes : potassium, calcium, cuivre, molybdène, cobalt, vanadium, magnésium, fer, manganèse, zinc, nickel, sodium, bore, sélénium, argent, or, iode, tungstène et titane (Escudié & Cresson, 2017; Moletta, 2008). Les concentrations de cobalt, sélénium, nickel et molybdène doivent être supérieures à 0,1 mg/L dans le digestat (PlanET). Seul le fer est nécessaire en concentrations plus élevées, de 1 à 10 mg/L (Weiland, 2010) voire 200 mg/L (PlanET; Schattauer et al., 2011). Ces éléments sont généralement en concentrations suffisantes dans la recette. Dans certains cas, des carences peuvent être constatées en particulier pour des méthaniseurs fonctionnant en mono-digestion. Dans ce cas, la dégradation de la matière ne sera pas optimisée entraînant des productions de gaz diminuées et des risques de couches/mousses en surface (PlanET). Un apport peut alors être réalisé à des concentrations généralement inférieures à 1 mg/L (Moletta, 2008).

1.5.1.3. Inhibiteurs

Les éléments traces peuvent, à partir d'un certain seuil, être des inhibiteurs et pénaliser les performances de la digestion anaérobie. Certains composés organiques sont aussi connus pour inhiber les processus biologiques. Le Tableau 5 inventorie les concentrations stimulatrices et inhibitrices pour la méthanisation.

Tableau 5 : Concentrations stimulatrices et inhibitrices pour la méthanisation, valeurs en mg/L
(Compilation RECORD 2022)

Polluants	Stimulatrice	Modérément inhibitrice	Fortement inhibitrice	Référence
Minéraux				
Azote ammoniacal (NH ₄ ⁺)	50 - 200	1 000 – 3 000	3 000 – 5 000	(McCarty, 1964) (Moletta, 2008)
Calcium	100 - 200	2 500 – 4 500	8 000	(McCarty, 1964)
Sodium	100 - 200	3 500 – 5 500	8 000	(McCarty, 1964)
Potassium	200 - 400	2 500 – 4 500	12 000	(McCarty, 1964)
Magnésium	75 - 150	1 000 – 1 500	3 000	(McCarty, 1964)
Sulfures (S ²⁻)		200	200	(Moletta, 2008)
Cadmium		0,5	0,5	(Boeglin, 1998)
Cuivre			0,5 soluble 50-70 total	(Garcia-Bernet et al., 2017) (Moletta, 2008)
Chrome VI			3 soluble 200-600 total	(Garcia-Bernet et al., 2017) (Moletta, 2008)
Chrome III			180-420 total	(Garcia-Bernet et al., 2017) (Moletta, 2008)
Nickel			2 soluble 30 total	(Garcia-Bernet et al., 2017) (Moletta, 2008)
Zinc			1 soluble	(Moletta, 2008)
Organiques				
5-HMF (hydroxyméthylfurfural)		10 000		(Monlau et al., 2014)
Furfural		5 000		(Monlau et al., 2014)
Hydrocarbures		50	50	(Boeglin, 1998)

Le Furfural et l'hydroxyméthylfurfural peuvent être générés lors du prétraitement de matières lignocellulosiques réalisé en vue d'augmenter leur biodégradation.

La présence de microplastiques dans les intrants pourrait aussi impacter la digestion anaérobie. Li et al. (2020) ont étudié, à l'échelle laboratoire, l'impact de l'addition de particules de microplastiques de polyester (200 µm) lors de la digestion anaérobie mésophile de boues de station (Li et al., 2020). Des diminutions de production de méthane de l'ordre de 10% ont été mesurées avec peu de différences selon la quantité de plastique ajoutée, entre 1 et 200 particules/kg MS. Des micropolluants adsorbés sur les microplastiques pourraient être relargués lors de la digestion anaérobie (Zhang, Chen, et Li 2020).

Des mycotoxines, puissants inhibiteurs, sont produits par certains micro-organismes lors du stockage de la matière. Pour éviter cette problématique, il convient de couvrir les silos et stocker la biomasse sous abri (issues de céréales, ...)(PlanET).

Les microorganismes de la digestion anaérobie peuvent s'acclimater dans une certaine mesure à la présence d'inhibiteur. La co-digestion permet de diluer la concentration en inhibiteur lié à un substrat en particulier.

Cas particulier du soufre

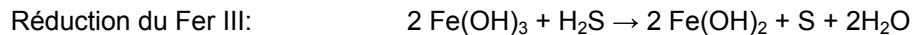
Le soufre est nécessaire en faibles quantités dans la ration car présent dans certaines enzymes et cofacteurs (Boulenger & Gallouin, 2009). En conditions anaérobies, le soufre (présent dans les protéines) et les sulfates sont réduits, sous l'action des bactéries sulfato-réductrices, en hydrogène sulfuré, connu pour être un inhibiteur de l'activité méthanogène. La concentration inhibitrice pour les bactéries méthanogènes serait de 50–125 mg H₂S/L pour un pH de 7 à 8 (réduction de 50% de la production de méthane) avec un seuil à 250 mg H₂S/L pour un pH acide (6,4–7,2) et 90 mg H₂S/L pour un pH basique (7,8–8,0)(Chen et al., 2008).

La toxicité de l'H₂S est multiple, elle peut être directe et liée aux sulfures dissous ou indirecte et liée à la précipitation des métaux indispensables aux méthanogènes (Florencio, 1994).

La présence de soufre dans les substrats doit être considérée tant au niveau des inhibitions biologiques que pour son impact sur la qualité du biogaz. L'H₂S expose à des risques mortels d'intoxications par inhalation nécessitant des mesures de sécurité spécifiques au niveau de la détection et de la ventilation. Il est de plus problématique car il génère des risques de corrosion pour les parties métalliques et notamment les moteurs.

Les travaux réalisés dans la thèse de Pascal Peu ont établi qu'un ratio C/S supérieur à 40 était compatible avec les procédés de désulfuration installés sur les méthaniseurs agricoles (Peu, 2011).

Des ajouts d'hydroxyde de fer ou de chlorure de fer peuvent être réalisés avec les intrants ou dans le digesteur pour précipiter les sulfures. Ce mécanisme met en jeu les réactions suivantes :



La société Ovive (France) et BiogasJG B.V. (Pays Bas) commercialisent des produits à base de fer pour cette application :

- OVIVE HFμ à base de Fe(OH)₃,
- FeSFix de BiogasJG B.V à base de Fe₂O₃ et d'éléments traces (Co, Ni, Cu, Mn, Zn, B, V, Al).

1.5.1.4. Accessibilité de la matière

Certains substrats sont très fermentescibles, à l'exemple des glucides et lipides, ce qui peut générer des risques d'acidose. Les AGV produits s'accumulent provoquant une diminution du pH du digesteur. Le taux de graisse dans la recette est généralement limité à 10 à 15% de la MS entrante afin de ne pas générer de difficultés au niveau de la digestion (acidification, moussage, remontée de graisses).

Au contraire, les matrices lignocellulosique présentent des propriétés physico-chimiques (faible surface accessible, fort taux en lignine, cellulose cristalline) qui peuvent limiter l'accessibilité de la matière et son hydrolyse (Monlau et al., 2013). Ces matières sont lentement biodégradables et nécessitent des prétraitements adaptés ou des temps de séjour longs.

1.5.1.5. Réglementation sur les sous-produits animaux

Les sous-produits animaux (SPAN) sont classifiés en 3 catégories selon leur dangerosité ou leur risque pour l'environnement (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018b; RCE 1069/2009, 2009). Seules les catégories 2 et 3 peuvent être traitées par méthanisation (Parlement Européen 2009):

- **Catégorie 2 : matière à risque sanitaire**

Elles comprennent en particulier les effluents d'élevage et le contenu de l'appareil digestif (matières stercoraires), les produits d'origine animale qui ont été déclarés impropres à la consommation humaine en raison de la présence de corps étrangers dans ces produits.

Sauf dérogations possibles pour les effluents d'élevage et les matières stercoraires, les matières C2 doivent être prétraitées par stérilisation (133°C, 20 minutes, 3 bars, < 50 mm) pour être méthanisées.

- **Catégorie 3 : matière à risque sanitaire faible**

Il s'agit en particulier des parties d'animaux abattus et propres à la consommation humaine mais non valorisés (plumes, poils, viande, graisse et sang d'animaux), les déchets de cuisine et de table qui ne proviennent pas de moyens de transport opérant au niveau international, les œufs non contaminés, ...

Les C3, sauf exception, sont méthanisées après hygiénisation (70°C, 1h, < 12 mm).

Un agrément sanitaire est nécessaire pour les unités de méthanisation traitant des sous-produits animaux (Parlement Européen 2009).

1.5.2. Déjections animales

1.5.2.1. Composition de la matière

Des indésirables (pierres, sables, bois, ficelle, métaux) peuvent être présents dans les fumiers et altérer la qualité de la biomasse. Des contaminants : pathogènes, métaux, antibiotiques, hormones sont aussi présents dans des proportions diverses selon la typologie d'élevage (type d'animaux, alimentation, litière/paillage...). Le ratio C/N des fumiers est dépendant de la proportion de paille, il s'établit entre 5 et 54 avec un minimum pour le fumier de volaille et un maximum pour le fumier équin.

Les lisiers présentent des faibles taux de MS et sont utilisés pour la dilution de la ration dans le cas de la méthanisation en infiniment mélangé. Le ratio C/N est faible avec une plage de variation comprise entre 1 et 22. Ceci peut être source d'inhibition à l'azote lors de la digestion en mono-digestion. L'azote ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) en concentration modérée est nécessaire et participe au pouvoir tampon du digestat. Les lisiers de porcs sont riches en soufre et peuvent générer des concentrations élevées en H_2S dans le biogaz. Pascal Peu a ainsi mesuré des ratios C/S de 44 et 52 pour deux lisiers de porcs ce qui conduirait en mono-digestion à une concentration potentielle en H_2S dans le biogaz comprise entre 0,7 et 3,9% selon les hypothèses retenues (Peu, 2011). Des concentrations élevées en métaux (cuivre et zinc) peuvent aussi être mesurées dans ces lisiers selon la ration alimentaire (PlanET).

Les fientes de volaille présentent des concentrations élevées en azote avec un ratio C/N moyen de 9. La concentration en soufre peut être élevée avec des ratios C/S compris entre 39 et 75 pour 6 fientes de volaille (Decoopman, 2006).

1.5.2.2. Facteurs réactionnels et biologiques

Les déjections animales sont des matières fermentescibles qui vont évoluer au cours du stockage. La durée de stockage qui induit 90 % des pertes de potentiel méthanogène a été reportée par le Club Biogaz dans son guide de bonnes pratiques pour les projets de méthanisation. Elle est de 50 jours pour les fumiers et 30 jours pour les lisiers (Barriatoulah, 2011). Des essais réalisés par l'APESA dans le cadre du projet SAM avaient montré des pertes de potentiel méthanogène de 1%/jour pour le mode de stockage le moins conservatif. Le fumier équin à 60% de MS avait été manipulé pour des opérations de chargement / transport / déchargement et broyage qui avaient conduit à introduire de l'air au sein de la matière. Les pertes étaient moins élevées pour les fumiers les plus secs (Peyrelasse C. et al., 2017).

Lors de la digestion, les fumiers riches en paille, à l'exemple des fumiers équins, auront des cinétiques de dégradation lentes en raison de la présence de lignocelluloses. La longueur des brins de paille et donc des fibres impactera les contraintes mécaniques pour l'introduction de la matière et les temps de séjour nécessaires à leur digestion. Des contraintes supplémentaires seront à considérer en infiniment mélangé, l'énergie d'agitation sera d'autant plus élevée que la teneur en matière sèche et par conséquent la viscosité est élevée. La présence de paille induit, de plus, des risques de flottation à maîtriser pour empêcher la formation de croûte dans le digesteur.

1.5.2.3. Facteurs opérationnels

Les effluents d'élevage sont des sous-produits animaux de catégorie 2. Des dérogations à la stérilisation/hygiénisation peuvent être autorisées si l'autorité compétente estime qu'il n'y a pas de risque de propagation d'une quelconque maladie grave transmissible (RCE 1069/2009, 2009).

Les effluents d'élevage sont des matières odorantes qui nécessiteront des mesures particulières pour limiter les nuisances lors du transport et du stockage.

1.5.3. Résidus agricoles et productions végétales

1.5.3.1. Composition de la matière

La récolte des résidus agricoles et productions végétales peut conduire à la présence d'indésirables (pierres, terres et sables) dans la biomasse.

Les pailles de céréales et cannes de maïs sont des substrats lignocellulosiques difficilement biodégradables. Le ratio C/N est élevé avec des valeurs comprises entre 28 et 150. L'herbe et les cultures énergétiques sont plus facilement biodégradables. Ces matières présentent, de plus, des brins plus courts (CIVE hachées à l'ensileuse). Les ratios C/N des CIVE sont dépendants de l'espèce végétale et varient entre 15 et 22 pour les CIVE d'hiver (graminées ou association de graminées /

légumineuses : avoine, triticale, orge, seigle, colza, pois, trèfle) et 9 à 62 pour les CIVE d'été (maïs, sorgho, tournesol et moya). L'herbe présente un ratio C/N assez faible, compris entre 13 et 26. La présence de soufre peut être problématique pour les résidus de colza et de moutarde.

1.5.3.2. Facteurs réactionnels et biologiques

Les résidus agricoles présentent des C/N élevés qui nécessiteront un rééquilibrage de la ration pour permettre de dégrader de manière optimale le carbone. La présence de résidus de colza ou moutarde sera à l'origine de la formation d'H₂S.

Les principales contraintes liées aux résidus agricoles concernent la faible cinétique de dégradation. Celle-ci est d'autant plus faible que les fibres sont longues et dures (canne de maïs). D'autre part, ces substrats ont tendance à flotter dans les digesteurs infiniment mélangés.

1.5.3.3. Facteurs opérationnels

Les résidus agricoles méthanisables peuvent concurrencer le secteur animal (pailles de céréales) et la combustion (menues pailles).

1.5.4. Déchets verts des collectivités

1.5.4.1. Composition de la matière

Les broyats de déchets verts (bois, tailles d'arbustes) présentent des forts taux de lignine qui pénalisent leur biodégradation en méthanisation. Ces substrats devraient être orientés vers des filières de compostage. Les tontes et fauches de bord de route sont plus adaptés à la méthanisation. Les tontes présentent un ratio C/S de 79 (Peu, 2011) ce qui ne génère pas de problématique liée à l'H₂S.

L'étude CARMEN (CARactérisation des HAP et des métaux dans les herbages fauchés en bord de routes pour la METHANISATION), financée par l'ADEME, s'est intéressée à la méthanisation des fauches de bords de route (Zdanevitch et al., 2018). Cette étude a montré qu'en fin d'été, les herbes sont plus sèches qu'au printemps et présentent un caractère plus ligneux qui réduit leur digestibilité en méthanisation (Zdanevitch et al., 2018). Le projet avait montré que les tontes ou fauches de bord de routes sont polluées par des indésirables : pierres, sables, plastiques. Les 2 campagnes de ramassage réalisées en bord de route ont collecté 2,4 et 3,2 kg de déchets/ km. Sur 50 km, ont été ramassés 245 bouteilles plastiques, 330 canettes aluminium, 80 bouteilles de verre, 12 sacs de 130 litres de papiers et plastiques divers, de la ferraille et des débris de voiture. L'étude concluait que les herbes de fauches étudiées pouvaient être méthanisées mais qu'un ramassage des déchets avant la fauche était nécessaire. Les concentrations en HAP ou métaux lourds n'étaient pas pénalisantes pour la digestion anaérobie ou le retour au sol au regard des exigences de la norme NF U 44-051 (Zdanevitch et al., 2018).

1.5.4.2. Facteurs réactionnels et biologiques

L'incorporation d'herbe dans la ration augmente la viscosité du mélange et peut provoquer des problèmes d'acidose (Zdanevitch et al., 2018). L'herbe a de plus tendance à flotter dans les digesteurs en infiniment mélangé.

Des essais en voie sèche discontinue ont été réalisés sur un pilote de 60L au cours du projet CARMEN. Ces essais ont permis de déterminer un taux maximal d'herbe dans la ration. Celui-ci est de 40% en volume (soit 10 à 20 % massique, selon la saison) pour éviter l'acidose dans le digesteur et limiter la viscosité dans le digestat qui pourrait conduire à sa prise en masse (Zdanevitch et al., 2018). La tonte d'herbe est un substrat avec un faible pouvoir structurant et une très faible perméabilité pénalisant la circulation du percolat (Zdanevitch et al., 2018).

1.5.4.3. Facteurs opérationnels

Le coût d'une fauche destinée à la méthanisation est de 1,5 à 2 fois supérieur au coût de la fauche classique (Zdanevitch et al., 2018). Ce surcoût pourrait être compensé par des économies sur l'entretien des routes (fossés en particulier) et la production de biogaz (Zdanevitch et al., 2018). Une distance maximale acceptable de 30 km a été définie entre le lieu de fauche et le méthaniseur, pour le cas particulier de la Mayenne, pour limiter les coûts de carburants (Zdanevitch et al., 2018).

1.5.5. Déchets et effluents des industries

1.5.5.1. Composition de la matière

- Industrie de la viande

L'industrie de la viande et en particulier l'activité d'abattage génère des déchets et graisses pouvant être méthanisés : viscères, sang, matières stercoraires... Leur nature lipidique et protéique présente des potentiels méthanogènes intéressants pour la méthanisation. Le ratio C/N est très variable, il s'établit autour de 2 pour le sang et peut atteindre des valeurs élevées à l'exemple des graisses et plumes. Des ratio C/S de 125 pour la viande de porc, 69 pour le mucus de porc, 75 pour le sang bovin et 19 pour les poils de porc ont été reportés (Peu, 2011).

- Industrie végétale

Les résidus de l'industrie végétale sont variés, il s'agit notamment des résidus de transformation et de conserverie des fruits et légumes. Les ratio C/N peuvent être élevés pour certains produits à l'exemple de la fécule/pulpe de pomme de terre (ratio de l'ordre de 70 à 80) et faibles pour les épluchures de légumes. Généralement, les résidus de fruits et légumes se dégradent rapidement. Certains produits végétaux tels que les choux, navets, poireaux, oignons, échalotes, ail, tomates contiennent du soufre à l'origine de la production d' H_2S lors de leur digestion (PlanET).

Certains résidus nécessitent des contraintes particulières à l'exemple du broyage (betterave, carotte) pour rendre la matière accessible à la dégradation. Ils peuvent de plus être chargés en sable et terre qui s'accumulent en fond de digesteur.

- Produits transformés

Dans cette étude, la catégorie « produits transformés » intègre les déchets de l'industrie de transformation du lait (yaourt), de la fabrication de plats préparés ou d'aliments pour animaux. Le potentiel méthanogène est intéressant avec des ratios C/N variables.

- Lactosérum

Le lactosérum présente un bon potentiel méthanogène avec une cinétique de dégradation rapide. Le pH peut être proche de la neutralité, de l'ordre de 6,5 (lactosérum doux) ou acide avec un pH entre 3 et 5.

- Effluents, boues

Les effluents d'IAA présentent un taux de MS faible. Les boues issues du traitement des effluents ont un taux de MS plus élevé dépendant du processus de déshydratation.

- Graisses IAA

Les graisses d'IAA considérées dans cette étude correspondent aux résidus de production (graisses issues de la production de margarine, graisse de confit de canard) et aux graisses générées par le traitement des effluents : graisses de flottation. Le ratio C/N peut être très élevé en fonction de la pureté de la graisse.

1.5.5.2. Facteurs réactionnels et biologiques

La digestion anaérobie des déchets de l'industrie de la viande, riches en lipides et protéines, peut générer des problèmes d'inhibition au sein du digesteur. Les principaux inhibiteurs qui peuvent être rencontrés avec ces substrats sont l'ammonium et l'hydrogène sulfuré liés à la dégradation des protéines ainsi que les acides gras volatils (Ek et al., 2011). Les déchets d'abattoir sont, en effet, connus pour produire de l' H_2S lors de leur digestion (Ek et al., 2011). La digestion de ces déchets avec d'autres substrats a été proposée pour remédier aux risques d'inhibition (Alvarez & Lidén, 2008).

Les effluents des industries peuvent contenir des inhibiteurs pour la méthanisation à l'exemple des désinfectants utilisés pour le lavage. Ils sont peu concentrés (en MS) et ont généralement un potentiel méthanogène faible ramené au poids brut. Ils sont intéressants pour apporter de l'eau à la ration.

Les graisses fortement fermentescibles présentent un risque de moussage et d'acidose lors de la digestion. Elles peuvent aussi générer des problèmes de colmatage des canalisations et des difficultés lors du mélange (non miscibilité, flottation).

1.5.5.3. Facteurs opérationnels

Les déchets et effluents des industries peuvent être des SPAn (§1.5.1.5). C'est en particulier le cas des déchets d'abattoir, du lait, des produits à base de lait, du colostrum, des œufs, les produits à base d'œufs. Dans ce cas, des contraintes spécifiques d'hygiénisation/stérilisation (avec des dérogations possibles) s'appliquent en amont de la méthanisation et un agrément sanitaire est nécessaire.

Les résidus de l'industrie végétale sont produits de manière saisonnière. Différents gisements doivent être disponibles pour permettre une production de biogaz lissée sur l'année.

Un stockage chauffé des graisses peut être nécessaire pour permettre leur pompage.

1.5.6. Boues et graisses de stations d'épuration des eaux usées

1.5.6.1. Composition de la matière

Les boues primaires extraites du décanteur primaire présentent une meilleure biodégradabilité que les boues secondaires produites après le traitement biologique aérobie. Les filasses (résidus de lingette par exemple) présentes dans les boues posent des problèmes de bouchage des conduites et pompes à l'entrée ou en sortie de digesteur et peuvent pénaliser le fonctionnement des agitateurs. Elles peuvent de plus créer des croûtes en surface de digesteur.

Les graisses sont très fermentescibles et présentent un potentiel méthanogène élevé intéressant en digestion anaérobie. Elles peuvent toutefois être polluées par des plastiques (COOP de France & FNCUMA, 2011) ou des filasses.

1.5.6.2. Facteurs réactionnels et biologiques

Les graisses fortement fermentescibles présentent un risque de moussage et d'acidose lors de la digestion. Elles peuvent aussi générer des problèmes de colmatage des canalisations et des difficultés lors du mélange (non miscibilité, flottation). Le taux de graisses dans la ration doit être limité à 10-15% de la MS de la ration pour éviter les risques de moussage, acidification et les problématiques de mélange.

1.5.6.3. Facteurs opérationnels

La méthanisation des boues et graisses de station d'épuration relève d'une réglementation spécifique. Un stockage chauffé des graisses peut être nécessaire pour permettre leur pompage.

1.5.7. Biodéchets

1.5.7.1. Composition de la matière

Les biodéchets produits par les particuliers ou issus des grandes et moyennes surfaces et de la restauration contiennent des indésirables à éliminer préalablement à la méthanisation. Il s'agit d'erreurs de tri et d'emballages : métaux, verre, plastiques. Les biodéchets sont fortement fermentescibles ce qui impose de bonnes conditions de stockage pour limiter les pertes de matière et de potentiel méthanogène et les nuisances (odeurs, nuisibles, insectes). Le ratio C/N est relativement faible : 14 ± 2 pour les biodéchets de cantine et restauration.

1.5.7.2. Facteurs réactionnels et biologiques

Le caractère fermentescible des biodéchets peut pénaliser la digestion en raison de la production rapide d'AGV et du risque d'acidose. Des concentrations élevées en ammonium peuvent aussi être problématiques.

1.5.7.3. Facteurs opérationnels

L'article L. 541-21-1 du code de l'environnement impose le tri et la valorisation de biodéchets. Cette obligation concernait depuis 2012 les plus producteurs, plus de 120 tonnes/an de biodéchets ou 1500 litres/an d'huiles alimentaires. Depuis 2016, sont concernés les producteurs de plus de 10 t/an de biodéchets ou plus de 60 litres/an d'huiles alimentaires usagées (JORF, 2011). Cette obligation sera étendue à partir du 1er janvier 2023 à tous les producteurs de plus de cinq tonnes de biodéchets par an puis au plus tard le 31 décembre 2023, à tous les producteurs ou détenteurs de biodéchets, y compris les collectivités territoriales et les établissements privés et publics qui génèrent des biodéchets (Code de l'environnement, 2021).

Les déchets de cuisine et de table (DCT) font l'objet d'une réglementation particulière. Il s'agit de « tous les déchets d'aliments y compris les huiles de cuisson usagées provenant de la restauration et des cuisines, y compris les cuisines centrales et les cuisines des ménages » comme stipulé dans l'annexe 1 du règlement européen 142/2011 (Commission européenne, 2020). Ces déchets sont définis comme étant des sous-produits animaux (SPAN) de catégorie 3 (règlement CE 1069/2009 article 10) (Parlement européen et conseil, 2009). Ils doivent être broyés à une taille maximale de 12 mm et hygiénisés à 70 °C minimum pendant 1 heure minimum, avant leur introduction dans le digesteur (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018a). Leur transport est aussi réglementé. « Les sous-produits animaux et les produits dérivés doivent être collectés et transportés dans des emballages neufs scellés ou dans des conteneurs ou véhicules étanches et couverts » (Parlement européen et conseil, 2009).

La mobilisation du gisement de biodéchets est un point clé de la réussite de leur valorisation. Les producteurs de biodéchets doivent être sensibilisés aux enjeux de cette mobilisation et au tri afin de limiter au maximum la présence d'indésirables qui dégradent la qualité de la matière.

1.5.8. Algues

1.5.8.1. Composition de la matière

- Macroalgues

Les macroalgues sont riches en soufre avec des ratios C/S de 12 pour les algues rouges et 7 pour les algues vertes (Peu, 2011).

Des études ont été conduites pour la méthanisation des sargasses dans le cadre d'un appel à projet de l'ADEME « collecte et valorisation des algues sargasses en Guadeloupe ». Les analyses réalisées par INRAE transfert environnement montrent que les algues sargasses présentent de fortes concentrations en sels (INRAE Transfert Environnement, 2018) en partie présents à l'intérieur des cellules. Des concentrations en chlorure et potassium de 8,4 g/kg et 11,9 g/kg d'algues fraîches ont été mesurées.

Le projet Eco3Sar : Ecologie, Ecotoxicologie et Economie des Sargasses, financé par l'ADEME s'est intéressé à la présence de contaminants dans les sargasses. Les algues échouées sur les côtes de Guadeloupe et de Martinique présentent des concentrations moyennes en arsenic de 80 mg/kg MS (Lopez et al., 2020). Le chlordécone est présent dans les sargasses des zones de limitation/restriction de la pêche avec des concentrations allant de quelques µg/kg de MS jusqu'à 1,9 mg/kg de MS. Dans les autres zones, les résultats démontrent l'absence de chlordécone dans les sargasses (Lopez et al., 2020). Des concentrations en cadmium supérieures à 0,8 mg/kg MS ont aussi été reportées en période hivernale pour des macro-algues échouées sur les côtes danoises (Gimžauskaitė et al., 2020)

Le ratio C/N est généralement faible et évolue en fonction de la saison et de la localisation (Milledge et al. 2019).

Le potentiel méthanogène des macroalgues est faible avec une valeur moyenne de 173 Nm³ CH₄/t_{MSV} comparativement à d'autres substrats organiques, 272 Nm³CH₄/t_{MSV} pour les pailles de céréales par exemple (base de données APESA, (Jard et al., 2013)).

Différents facteurs ont été avancés pour expliquer la faible production de méthane des macroalgues : structure et résistance de la paroi cellulaire, synthèse de substances toxiques ou antimicrobiennes par les cellules algales, ratio C/N défavorable, production de polyphénols pour certaines espèces, présence de soufre, de métaux lourds et de sels pour les algues marines (Barbot et al., 2016).

- Microalgues

Les taux de MS des microalgues sont faibles, de l'ordre de 0,1 à 1 g/L dans les bassins ouverts et 1 à 4 g/L dans les photobioréacteurs (DelTorchio, 2013; Wiley et al., 2011). Une étape de récolte/concentration est nécessaire avant la digestion anaérobie. L'accessibilité de la matière est de plus limitée par la structure complexe de la paroi cellulaire.

1.5.8.2. Facteurs réactionnels et biologiques

Des essais de digestion anaérobie de sargasse ont été réalisés par l'INRAE en mode thermophile voie sèche sur des pilotes de 16,5 L. Les performances de digestion sont faibles avec une production de 60 Nm³CH₄/t_{MSV}, un biogaz produit pauvre en CH₄ (32%) et un taux d'H₂S élevé (3,4%) (INRAE

Transfert Environnement, 2018). L'inhibition du processus de digestion serait imputable à la présence de sels et en particulier aux sulfates à l'origine de la production d' H_2S (INRAE Transfert Environnement, 2018).

Les algues ou microalgues d'eau douce contrairement aux microalgues marines ne généreront pas de risque d'inhibition lié à la salinité.

1.5.8.3. Facteurs opérationnels

Les algues d'échouage ne sont pas produites en continu nécessitant leur stockage dans des conditions favorables à la conservation de la matière. Des précautions particulières seront nécessaires vis-à-vis du risque H_2S pour les exploitants et le matériel. Le sable présent dans les algues marines récoltées sur les plages est aussi problématique car il se dépose en fond de digesteur et nécessitera des opérations de vidange régulière pour conserver un volume suffisant de digestion. Il participe de plus au vieillissement prématuré du matériel, tout comme le sel, dans le cas des algues marines.

Les principaux verrous limitant l'utilisation des microalgues en digestion anaérobie concernent les coûts de production de cette biomasse (Zabed et al., 2020). Les faibles concentrations en microalgues dans les réacteurs de cultures imposent la mise en place de processus de récolte et de concentration pour augmenter le taux de MS de cette biomasse avant digestion.

1.5.9. Synthèse des facteurs limitants et leviers d'actions

Nomenclature intrants	Type procédé méthanisation	Facteurs limitants			Leviers d'actions : Approvisionnement et stockage, Prétraitement et préparation de la ration
		Composition de la matière	Facteurs réactionnels et biologiques	Facteurs opérationnels	
Déjections animales					
Fumier	Voie sèche IM	<p>Hétérogénéité</p> <p>Présence de paille difficilement biodégradable (lignocellulose)</p> <p>Présence de polluants (ETM, hormones, antibiotiques...)</p> <p>Présence d'indésirables (pierres, sables, bois, ficelles, métaux)</p>	<p>Pertes au stockage</p> <p>Cinétiques de dégradation lentes pour les fumiers pailleux</p>	<p>Matière odorante (précaution stockage/transport)</p> <p>SPAN (dérogation possible à la stérilisation/hygiénisation)</p>	<p>Ne pas broyer avant le stockage mais avant la digestion pour limiter les pertes de matières pendant le stockage (Peyrelasse C. et al., 2017).</p> <p>Prévenir et contrôler le risque d'auto inflammation pendant le stockage</p> <p>Enzymes biologiques pour améliorer la biodégradation et réduire la viscosité du digestat</p>
	Spécificités IM	<p>Fibres longues → contraintes mécaniques pour l'introduction et l'agitation</p>	<p>Energie d'agitation élevée (viscosité)</p> <p>Risque de flottation dans le digesteur (si fumier pailleux)</p>		<p>Différentes solutions de broyage existent sur le marché pour accélérer la cinétique de dégradation et faciliter l'introduction/mélange</p> <p>Des prétraitements de type ultrason ou cavitation existent pour réduire la viscosité du digestat et améliorer la digestion de la matière.</p>
Lisier	Voie sèche IM	<p>Taux de MS faible</p> <p>Faible potentiel méthanogène</p> <p>C/N faible: risque inhibition NH₃</p> <p>Concentration élevée de soufre (lisier porcin)</p> <p>Présence de polluants : cuivre et zinc pour les lisiers de porc, hormones, antibiotiques, ...</p>	<p>Pertes au stockage</p> <p>Sédimentation pendant le stockage</p> <p>Génération d'H₂S en particulier pour le lisier porcin</p>	<p>Matière odorante (précaution stockage/transport)</p> <p>Volumes importants → transport sur de courtes distances</p> <p>SPAN (dérogation possible à la stérilisation/hygiénisation)</p>	<p>Réduire la durée du stockage à 1 ou 2 semaines maximum pour limiter les pertes de matière et de potentiel méthanogène pendant le stockage : stocker en fosse couverte agitée (Peyrelasse C. et al., 2017).</p> <p>Conception de la cuve en pointe de diamant avec possibilité de vider la fosse intégralement pour éliminer les matières en suspension, support de développement bactérien (Peyrelasse C. et al., 2017).</p> <p>Méthaniser le lisier en co-digestion pour équilibrer le C/N et le faible taux de MS de la ration</p>
Fientes	Voie sèche IM	<p>Bon pouvoir tampon</p> <p>Très fermentescible</p> <p>C/N faible</p> <p>Concentration élevée en soufre</p> <p>Présence d'indésirables (terre, plumes)</p>	<p>Risque d'inhibition azote</p> <p>Génération d'H₂S</p>	<p>SPAN (dérogation possible à la stérilisation/hygiénisation)</p>	<p>Prétraitement thermochimique (extraction d'azote, amélioration de l'accessibilité cellulose/hémicellulose)</p> <p>Méthaniser en co-digestion</p>
Résidus agricoles					

Nomenclature intrants	Type procédé méthanisation	Facteurs limitants			Leviers d'actions : Approvisionnement et stockage, Prétraitement et préparation de la ration	
		Composition de la matière		Facteurs réactionnels et biologiques		Facteurs opérationnels
Pailles de céréales	Voie sèche IM	Fibres longues Présence de soufre pour une partie des pailles (colza, moutarde)	Substrats lignocellulosiques difficilement biodégradables (lignine) Présence d'indésirables (sable, terre, pierre) C/N élevé	Cinétiques de dégradation lentes Génération d'H ₂ S avec les résidus de colza, moutarde	Concurrence avec le secteur animal Matière payante Concurrence biomasse (combustion) Matière payante Risque d'envol lors de la manutention Difficulté pour le ramassage et le broyage	Stocker sous abri, limiter les manipulations et introductions d'air Prévenir et contrôler le risque d'auto inflammation pendant le stockage Méthaniser en co-digestion pour équilibrer le C/N Enzymes biologiques pour améliorer la biodégradation et réduire la viscosité du digestat Adapter le temps de séjour dans le digesteur aux cinétiques de dégradation de la matière
Menues pailles	Voie sèche IM	Présence de soufre pour une partie des menues pailles (colza, moutarde)				
Cannes de maïs	Voie sèche IM	Fibres longues				
Résidus agricoles	Spécificités IM	Contraintes mécaniques pour l'introduction et l'agitation		Energie d'agitation élevée (Viscosité) Risque de flottation dans le digesteur (paille) (COOP de France & FNCUMA, 2011)	Différentes solutions de broyage existent sur le marché pour accélérer la cinétique de dégradation et faciliter l'introduction/mélange (broyeur à couteaux / marteaux) Piège à cailloux Des prétraitements de type ultrason ou cavitation existent pour réduire la viscosité du digestat et améliorer la digestion de la matière.	
Production végétale						
CIVE d'hiver	Voie sèche IM	Matière hachée à l'ensileuse		Dégradation de la matière en absence de stockage adapté	Coût de production élevé avec des rendements aléatoires Logistique pour le stockage (ensilage) Saisonnalité	Une attention particulière doit être portée lors de la récolte et du stockage pour limiter la présence d'indésirables Bonne conservation de la matière ensilée, récupération des jus avec piège à cailloux Prévoir un piège à cailloux et/ou pré fosses et puisard en amont des pompes (Ollivier 2016)
CIVE d'été	Voie sèche IM	Présence d'acides Substrat rapidement biodégradable Présence d'indésirables (pierres, sables)				
Ensilage d'herbe	Voie sèche IM	Présence d'indésirables (pierres, sables) Composition saisonnière : plus ligneuses en fin d'été		Risque d'acidification	Coût faible Saisonnalité Production existante	Enzymes biologiques pour améliorer la biodégradation et réduire la viscosité du digestat Attendre à minima 4 semaines après l'ensilage pour introduire la matière (risque d'acidose) (PlanET)
Production végétale	Spécificités IM			Energie d'agitation élevée (Viscosité)		Privilégier les brins courts pour le réglage de l'ensileuse (Ollivier 2016)

Nomenclature intrants	Type procédé méthanisation	Facteurs limitants			Leviers d'actions : Approvisionnement et stockage, Prétraitement et préparation de la ration
		Composition de la matière	Facteurs réactionnels et biologiques	Facteurs opérationnels	
			Risque de flottation dans le digesteur si ensilage grossier		Un compromis doit être trouvé entre le tonnage de matière produite et sa biodégradabilité (choix de l'espèce et de la période de récolte)(Ollivier 2016) Des prétraitements de type ultrason ou cavitation existent pour réduire la viscosité du digestat et améliorer la digestion de la matière.
Déchets verts des collectivités					
Tontes	Voie sèche IM	Risque d'indésirables (pierres, sables, plastiques, métaux...) Composition saisonnière : plus ligneuses en fin d'été	Risque d'acidification	Redevance Production saisonnière Filière de collecte existante (COOP de France & FNCUMA, 2011)	Enzymes biologiques existantes sur le marché pour améliorer la biodégradation et réduire la viscosité du digestat limiter à 10 à 20 % massique de la ration, selon la saison (voie sèche) (Zdanevitch et al., 2018) limiter la durée de stockage ou ensiler la matière
Broyat de déchets verts	Voie sèche IM	Risque d'indésirables (plastiques...) Fort taux de lignine → fraction peu ou pas biodégradable (bois, tailles d'arbustes)	Cinétiques de dégradation lentes	Production saisonnière Concurrence avec la filière de compostage	Sélectionner les matières à méthaniser : herbe
Fauches de bord de route (Zdanevitch et al., 2018)	Voie sèche IM	Présence d'indésirables (plastiques, verres, canettes...) Composition saisonnière : plus ligneuses en fin d'été	Risque d'acidification (Zdanevitch et al., 2018)	Production saisonnière Nettoyage nécessaire de la zone avant fauchage	Ne pas faucher trop près du sol pour ne pas polluer la fauche par de la terre Enzymes biologiques existantes sur le marché pour améliorer la biodégradation et réduire la viscosité du digestat limiter à 10 à 20 % massique de la ration, selon la saison (voie sèche) Des prétraitements de type ultrason ou cavitation existent pour réduire la viscosité du digestat et améliorer la digestion de la matière.
Déchets verts des collectivités	Spécificités IM		Energie d'agitation élevée (Viscosité) Risque de flottation dans le digesteur		Les problèmes de flottation peuvent être résolus par la mise en place de broyeurs (en amont de la digestion ou en recirculation sur le digesteur) et/ou une agitation adaptée
Déchets et effluents des industries agroalimentaires					

Nomenclature intrants	Type procédé méthanisation	Facteurs limitants			Leviers d'actions : Approvisionnement et stockage, Prétraitement et préparation de la ration
		Composition de la matière	Facteurs réactionnels et biologiques	Facteurs opérationnels	
Industrie viande dont abattoir	IM	Substrats riches en lipides et protéines C/N faible Présence de soufre (sang, protéines)	Risque d'acidification en raison de la dégradation rapide des matières Risque inhibition NH ₃ et production d'H ₂ S	Redevance Matière odorante (précaution stockage/transport) Précautions particulières liées au risque H ₂ S pour les exploitants SPAN Hygiénisation et broyage nécessaire (70°C, 60 minutes Particules < 12 mm)	Méthaniser les déchets de l'industrie de la viande en co-digestion
Industrie végétale	Voie sèche IM	Présence de terre, sable (résidus de betterave, carotte...) Certains substrats sont non accessibles à la digestion en absence de broyage (pommes de terre, betteraves ...) Présence de soufre pour certains produits végétaux : choux, navets, artichauts, poireaux, oignons, échalotes, ail, tomates (PlanET)	Risque de production d'H ₂ S en présence de végétaux soufrés	Production saisonnière	Privilégier les résidus qui contiennent peu de terre et de sable qui s'accumulent en fond de digesteur La production saisonnière nécessite la disponibilité de substrat de substitution Selon les substrats, nécessité de broyage : (exemple résidus de pomme de terre, carottes)
Produits transformés (déchets alimentaires de l'industrie)	IM	Solide à liquide Généralement substrat rapidement biodégradable		Classement possible en SPAN	
Lactosérum	IM Voie liquide	Liquide Substrat rapidement biodégradable pH acide	Risque d'acidification	SPAN	
Boues et effluents	IM Voie liquide Voie sèche	Possible inhibiteurs : sels, métaux, polyphénols, désinfectants Carences possibles en mono-digestion Effluents parfois très dilués et peu méthanogènes	Evolution du pH	Classement possible en SPAN	Sélectionner les boues et effluents compatibles avec la méthanisation par rapport à leur dégradabilité et à l'absence d'inhibiteurs Contrôler le pH et neutraliser si besoin Complémenter si besoin nutriments et oligo-éléments
Graisses	Voie sèche (co-digestion)	Liquide à pâteux	Risque de moussage et d'acidification	Redevance	Prétraitement par saponification

Nomenclature intrants	Type procédé méthanisation	Facteurs limitants			Leviers d'actions : Approvisionnement et stockage, Prétraitement et préparation de la ration
		Composition de la matière	Facteurs réactionnels et biologiques	Facteurs opérationnels	
	IM	Substrat fortement fermentescible C/N élevé	Difficultés pour le mélange (non miscibilité, flottation) et risque de colmatage	Classement possible en SPAN Stockage chauffé (>20°C) pour permettre le pompage Concurrence avec d'autres voie de valorisation (COOP de France & FNCUMA, 2011)	Limiter à 10-15% de la MS de la ration
Boues de stations d'épuration des eaux usées					
Boues biologiques	IM	Liquide à pâteux Présence de filasses (dont résidus de lingettes) Boues secondaires moins dégradables et méthanogènes que les boues primaires (faible accessibilité du matériel intracellulaire) Présence de polluants (ETM, hormones, antibiotiques, microplastiques...) C/N faible	Risque de moussage (si présence de bactéries filamenteuses)	Réglementation spécifique	Eliminer les filasse avant méthanisation Prétraitements existants : Hydrolyse thermique, sonolyse, électrocinétique Co-méthaniser des boues et graisses pour améliorer le ratio C/N En absence de boues primaires, étudier l'intérêt d'intégrer un décanteur primaire sur la file eau
Graisses de STEP	IM	Liquide/pâteux Présence de filasse Substrat fortement fermentescible Présence possible de plastique (COOP de France & FNCUMA, 2011)	Risque de moussage et d'acidification Difficultés pour le mélange (non miscibilité, flottation) et risque de colmatage	Réglementation spécifique	Eliminer les filasse avant méthanisation Possible prétraitement par saponification Limiter à 10-15% massique dans la ration
Biodéchets					
FFOM	IM Voie sèche	Solide Présence d'indésirables (plastiques dont micro/nano plastiques, métaux, verre) + carton souillé et papier + matières non biodégradables (os) Ratio C/N relativement faible Substrat fortement fermentescible	Pertes au stockage Risque d'acidification en raison de la dégradation rapide des matières	Redevance	Optimiser le tri en amont Stockage hermétique en absence d'air (avec traitement des événements) Déconditionnement nécessaire Hydrolyse anaérobie
GMS				Réglementation spécifique SPAN de catégorie 3	
Déchets de cantine et restauration				Contraintes liés au stockage/transport : odeurs, nuisibles, insectes Hygiénisation et broyage	

Nomenclature intrants	Type procédé méthanisation	Facteurs limitants			Leviers d'actions : Approvisionnement et stockage, Prétraitement et préparation de la ration
		Composition de la matière	Facteurs réactionnels et biologiques	Facteurs opérationnels	
				nécessaire (70°C, 60 minutes Particules < 12 mm)	
Algues					
Macroalgues	IM	<p>Solide</p> <p>Présence de soufre et ratio C/N faible</p> <p>Présence de sables et de sels dont NaCl</p> <p>Les sargasses contiennent de l'arsenic et du chlordécone dans certaines zones</p> <p>Taux élevé de matières minérales → Faible potentiel méthanogène</p>	<p>Inhibition du processus de méthanisation : sels (algues marines), soufre</p> <p>Perte de matière lors du stockage</p>	<p>Précautions particulières liées au risque H₂S pour les exploitants</p> <p>Production non continue pour les algues d'échouage nécessitant un stockage</p> <p>Sable : ensablement digesteur, vieillissement prématuré du matériel</p> <p>Nécessité de mettre en place un mode de stockage conservatif (</p>	<p>Limiter le taux de macroalgues dans la recette : co-digestion</p> <p>Acclimater les microorganismes de la digestion anaérobie</p> <p>Traiter le biogaz (dans le digesteur par injection d'oxygène dans le ciel gazeux ou en amont du processus de valorisation) et/ou injection de réactifs (hydroxyde de fer, chlorure de fer) dans le digesteur pour précipiter le soufre</p> <p>La production saisonnière nécessite la disponibilité de substrats de substitution</p> <p>Limiter le ramassage du sable lors du ramassage des algues (ramassage des algues en mer, tamisage) et/ou laver les algues à l'eau de mer voire à l'eau douce pour réduire la présence de sels et éliminer les sables</p>
Microalgues et spiruline		<p>Liquide : faible teneur en MS</p> <p>Faible accessibilité du matériel intracellulaire</p> <p>Ratio C/N faible</p>	<p>Inhibition du processus de méthanisation : sels (micro-algues marines)</p>	<p>Nécessité de mettre un processus de récolte et de concentration des microalgues compte tenu de leur faible concentration</p>	<p>Prétraitements pour casser la paroi cellulaire (Ward, Lewis, et Green 2014)</p> <p>Limiter le substrat dans la recette : co-digestion (équilibre du ratio C/N)</p> <p>Sélectionner les microalgues selon leur aptitude à produire du méthane, faciliter leur récolte et à produire des molécules à forte valeur ajoutée</p> <p>Méthaniser les résidus de microalgues après valorisation pour des applications à forte valeur ajoutée (molécules d'intérêt)</p>

Volet 2 : Synthèse bibliographique des technologies de stockage et prétraitements des intrants en méthanisation

2.1. Introduction

Parmi les différents intrants utilisés en méthanisation certains comme les cultures intermédiaires à vocation énergétiques (CIVE) ne sont produits ou récoltés qu'une ou deux fois par an, ils doivent donc être stockés jusqu'à leur introduction dans le méthaniseur. L'objectif principal du stockage sera la conservation de la matière organique, en particulier la conservation du potentiel méthanogène. La problématique de stockage sont également prégnante dans le cas des matrices facilement biodégradables telles que les déchets alimentaires (biodéchets, soupes de déconditionnement...) mais aussi des fumiers et lisiers pour lesquels des émissions de méthane ont lieu pendant le stockage.

Pour la plupart des intrants solides, l'hydrolyse est l'étape limitante de la cinétique de méthanisation. Des prétraitements peuvent être appliqués afin de faciliter cette étape. L'objectif du prétraitement sera alors l'amélioration de l'accessibilité et de la biodégradabilité de la matière organique. Notamment, la solubilisation de la matière particulaire et l'augmentation de la surface spécifique facilitent le contact entre la matière biodégradable et les enzymes, ce qui résulte en une augmentation de rendement méthane et une amélioration de la cinétique de dégradation biologique. Outre cet objectif principal visant à favoriser l'expression du potentiel biométhanogène, les prétraitements peuvent permettre de :

- Hygiéniser certains substrats tels que les sous produits animaux comme imposé par la réglementation
- Introduire la matière dans le méthaniseur
- Concentrer les matières organiques dans les intrants
- Diminuer la viscosité du milieu réactionnel et donc des problématiques de pompage et réduction des coûts énergétiques de brassage

2.2. Les technologies de prétraitements et leur positionnement

Afin d'améliorer l'expression ou la conservation du potentiel méthanogène des biomasses méthanisables, différentes technologies de prétraitements peuvent être appliquées et sont généralement classifiées en mécanique, physique, thermique, chimique et biologique et des combinaisons de prétraitements peuvent aussi être envisagées (Atelge et al., 2020; Carrere et al., 2016; Hashemi et al., 2021) (Figure 9). Outre l'amélioration du pouvoir méthanogène, les technologies de prétraitement peuvent avoir un impact positif sur le bon fonctionnement et l'entretien des outils (pompes, canalisation, mélangeur, agitateur) ainsi que sur la puissance et la consommation énergétique de ces mêmes outils (Garuti et al., 2017; Mönch-Tegeder et al., 2014).

Les solutions de prétraitements et stockage pour la méthanisation

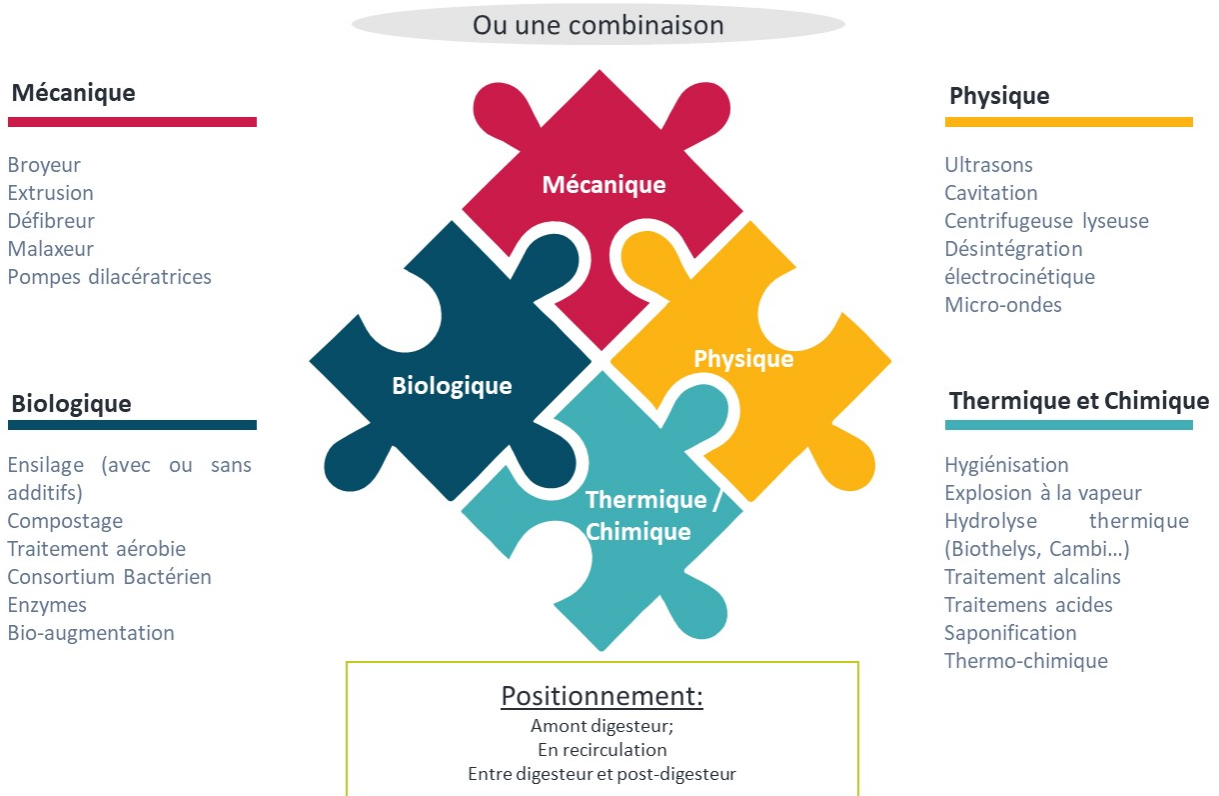


Figure 13 : Les technologies de prétraitements et de stockage par catégories (RECORD, 2022)

Il existent différentes technologies de prétraitements qui sont décrites ci-dessous :

Prétraitement mécanique :

Les prétraitements mécaniques regroupent les différentes typologies de broyeurs, les systèmes d'extrusion, les malaxeur en entrée de méthaniseur et les pompes dilacératrices. Parmi les **broyeurs**, nous retrouvons notamment : broyeurs à marteaux, à couteaux, à flux croisé.... **La pompe dilacératrice** pompe et broie en une seule fonction, ce qui empêche le colmatage ou le blocage. Parmi les prétraitements mécanique, l'**extrusion bi-vis** est un **procédé** de prétraitement physique prometteur pour la conversion de la **biomasse lignocellulosique**. L'extrusion bi-vis est un processus qui combine plusieurs opérations dans une seule unité. Lors de l'extrusion, les matières traitées peuvent être soumises à différents type de contraintes : thermique, mécanique (mélange, frottement, cisaillement..), chimique et biochimique entraînant des modifications physiques et structurales des polymères constitutifs.

Prétraitement physique :

Les prétraitements physiques rassemblent les procédés de cavitation, d'ultrasons, de micro-ondes, de désintégration électrocinétique. Le prétraitement **micro-ondes** est l'une des méthodes de prétraitement physique. Le principe principal du mécanisme est le rayonnement électromagnétique utilisant une large gamme de fréquences de 300 MHz à 300 GHz avec des longueurs d'onde allant de 1 mm à 1 m, respectivement (Atelge et al., 2020; Marin et al., 2010). Par ailleurs, **des procédés de cavitation**, aujourd'hui commercialisé par les sociétés Cavimax (<https://www.cavimax.co.uk>) et Biobang (<https://www.biobang.com/web/fr/biobang-fr/>) sont des solutions en pleine expansion. On appelle cavitation la naissance et l'oscillation radiale de bulles de gaz ou de vapeur dans un liquide soumis à une dépression. Les **prétraitements ultrasons (sonication)** ont aussi été appliqués notamment sur les filières boues. La sonication consiste en la propagation d'ondes de pression dans un milieu liquide et en la formation de bulles de cavitation qui implosent violemment lorsqu'elles atteignent une taille critique. Une grande quantité d'énergie mécanique est alors libérée entraînant des phénomènes de fortes turbulences et de forts cisaillements au sein du liquide. Le prétraitement

par **désintégration électrocinétique**, utilise des champs électriques de tension élevée (jusqu'à quelques dizaines de kilovolts) sur des pulses de quelques millisecondes. Finalement, **le procédé de centrifugeuse lyseuse** est une centrifugeuse traditionnelle à laquelle un système de lyse cellulaire a été ajouté. Les forces de cisaillement entre des lames fixes solidaires de la paroi interne de la centrifugeuse et des lames mobiles fixées sur le rotor conduisent à la désintégration partielle

Prétraitement thermique et thermo-chimique :

Les prétraitements thermiques et thermo-chimiques peuvent aussi être appliqués. Aujourd'hui, ce sont majoritairement des procédés thermiques à hautes températures qui sont appliqués (Cambi®, Exelys®...) notamment dans le cadre des unités de méthanisation traitant des boues. L'hydrolyse thermique peut avoir lieu à haute température, entre 140 et 180°C sous pression ou à faible température. L'hydrolyse thermique à des températures inférieures à 80°C a également été étudiée, ces procédés impliquant des réactions biologiques, les durées sont de l'ordre de la dizaine d'heures à quelques journées. En parallèle, un agent chimique (acide, oxydant, alcalin) peut aussi être ajouté. Les prétraitements thermo-chimiques sont jusqu'à présent majoritairement utilisés à l'échelle du laboratoire et les agents utilisés sont l'acide sulfurique, acide phosphorique, soude, chaux...

Prétraitement biologique :

Les prétraitements biologiques concernent les prétraitements qui engagent des organismes vivants, sont comptés dans cette catégorie l'ensilage, le pré-compostage de la matière, les prétraitements enzymatiques ou fongiques. Les prétraitements biologiques présentent l'avantage de CAPEX faibles, de simplicité de mise en œuvre mais nécessite souvent de travailler dans des conditions de stérilité afin d'éviter la consommation de la matière soluble par les organismes endogènes.

Ces technologies de prétraitements peuvent être appliqués seuls ou en synergie. Il n'est pas rare de coupler des prétraitements mécaniques avec des prétraitements thermiques, biologiques ou physiques.

A l'échelle industrielle, le choix du prétraitements appliqués dépend de divers paramètres :

- La nature de la biomasse à traiter ;
- Le type de méthanisation (voie sèche garage, voie sèche piston, infiniment mélangé) ;
- La formation de potentiel inhibiteurs de la méthanisation ;
- La valorisation du biogaz (injection, cogénération) qui peut impacter la rentabilité de l'unité de méthanisation ;
- Des CAPEX et OPEX de l'unité de prétraitement à mettre en place au regard de la rentabilité globale (Excédent Brut d'exploitation et Résultat d'exploitation).

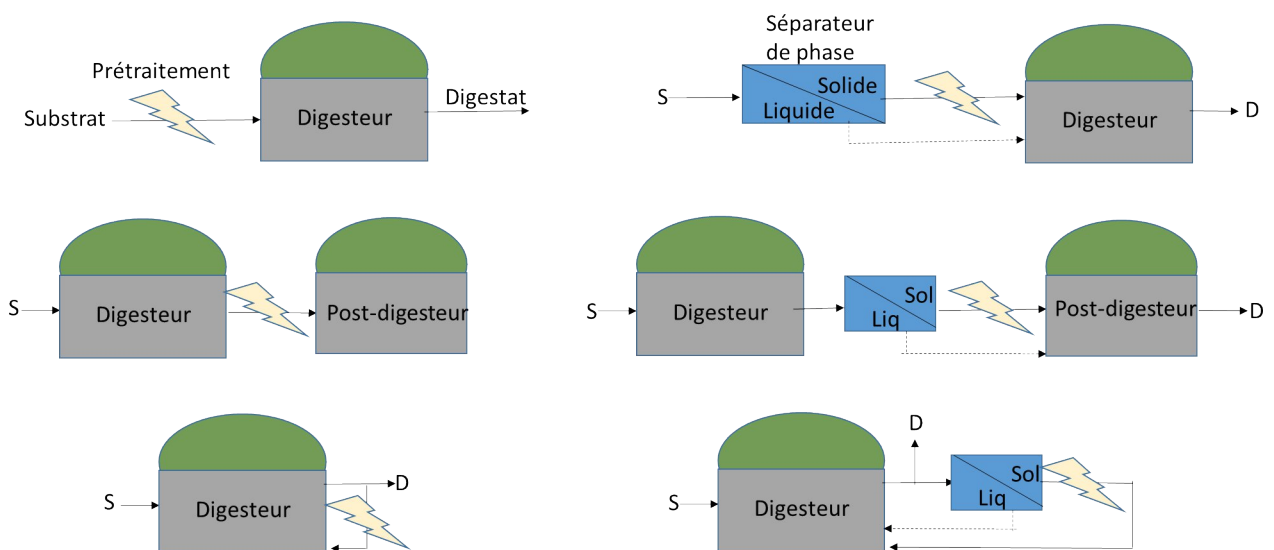


Figure 14 : Différentes configurations de couplage des procédés de prétraitements et de méthanisation
Source : (Carrère et al., 2021)

La Figure 14 présente les différents configurations pour le couplage des procédés de prétraitements ou de stockage de la matière et de méthanisation. Le positionnement en amont du méthaniseur est le plus fréquent, il peut cependant être pertinent, dans le cas de la codigestion, de ne traiter que les substrats les plus difficiles à dégrader ou ceux nécessitant une hygiénisation. Le prétraitement peut aussi être appliqué entre le digesteur et le post-digesteur ou sur une boucle de recirculation du digestat (procédé de cavitation de la société Biobang ou système gaz mix). Cette dernière option permet un meilleur brassage du milieu réactionnel et une réduction de la formation de croûte en surface. De plus, si le traitement est appliqué au digestat, le procédé biologique qui permet une première réduction de la matière facilement dégradable ; le traitement va donc cibler la matière difficilement dégradable présente dans le digestat solide avant de la réintroduire dans le digesteur ou post-digesteur (Brémond et al., 2018). La concentration de la matière particulaire par une étape de séparation de phase permet de réduire le volume de déchets à traiter et, en conséquence, la consommation énergétique des prétraitements.

2.3. Visualisation de l'état de l'art au niveau National et International

Afin de prendre un peu de hauteur sur les travaux réalisés sur la thématique des pré-traitement et ainsi de se différencier des nombreux états de l'art disponibles, une démarche de recherche des travaux scientifiques au niveau national et international a été réalisée :

- ⊖ En ce qui **concerne le niveau National**, nous avons consulté l'intégralité des membres scientifiques du CTBM (Centre Technique du Biogaz et de la méthanisation, <https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/ctbm>) afin de recueillir les projets R&D et les thèses sur le sujet du prétraitement de ses dix dernières années (2010-2021). Nous avons aussi étendu l'enquête auprès des acteurs industriels majeurs de la méthanisation (SUEZ, VEOLIA, ENGIE, SUEZ, TOTAL, AIR LIQUIDE, GRDF...) afin d'identifier l'existence des collaborations industriels / académiques et également de connaître les similitudes ou les différences des axes et des priorités R&D entre les instituts publics et industriels.
- ⊖ En ce qui concerne **le niveau International**, nous avons utilisé le moteur de recherche Web of Science (base de données bibliographiques universitaire en ligne fournie par l'Institute for Scientific Information). La recherche a porté sur les mots clés « pretreatment anaerobic digestion » or « pretreatment biogas » dans le domaine topic « keywords, title, abstract ». Nous avons ensuite adopté deux stratégies de traitements des données. La première a consisté à utiliser l'interface **Web of Science** (<https://apps.webofknowledge.com>) pour obtenir des données statistiques sur les années de publication, les auteurs publiant le plus, les organisations et pays, les typologies d'ouvrages.... La deuxième démarche a consisté à traiter les données à l'aide du logiciel open access **VOS VIEWER** (<https://www.vosviewer.com/>) qui est un logiciel de scientométrie. VOSviewer est un outil pour la construction et la visualisation de réseaux bibliométriques.

2.3.1. Niveau National

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à identifier les thèses et les projets en cours au niveau National autour de la problématique stockage et prétraitement de la matière avant méthanisation.

Aujourd'hui, huit laboratoires travaillant sur cette thématique ont été identifiés au niveau National (Figure 15). Le laboratoire le plus actif sur le sujet est l'INRAE-LBE avec pas moins de 8 thèses ces dix dernières années. L'INSA de Lyon a aussi été pas mal impliqué avec 3 thèses notamment sur les projets ADEME SAM et PAM. D'autres laboratoires ou centre de recherche comme l'UTC, LBC, INRAE et APESA travaille aussi sur ces thématiques.

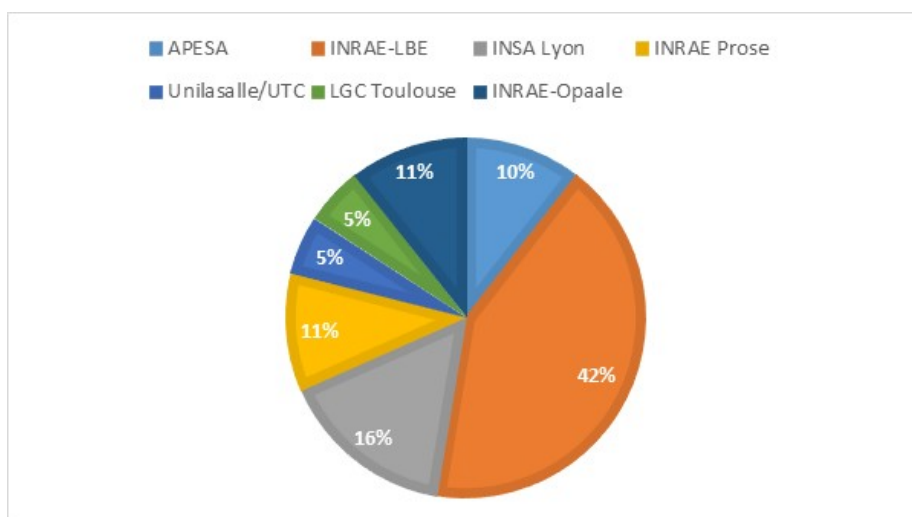


Figure 15 : Laboratoires publics ou centre de recherche impliqués dans les thèses autour de la problématique stockage et prétraitement de la matière avant méthanisation (RECORD, 2022)

Comme spécifié en Figure 16, **depuis 2011, en France**, la plupart des thèses porte sur les biomasses lignocellulosiques et résidus agricoles (13 thèses), puis viennent les sujets des biodéchets/ordures ménagères (4 thèses) puis des boues (2 thèses). En ce qui concerne, les biomasses lignocellulosiques et résidus agricoles, les thèses ont porté sur le stockage des CIVEs avant méthanisation, sur le prétraitement des résidus agricoles, des cultures énergétiques et des fumiers. Une thèse a aussi porté sur le prétraitement de digestat solide de méthanisation en recirculation (Thèse Ulysse Brémond). A noter qu'une thèse est en cours sur la biodégradabilité des plastiques biodégradables en lien avec le secteur des biodéchets au sein de l'APESA.

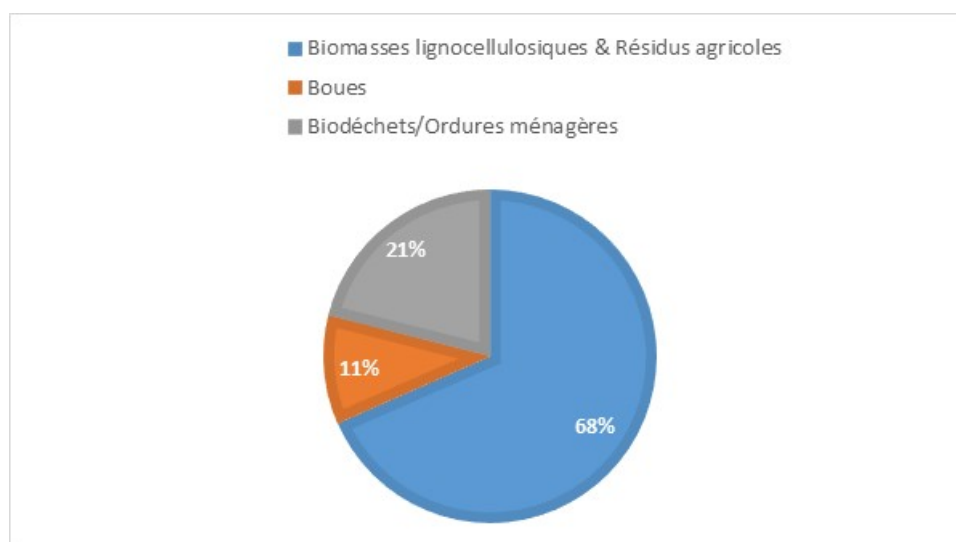


Figure 16 : Origine des gisements étudiés dans les thèses autour de la problématique stockage et prétraitement de la matière avant méthanisation (RECORD, 2022)

Une liste détaillée des différentes thèses sur ces dix dernières années est fournie en Tableau 6. Il est à noter l'absence de thèses sur certaines typologies de biomasses et notamment les biomasses algales (micro et macro-algues). Enfin, il est important de noter que certains industriels sont impliqués dans les thèses (GRDF, AIR LIQUIDE, OCP...). Toutefois, cette implication reste assez marginale et pourrait en partie expliquer le décalage que nous pouvons retrouver entre expérimentations menées à l'échelle laboratoire et réalité industrielle.

En parallèle des thèses, nous avons aussi réalisé un recensement des projets en cours sur la problématique du stockage et prétraitement de la matière avant méthanisation. Le Tableau 7 présente les différents projets en cours et les partenaires associés.

Tableau 6 : Détail des thèses qui sont en cours dans les différents instituts (RECORD, 2022)

Nom et Prénom	Année	Laboratoire	Industriel impliqué	Biomasses	Titre de la thèse
David Jackowiak	2011	Unilasalle/UTC		Biomasses lignocellulosiques	Prétraitement de biomasses lignocellulosiques par microonde pour l'amélioration du procédé de biométhanisation
Anthony Boulanger	2011	INRAE-PROSE		déchet ménager	Préparation d'un déchet ménager pour l'optimisation du potentiel et de la cinétique méthanogène
Florian Monlau	2012	INRAE-LBE		Biomasses lignocellulosiques	Application de prétraitements pour améliorer la production de biohydrogène et méthane: lien entre propriétés physico-chimiques et performances
Cecilia Sambusiti	2013	INRAE-LBE		Biomasses lignocellulosiques	Etude de prétraitements et post-traitements pour améliorer l'expression du potentiel méthanogène de résidus agricoles
Hughes Carlei	2013	INRAE-PROSE		déchet ménager	Caractérisation et optimisation d'une étape statique d'hydrolyse des ordures ménagères résiduelles en vue de leur méthanisation hors-sol
Vincent Nordmann	2013	APESA-UPPA		Biomasses lignocellulosiques	Caractérisation et impact des différentes fractions d'une biomasse lignocellulosique pour améliorer les prétraitements favorisant sa méthanisation
Le Ngoc Tuan	2013	LGC Toulouse		Boues	Optimisation du prétraitement des boues par sonication à basse fréquence sous pression
Elsa Rouches	2015	INRAE-LBE		Biomasses lignocellulosiques	Impact de prétraitements fongiques sur la méthanisation de la biomasse lignocellulosique, caractérisation des substrats transformés
Xun Liu	2015	INSA Lyon		Biomasses lignocellulosiques	Valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique par digestion anaérobie : prétraitement fongique aérobie
JH Tian	2016	INRAE Rennes		Biomasses lignocellulosiques	Etude d'un prétraitement biologique des biomasses lignocellulosiques par une approche microbiologique et de bioprocédé
Henry Fisgativa	2016	INRAE Rennes		Biodéchets	Etude de l'impact d'un prétraitement aérobie sur la digestion anaérobie de déchets de cuisine
Ruben Teixeira Franco	2017	INSA Lyon		Résidus agricoles	Optimisation des pratiques de gestion des déchets agricoles en lien avec leur valorisation par méthanisation
Ulysse Brémond	2019	INRAE-LBE	Air Liquide	Résidus agricoles	Optimisation de la gestion des digestats : post-traitements et recirculation pour une amélioration de l'efficacité énergétique des sites de méthanisation
Aurélié Bichot	2019	INRAE-LBE		Biomasses lignocellulosiques	Liens entre la composition de la biomasse et l'efficacité des prétraitements appliqués en vue d'une valorisation en bioraffinerie
Hélène Thomas	2019	INRAE-LBE		Biomasses lignocellulosiques	Etude de l'impact des pré-traitements alcalins sur la digestion anaérobie du sorgho et du miscanthus
Doha El Alami	2020	INRAE-LBE	OCP	Boues	Couplage de la co-digestion et du prétraitement appliqué aux boues de STEP et aux résidus de biomasse pour produire du biogaz et des biofertilisants
Helen Laura Coarita Fernandez	2021	INSA Lyon		Résidus agricoles	Prétraitement des déchets agricoles pour l'optimisation de leur valorisation par méthanisation
Clément Van Vlierberghe	en cours	INRAE-LBE	GRDF	CIVEs	Stockage et prétraitement des CIVEs avant méthanisation
Guillaume Cazaudehore	en cours	APESA-UPPA		Biodéchets/Bioplastiques	Méthanisation des plastiques biodégradables en co-digestion avec des biodéchets: communauté microbienne et impact de prétraitements

Tableau 7 : Détail des projets qui sont en cours dans les différents instituts (RECORD, 2022)

Nom du projet	Date projet	Titre du projet	Financier	Partenaires
SAM	2015-2017	SAM - Stockage de la matière avant méthanisation	ADEME-DOSTE	INSA Lyon - Labo. DEEP, APESA
PAM	2017-2020	PAM - Prétraitement de la matière avant méthanisation	ADEME-GRAINE	INSA Lyon - Labo. DEEP, NOREMAT, ENSAIA
EQUIMETHA	2018-2019	Méthanisation de fumiers équins: application de prétraitement thermo-chimique	FEDER Région N. Aquitaine	APESA, Univ. Griffith
STOCKACTIF	2012-2016	Stockage actif de la biomasse pour faciliter sa transformation industrielle	ANR	INRAE (FARE, BCF, LBE, IATE), Solagro, Vivescia, Envolure
BFF	2020	Biomass For Future	ANR (PIA)	INRAE-LBE
METHAPLAST	2021-2023	Méthanisation de plastiques biodégradables: impact de prétraitements	ADEME-GRAINE	RITTMO, IRMA, APESA, SARIA
VALERORIS	2018-2019	Valorisation écoefficiente des sous-produits des IAA : extraction de biomolécules et production d'énergie	Carnot 3BCAR	INRAE-LBE
OPTICIVE		Optimisation de la mobilisation de cive pour la méthanisation dans les systèmes d'exploitation	ADEME - GRAINE	EURALIS, GIE GAO (l'interprofession des huiles et protéines végétales, Terres Univia, et deux instituts techniques, Arvalis et Terres Inovia)
RECITAL		Capitaliser et valoriser les informations sur les Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique	ADEME-GRAINE	Arvalis, Cavac, Euralis, Aile, AMF, Oxyane, Engie
BIOGAZ RIO	2020-2022	Biogaz Recherche Innovation en Occitanie	FEDER Région occitanie	INRAE-LBE
WINSEAFUEL	2010-2013	Production de macroalgues pour une valorisation en biométhane et autres bioproducts	ANR	INRAE-LBE
ADAW	2012-2015	Saponification pre-treatment and biosensors based control system for slaughterhouse waste anaerobic digestion improvement	SME FP7	INRAE-LBE
PEACE	2012-2013	Effet d'un prétraitement thermochimique et mécanique de la paille de blé sur ses performances pour les conversions en bio-éthanol et méthane	Carnot 3BCAR	INRAE-LBE
URBANBIOM	2018-2021	UrbanBiom - Orientation et prétraitement des Biodéchets en territoire Urbain pour leur valorisation énergétique par conversion biologique et/ou thermochimique en Méthane destiné à l'injection en réseau	ADEME - GRAINE	PROVADEMSE, INSA Lyon - Labo. DEEP, GRDF, IRCELYON, Métropole de Lyon
PETIOLE	2013-2016	PrETraitements bIOlogiques des substrats LignocEllulosique	ADEME-DOSTE	INRAE-OPAAL, LUBEM
METHACHAMP	2011-2013	Prétraitement biologique des substrats lignocellulosique en vue de leur utilisation en méthanisation, utilisation de champignons lignolytiques	ADEME-DOSTE	INRAE-OPAAL
RESIMETHA	2014-2017	Méthanisation par voie sèche à la ferme de résidus de cultures	ADEME-DOSTE	INRAE-OPAAL, ARVALIS, Gaec Bois Joly
Bioptime	2007-2011	Programme de recherche sur la préparation des déchets pour l'optimisation de la biodégradation par méthanisation des déchets ménagers et assimilés	ANR	Veri, INRAE-PROSE, IMFT, LSEE, LIRIGM, LIPE
Save	2021-2022	Valorisation agro-énergétique des Sargasses – SAVE	ANR	Ensaia, INRAE URZ, SOMARA, LAE

Dans la Figure 17, les projets ont été regroupés par catégories de gisements. On remarque que la plupart des projets au même titre que les thèses ont tourné autour des biomasses lignocellulosiques et résidus agricoles. Parmi ces projets, certains ont concerné les CIVEs (Recital, Opticive), d'autres les déchets agricoles (SAM, PAM, Equimetha, Stockactif...) et les résidus de cultures (Peace, Résiméthà, Methachamp, Petiole). Les projets SAM et PAM ont portés sur l'étude des technologies de stockage et de prétraitement de la matière avant méthanisation. Ces deux projets ont été coordonnés par l'INSA de Lyon. Les projets RECITAL et OPTICIVE coordonnés par ARVALIS ont porté en partie sur l'utilisation et le stockage des CIVEs avant méthanisation. Le projet Stockactif coordonné par l'INRAE-LBE et les projets PETIOLE et METHACHAMP coordonnés par l'INRAE-OPAAL ont porté sur l'application de prétraitements biologiques.

A noter l'intérêt scientifique aussi sur la thématique des biodéchets avec trois projets en cours. Parmi eux, le projet METHAPLAST (en cours) coordonné par RITTMO abordera notamment la gestion des plastiques biodégradables dans des filières de méthanisation de biodéchets. Une attention particulière sera faite sur l'utilisation de prétraitements (mécanique, biologique, thermo-chimique) afin d'améliorer la biodégradabilité de différents grades commerciaux de plastiques biodégradables.

Finalement, les algues et les déchets d'IAA sont aussi étudiés. Le projet ANR SAVE (en cours) coordonné par l'ENSAIA étudiera la valorisation des sargasses en filière méthanisation. Un focus particulier sera fait à délimiter les zones de collecte de Sargasses, et de définir les procédés de conservation stabilisés des algues récoltées sous deux formes, séchées et ensilées, dans des conditions sanitaires contrôlées.

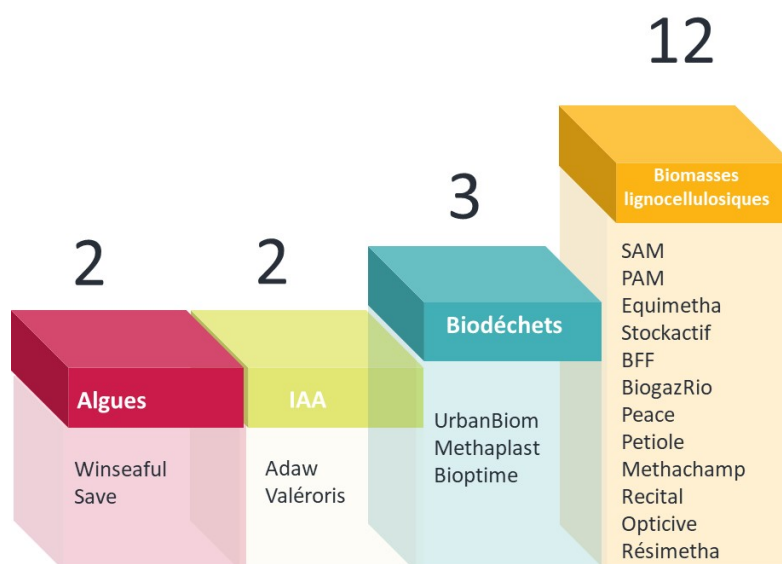


Figure 17 : Les projets autour du stockage et du prétraitement de la matière avant méthanisation par catégories de biomasses et gisements (RECORD, 2022)

Enfin la Figure 18 représente les principaux financeurs de ces projets R&D. Une grande majorité de ces projets ont été financée par l'ADEME via les programmes DOSTE (4 projets) et GRAINE (5 projets). Les autres sources de financement proviennent de l'ANR, de l'Europe (via les fonds FEDER ou FP7) et de l'institut Carnot 3 BCAR (<https://3bcar.fr/>).

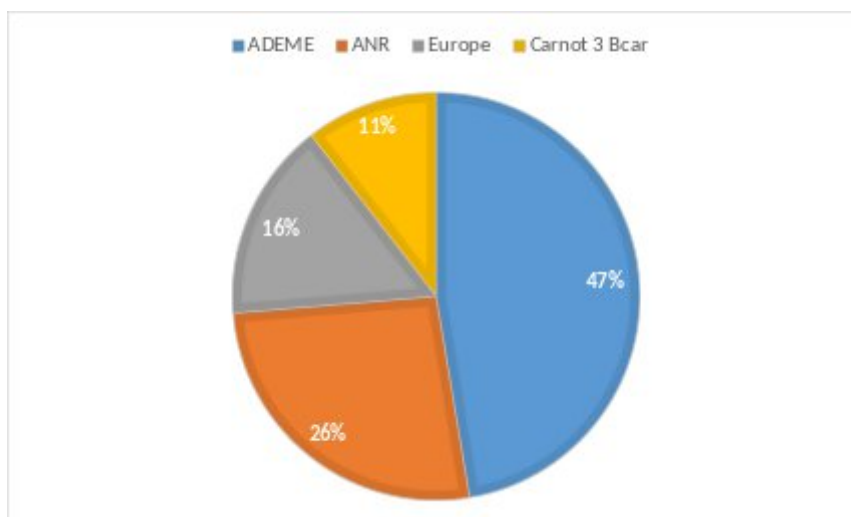


Figure 18 : Les financeurs des projets R&D (RECORD, 2022)

Note :

En parallèle des membres du CTBM, les acteurs industriels majeurs de la méthanisation (SUEZ, VEOLIA, GRDF, AIR LIQUIDE, ENGIE, TOTAL ENERGIES) ont été contacté. Seul GRDF et AIR LIQUIDE nous ont fait remonter des travaux sur la thématique du stockage et du prétraitement de la matière avec les thèses notamment de Clément Van Vlierberghe et de Ulysse Brémond. Toutefois, cela ne signifie pas que les autres industriels ne travaillent pas sur la thématique.

2.3.2. Niveau International

Sur **Web of Science**, nous avons fait un recensement des ouvrages scientifiques sur la période 2000-2021. Sur cette période il a été recensé en tout 5923 ouvrages (en date du 19/05/2021). Sur la Figure 19, on observe une activité exponentielle (courbe de modélisation) de recherche scientifique sur le sujet. Seulement sur l'année 2020, plus de 964 ouvrages ont été publiés.

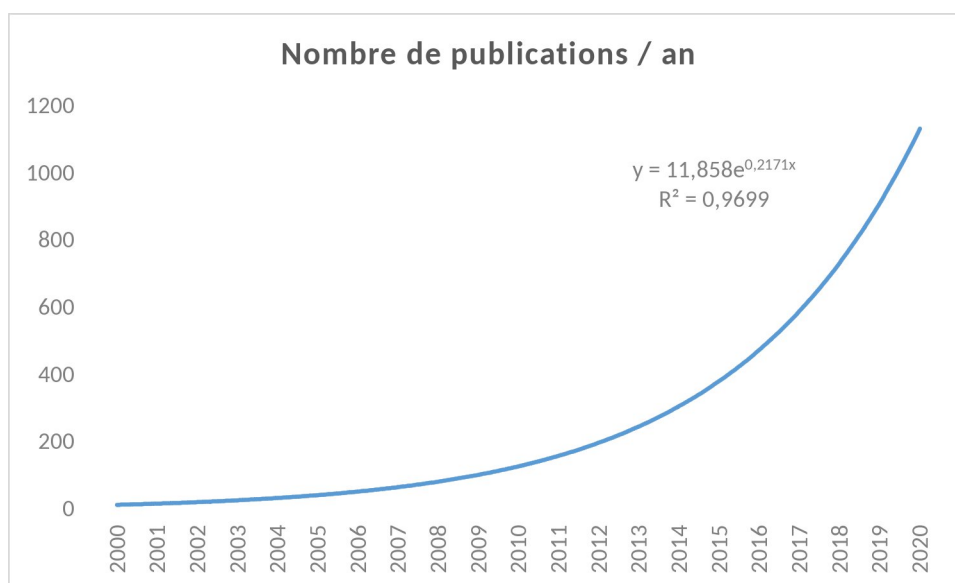


Figure 19 : Nombre de publications sur le sujet prétraitement et méthanisation publiées ces dernières années 2000-2021 (RECORD, 2022)

Les documents publiés sur les années 2000-2021 concernent majoritairement des articles scientifiques, des proceedings de conférences et des review bibliographique (Figure 20). En effet sur cette période, on recense 5208 articles, 523 proceedings et 433 revue bibliographiques.

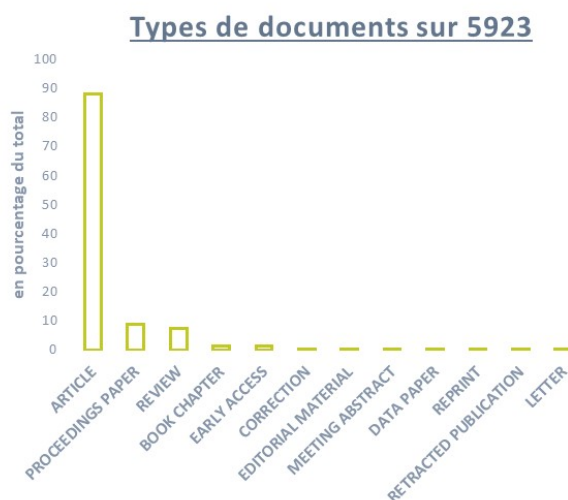


Figure 20 : Typologies d’ouvrages sur le sujet prétraitement et méthanisation publiés ces dernières années 2000-2021 (RECORD, 2022)

La Figure 21 regroupe les principaux instituts et centres de recherche travaillant sur la thématique du prétraitement de la matière avant méthanisation. Excepté l’INRAE et le Technical University of Denmark, l’intégralité des autres centres sont d’origine asiatique. Cette tendance n’est pas propre à cette thématique mais reflète une augmentation de la capacité des centres asiatiques dans le domaine de la recherche scientifique et de sa valorisation dans des journaux à comité de lecture International.

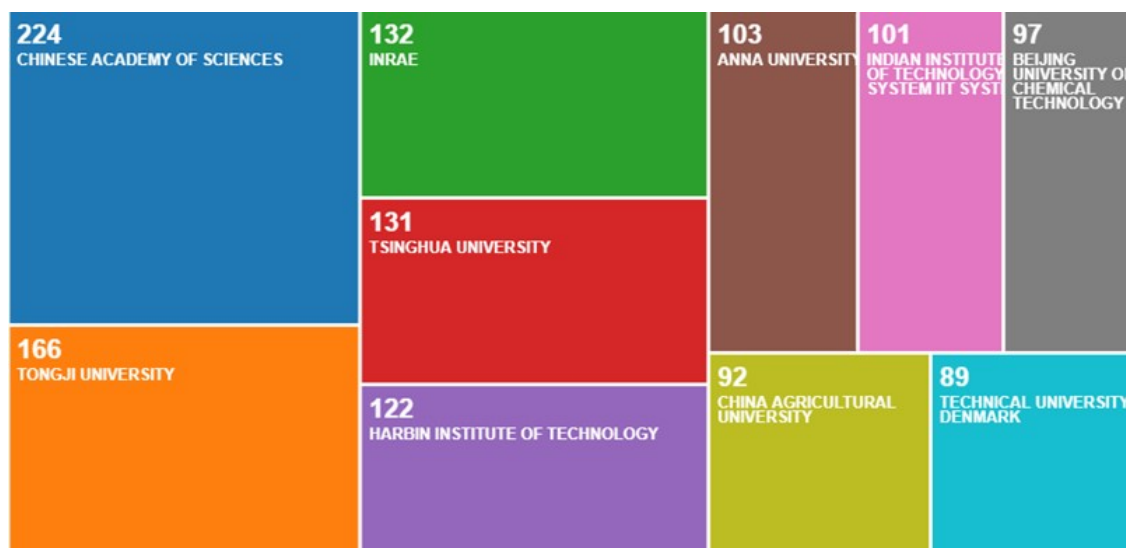


Figure 21 : Organisations publiant le plus sur le sujet prétraitement et méthanisation ces dernières années 2000-2021 (RECORD, 2022)

La Figure 22 confirme cette tendance avec le pourcentage d’ouvrages réalisés sur le sujet par continent ces dernières années sur la tranche 2000-2010 et 2010-2021. Il est intéressant de noter que les pays asiatiques ont augmenté leur taux de publications sur ce sujet à l’échelle mondiale avec plus

de 59% sur la période 2010-2021. L'Europe est le second pays en terme de publications suivi par le continent Américain. Loin derrière arrivent l'Océanie et l'Afrique. Toutefois, ces tendances sont à modérer et il serait intéressant de pouvoir les pondérer au ratio de scientifiques travaillant sur la thématique par continent (données non disponibles sur Web of Science).

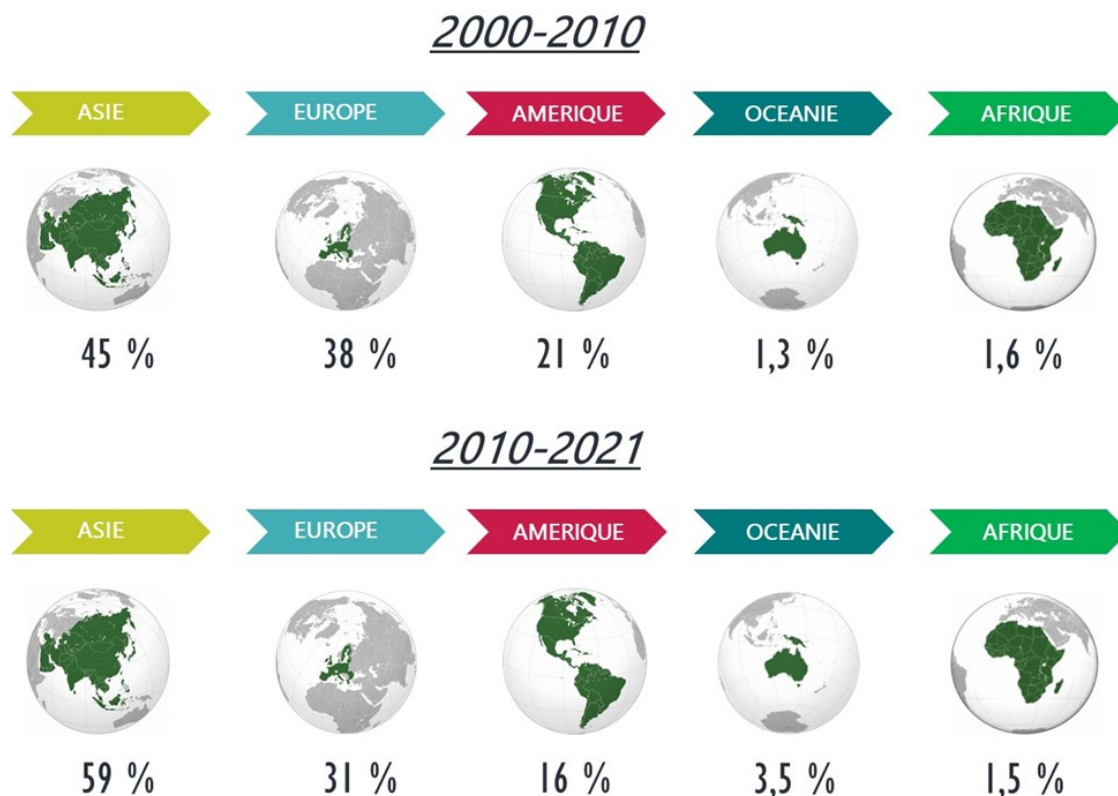


Figure 22 : Pourcentage d'ouvrages réalisés sur le sujet par continents ces dernières années sur la tranche 2000-2010 et 2010-2021 (RECORD, 2022)

La Figure 23 présente le nombre de publications dans le domaine scientifique sur les périodes 2000-2010 et 2010-2021. Il est intéressant de noter la forte progression de papiers sur ces deux périodes avec 612 documents sur la période 2000-2010 et 5456 sur la période 2010-2021. Ceci témoigne d'un intérêt croissant de la communauté scientifique sur la thématique des prétraitements de la biomasse avant méthanisation. La Chine reste le pays qui publie le plus sur ces deux périodes, suivi des Etats-Unis. La France se situe en troisième position sur la période 2000-2010 et chute à la onzième place sur la période 2010-2021.

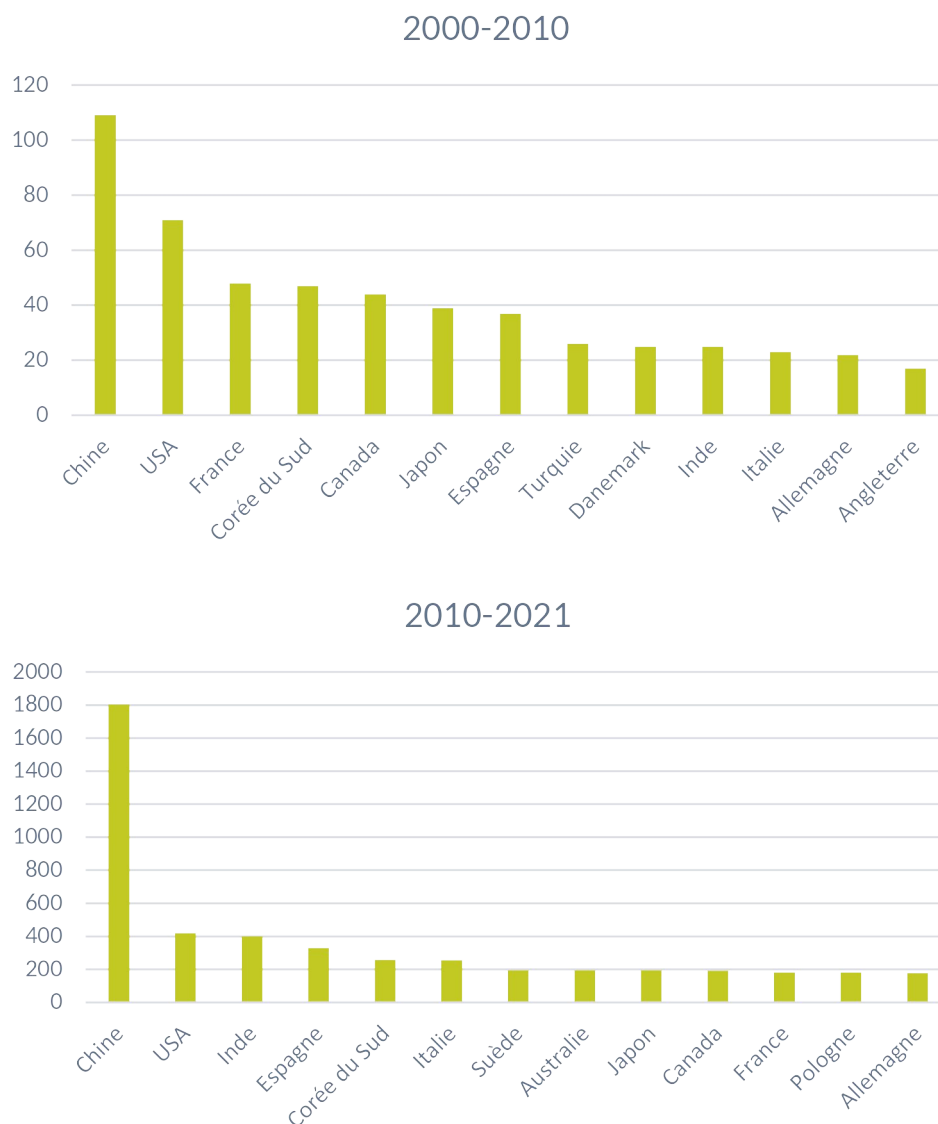


Figure 23 : Nombre d'ouvrages réalisés par pays sur la tranche 2000-2010 et 2010-2021 (RECORD, 2022)

Finalement, la Figure 24 représente les dix premiers auteurs ayant le plus publié dans le domaine scientifique sur les périodes 2000-2010 et 2010-2021. Sur la période 2000-2010, deux auteurs proviennent du LBE, à savoir Hélène Carrère (<https://www.researchgate.net/profile/Helene-Carrere>) et Jean Philippe Delgenès. La plupart des autres auteurs viennent du Canada ou de l'Europe. Sur la période 2010-2021, seuls deux chercheurs européens restent dans le top 10, à savoir Hélène Carrère (INRAE-LBE) et MJ Taherzadeh (Université de Boras, Suède). Hélène Carrère se place en quatrième position avec 61 papiers sur la période 2010-2021 contre 17 papiers sur la période 2000-2010.

(2000-2010)



(2010-2021)

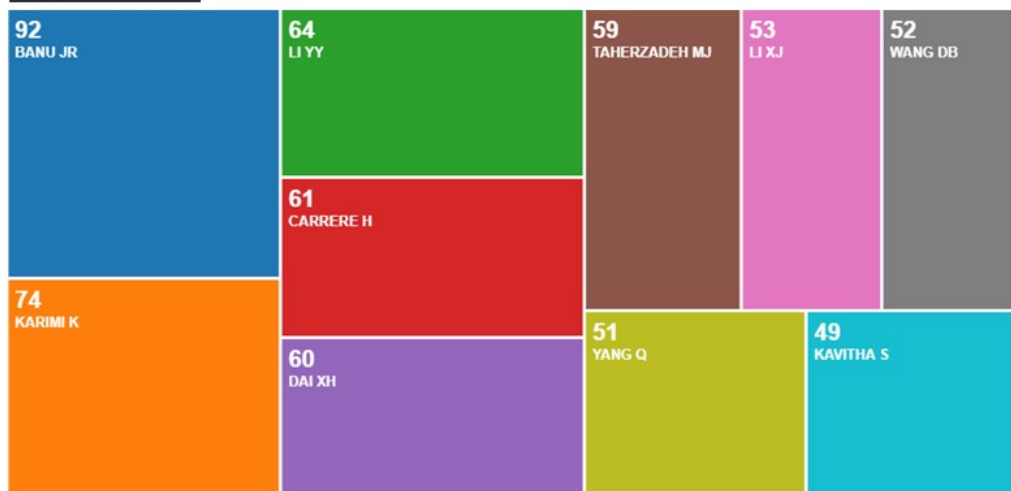


Figure 24 : Auteurs ayant le plus publié sur le sujet sur la tranche 2000-2010 et 2010-2021 (RECORD, 2022)

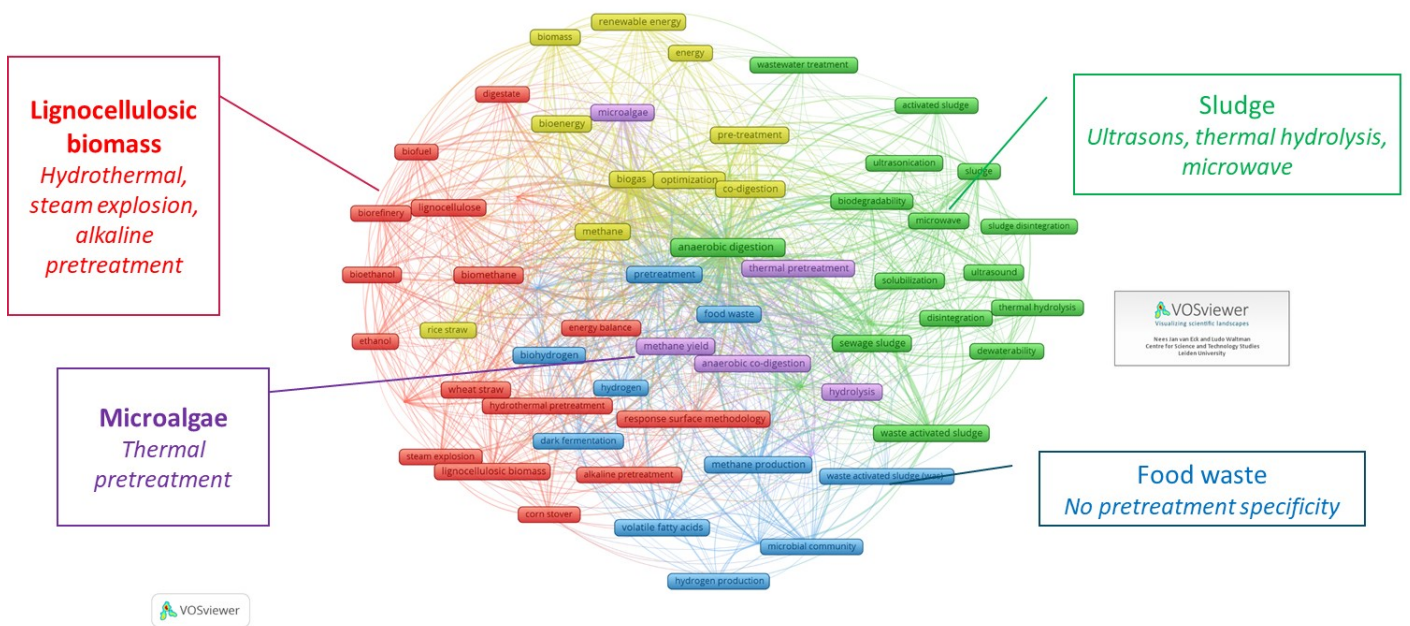


Figure 25 : Mapping sur VOS VIEWER des keywords cités au moins 50 fois dans le pool des 5923 ouvrages. Visualisation des interactions entre les keywords (RECORD, 2022)

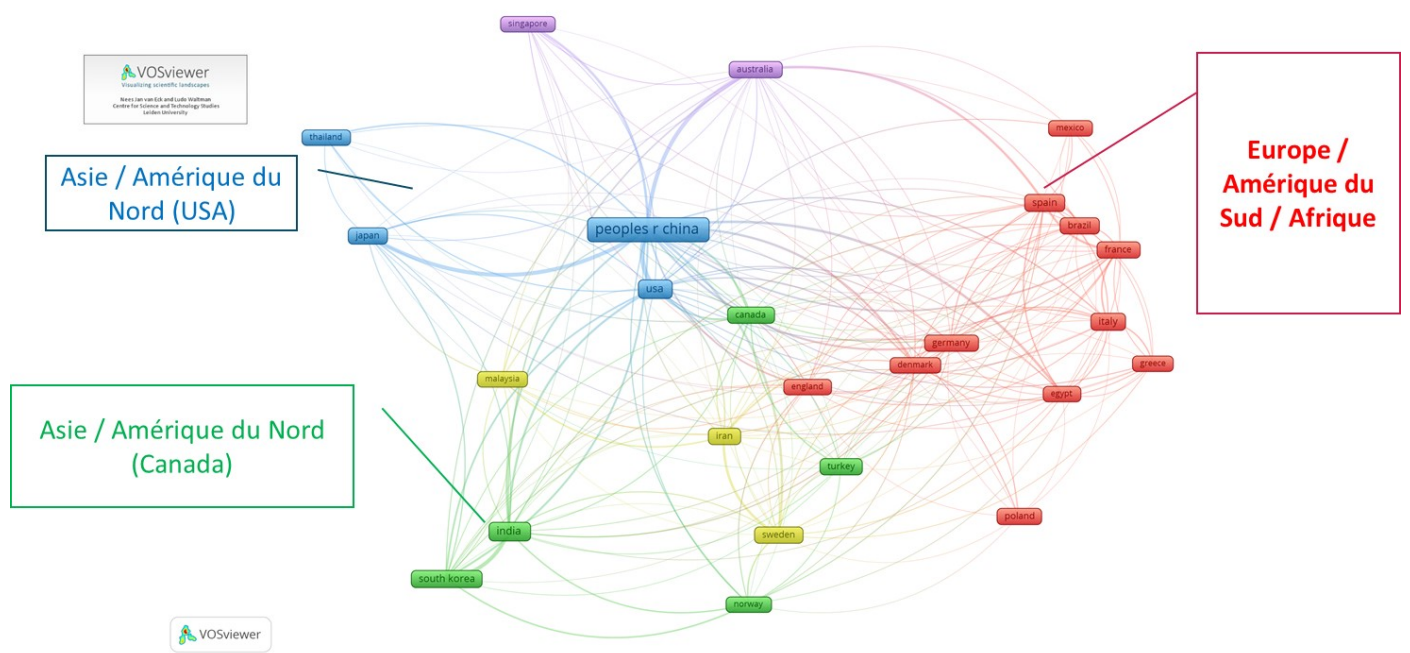


Figure 26 : Mapping sur VOS VIEWER des pays ayant au moins 80 publications dans le pool des 5923 ouvrages. Visualisation des interactions entre les pays (RECORD, 2022)

En Figure 24 et 25, un mapping des mots clés « keywords » et des interactions entre les pays publiant le plus sur le sujet du prétraitement et de la méthanisation est fourni.

La Figure 24 est intéressante car elle permet d'identifier différents clusters sur les mots clés. En effet, les biomasses lignocellulosiques sont associées aux prétraitements alcalins et thermiques,

l'explosion à la vapeur. Les microalgues sont associées aux prétraitements thermiques alors que les boues sont associées aux prétraitements par ultrasons, thermiques et micro-ondes. En revanche les biodéchets ne sont pas associés à une technologie de prétraitement particulière. Cette cartographie permet de visualiser les tendances de recherche de ces dernières années (2000-2021). Il est intéressant de remarquer que certaines technologies comme les ultrasons et les prétraitements thermiques étudiés à l'échelle laboratoire sont aujourd'hui appliqués à l'échelle industrielle.

La Figure 25 dégage 3 clusters bien distincts identifiés par des codes couleurs. La Chine collabore majoritairement avec le Japon et les Etats-Unis sur ce sujet. Un certain nombre de pays Européens (France, Espagne, Italie, Allemagne...) collaborent avec des pays d'Amérique du Sud (Brésil, Mexique...) ainsi que l'Afrique. Finalement, l'Inde et la Corée du Sud collaborent majoritairement avec le Canada, la Norvège et la Turquie.

2.4. Application de solution de stockage et de prétraitements afin de conserver ou améliorer le pouvoir méthanogène

Dans la suite du rapport, nous nous sommes intéressés à faire un recensement de la littérature Internationale et Nationale sur l'application de technologies de stockage et/ou prétraitement afin d'améliorer le rendement en méthane.

Les résultats sont présentés **par catégories de biomasses** et un focus particulier a été réalisé sur les gisements suivants:

- Boues ;
- Biodéchets (nous avons aussi fait un focus sur les plastiques biodégradables car l'obligation de collecte sélective des biodéchets à l'horizon 2023 risque d'amener des flux de plastiques biodégradables notamment via les sacs de collecte).;
- Graisses ;
- Biomasses lignocellulosiques facilement biodégradables ;
- Biomasses lignocellulosiques plus difficilement biodégradables ;
- Algues (incluant microalgues, cyanobactéries et macroalgues).

La quantité de données bibliographiques étant très importante (cf. chapitre précédent) plusieurs hypothèses ont été prises :

- Focaliser sur les prétraitements industriels et laboratoire pilotes. Dans le cas de prétraitement prometteur ne présentant pas encore d'essais laboratoires et industriels, nous avons étendu notre recherche à l'échelle du BMP (Biochemical Methane Potential) ;
- Nous avons focalisé l'étude sur les gisements mobilisables à l'horizon 2030 et 2050 et présentant un fort potentiel de développement ;
- Pour chaque solution de prétraitements, nous avons répertorié les principaux fournisseurs industriels au niveau International ;
- Pour chaque étude, nous avons essayé de récupérer l'information concernant le gain en rendement méthane ;
- Quand les données étaient disponibles, nous avons aussi fourni des informations sur les CAPEX et OPEX des solutions de prétraitements.
- Un point d'attention doit être porté à la lecture des performances des prétraitements. Les données publiées ne précisent généralement pas les pertes de matières que les prétraitements peuvent occasionner ce qui peut surestimer les performances de ces prétraitements. Une vigilance particulière sera portée aux prétraitements qui peuvent occasionner des pertes de matières notables à l'exemple des prétraitements fongiques, du pré-compostage et de l'ensilage.

2.4.1. Déjections animales

Les déjections animales (fumier, lisier, fiente) sont une ressource importante en méthanisation malgré des prévisions de production à la baisse liées à la diminution de l'élevage. Ces matières peuvent présenter certaines difficultés pour leur stockage et leur traitement en méthanisation en raison de leur caractère fermentescible, de leur hétérogénéité et de la présence de ligno-cellulose pour les fumiers pailleux. Les stratégies de stockage et prétraitements sont présentées ci-après.

2.4.1.1. Stockage et approvisionnement (Peyrelasse C. et al., 2017)

Le projet SAM avait permis d'identifier des leviers pour limiter les pertes de matière organique et de potentiel méthanogène des fumiers et lisiers.

La limitation des entrées d'air dans les tas de fumier permet d'améliorer la conservation de la matière. Les manipulations doivent être réduites au minimum lors de sa collecte et du transport. En cas de broyage, celui-ci sera réalisé juste avant son introduction dans le méthaniseur. Le fumier sera à minima sous abri pour le protéger des eaux de pluies. Le stockage aérobique conduit à des pertes élevées de production de méthane. Teixeira Franco (2018) avait ainsi mesuré des pertes de 74% après 4 mois de stockage de fumier bovin frais alors que ces pertes étaient de 37% à 46% après 4 mois de stockage en mode confiné. Le risque d'auto-combustion du fumier pouvant conduire à un incendie doit être contrôlé pendant ce stockage. Depuis le mois de juin 2021, la réglementation impose un contrôle de température des stockages d'intrants solides à différents points du tas pour prévenir les phénomènes d'auto-échauffement (feux couvant et émission de monoxyde de carbone) (Arrêté du 14 juin 2021; Arrêté du 17 juin 2021).

Les arrêtés du 27 décembre 2013 précisent les obligations réglementaires des activités d'élevage visés par la réglementation ICPE sous le régime de la déclaration, de l'enregistrement et de l'autorisation. Cet arrêté précise que les fientes de volaille comportant plus de 65 % de matière sèche peuvent être stockées, hors zone vulnérable aux pollutions par les nitrates, sur une parcelle d'épandage dans des conditions précisées par le préfet et figurant dans l'arrêté d'autorisation de l'élevage. Elles doivent être couvertes par une bâche imperméable à l'eau mais perméable aux gaz.

Les cuves ou fosses de stockage des lisiers doivent être conçues pour permettre l'évacuation complète de la matière afin d'éliminer les matières en suspension qui sont une source de développement bactérien à l'origine des pertes de méthane. Une conception en pointe de diamant est idéale pour les lisiers qui décantent rapidement à l'exemple des lisiers de canard. Une agitation du stockage est nécessaire pour homogénéiser le lisier avant son introduction dans le méthaniseur. La couverture permet de limiter les odeurs, la volatilisation de l'azote et la dilution avec les eaux de pluies. Les Meilleures Techniques Disponibles (MTD) pour l'élevage intensif de porcs et de volailles recommandent pour limiter les émissions liées au stockage de couvrir le lisier, réduire au maximum l'agitation, acidifier le lisier (UE, 2017).

La durée du stockage sera réduite au minimum et ne devra pas dépasser 1 ou 2 semaines pour conserver le potentiel méthanogène de la matière. Il existe aujourd'hui des systèmes de couvertures adaptés à la récupération/valorisation du biogaz produit pendant le stockage à l'exemple des couvertures développées par la PME française Nénufar ou le procédé MCube (Ovalie Innovation).

Les opérateurs devront être protégés vis-à-vis des émissions de gaz, et en particulier NH_3 et H_2S . Des additifs existent pour le lisier afin de réduire les émissions d'hydrogène sulfuré (H_2S) et d'ammoniac (NH_3) pendant stockage. FCSI (Danemark) commercialise le produit ACTIVE NS composé d'argiles prétraitées. Des consortiums bactériens aérobies/anaérobies facultatifs sont commercialisés par HTS Bio (France). Il s'agit du produit GLOBALFAC® (version optimisée de la combinaison AZOFAC® plus ACTIFAC®) qui intègre également un complexe de nutriments et d'oligoéléments pour stimuler l'action des micro-organismes. Les avantages avancés par le fournisseur sont d'augmenter la liquéfaction du lisier et de réduire très fortement les émissions de gaz, jusqu'à 80% pour l'ammoniac et jusqu'à 90% pour l'hydrogène sulfuré (H_2S) (HTS BIO, 2018).

Le lisier présente un taux de MS faible et représente par conséquent des volumes élevés avec un faible potentiel méthanogène. Un traitement à proximité de son site de production est recommandé pour limiter le transport.

2.4.1.2. Prétraitement et préparation de la ration

Le broyage des fumiers est une option étudiée pour les sites équipés de digesteur en voie sèche continue ou infiniment mélangé. Il a pour objectif d'homogénéiser la matière, accélérer sa biodégradation et sécuriser le fonctionnement des unités en limitant les bouchages et les contraintes sur les pâles d'agitation. Les travaux réalisés dans le cadre du projet PAM financé par l'ADEME ont montré que les broyeurs à chaînes ou à marteaux étaient les plus efficaces pour déstructurer les fibres (Bayard et al., 2019). Ils sont généralement adaptés aux mélanges très pailleux ou riches en fibres végétales et permettent d'améliorer les cinétiques de dégradation et dans une moindre mesure la production de méthane (Bayard et al., 2019). Ce broyage permet aussi de limiter les risques de flottaison des fibres dans les digesteurs infiniment mélangés.

Une incorporation directe de la matière est toutefois proposée par certains constructeurs, le temps de séjour dans les digesteurs doit être adapté à la cinétique de dégradation de produits non broyés. Ceci impactera le choix des agitateurs afin de ne pas générer des problèmes de flottation de la matière. Le risque de bouchage des tuyauteries sera pris en compte.

Un pré-compostage est intéressant en amont de la digestion en voie sèche discontinue pour augmenter la température des matières. Ceci permet de réduire l'énergie nécessaire au chauffage de la matière en digestion et d'hydrolyser la matière difficilement biodégradable telle que le fumier pailleux. Cette pratique peut en revanche dégrader une partie de la matière organique réduisant les performances de la digestion anaérobie si sa durée est trop longue. Cette durée sera adaptée aux conditions extérieures (saison, température), aux conditions de pré-compostage (aération, mélange, aspersion ou non de la matière, humidité du tas) et à la cinétique de dégradation de la matière. Ce prétraitement est appliqué sur plusieurs sites agricoles. Peu de données de performances chiffrées sont toutefois publiées.

La description détaillée des prétraitements applicables aux matières lignocellulosiques telles que les fumiers pailleux est disponible au §2.4.2.

Les lisiers et fientes présentent des ratio C/N faibles, ils peuvent être traités en co-digestion pour optimiser la dégradation de la matière et éviter des inhibitions à l'azote en digestion.

2.4.2. Résidus agricoles et productions végétales

Les biomasses lignocellulosiques représentent une ressource facilement disponible pour la méthanisation (fumiers pailleux, résidus de culture, cultures énergétiques, tontes de pelouse...). Leur gestion diffère selon que les biomasses sont facilement ou difficilement biodégradables de par leur teneur en lignine.

2.4.2.1. Approvisionnement et stockage

Une attention particulière doit être portée lors de la récolte et du stockage pour limiter la présence d'indésirables et bien conserver la matière.

Les biomasses facilement biodégradables : herbe, cultures énergétiques

Un compromis doit être trouvé entre le tonnage de culture énergétique (CIVE, CIMS) produite et sa biodégradabilité (choix de l'espèce et de la période de récolte). La plante non mature est ainsi plus facile à biodégrader mais produit des rendements limités. Denis Ollivier, ancien expert de Trame, souligne le fait que certaines espèces permettent d'obtenir de bons rendements à l'ha, à l'exemple du triticale et du seigle, leur défibrage est en revanche difficile et limite leur biodégradabilité (Ollivier, 2021). Au contraire, l'orge immature produit des rendements plus faibles à l'ha mais est plus facile à biodégrader (Ollivier, 2021). Pour une méthanisation des CIVE en digesteur infiniment mélangé, il sera intéressant de privilégier un hachage en brins courts lors du réglage de l'ensileuse afin de favoriser la biodégradation de la matière (Ollivier 2016).

La production saisonnière des CIVE nécessite de mettre en place un stockage avant introduction dans le méthaniseur. Le stockage par ensilage est largement utilisé. Cette technique de conservation est parfois considérée comme un prétraitement biologique de la matière aussi est-elle présentée dans le § prétraitement biologique. La société PlanET (Allemagne), constructeur de méthaniseurs, recommande d'attendre à minima 4 semaines après l'ensilage pour introduire la matière afin de prévenir le risque d'acidose (PlanET). Le pH de la ration devra être contrôlé lors de l'introduction de la matière ensilée et des jus d'ensilage pour ne pas déséquilibrer la biologie.

Concernant les fauches de bord de route, l'étude CARMEN avait conclu que le ramassage des déchets présents sur les bords de route est nécessaire avant la fauche pour protéger l'outil de fauche (broyeurs à herbes) et les systèmes d'incorporation mais aussi pour assurer une bonne qualité du digestat destiné à un retour au sol (Zdanevitch et al., 2018). La fauche ne doit pas être réalisée trop près du sol afin de limiter la quantité de terre ramassée avec les herbes (Zdanevitch et al., 2018).

Les biomasses difficilement biodégradables : paille, cannes de maïs...

Les végétaux secs (menues pailles, paille, résidus de récolte de culture sèche) doivent être stockés sous abri pour protéger la biomasse, ne pas diminuer le taux de MS avec les eaux de pluies et limiter le développement de microorganismes produisant des mycotoxines (Peyrelasse C. et al., 2017; PlanET).

Les biomasses présentant un taux de MS compris entre 40 et 80% de MS (canne de maïs et résidus de récolte qui auraient repris de l'humidité par exemple) présentent un risque d'auto-inflammation (Peyrelasse C. et al., 2017). Depuis le mois de juin 2021, la réglementation impose un contrôle de température des stockages d'intrants solides à différents points du tas pour prévenir les phénomènes d'auto-échauffement (feux couvant et émission de monoxyde de carbone) (Arrêté du 14 juin 2021; Arrêté du 17 juin 2021).

2.4.2.2. Prétraitement et préparation de la ration

Les constituants de la biomasse lignocellulosique sont essentiellement des glucides, pectines, protéines, lignines, terpènes, stéroïdes, tannins, cutines, subérines et cires. Ils participent à la structure très complexe de la biomasse lignocellulosique (Kpogbemabou, 2011). Les trois polymères de cellulose, d'hémicellulose et de lignine sont en particulier étroitement associés dans les parois des cellules végétales. La biodégradabilité de ces substrats est limitée (Ahring et al., 2015) par la présence de lignine qui réduit l'accès aux polysaccharides (Monlau et al., 2013).

Des prétraitements peuvent être utilisés pour déstructurer la matière afin d'améliorer l'accessibilité de la cellulose, des hémicelluloses et des polymères de glucose aux bactéries méthanogènes (Figure 27).

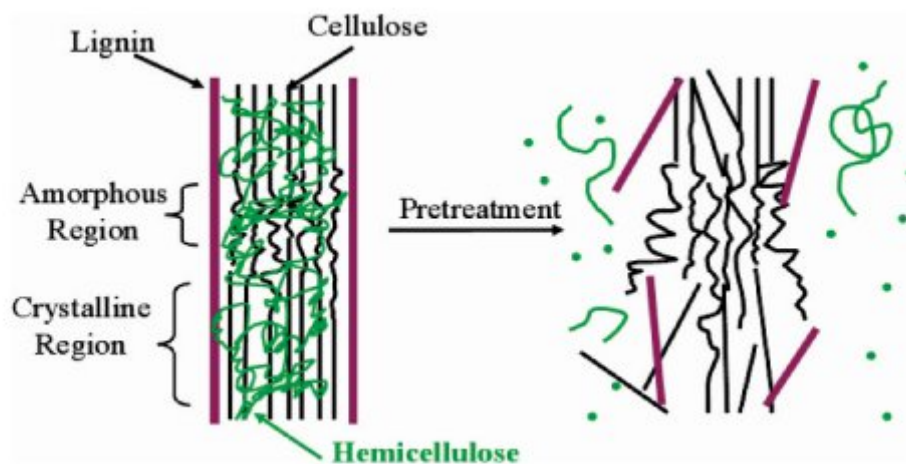


Figure 27 : décomposition de la lignocellulose sous l'effet d'un prétraitement (Schwietzke et al., 2009) adapté de (Hsu, 1980; Mosier et al., 2005).

Différents objectifs sont visés pour ces prétraitements (Carrere et al., 2016; Ramos-Suarez et al., 2017) :

- la délignification de la matière : rupture des liaisons lignines-carbohydrates,
- la réduction de la cristallinité de la cellulose,
- l'augmentation de la porosité (surface spécifique accessible) pour faciliter le contact entre la matière à dégrader et les microorganismes/enzymes.

D'autres bénéfices sont attendus au niveau du comportement de la matière dans le digesteur et en particulier la diminution de la viscosité du digestat (et donc de l'énergie nécessaire à l'agitation) et de la flottation de la matière.

Différents prétraitements existent :

- mécanique à l'exemple du broyage et de l'extrusion,
- physique de type micro-ondes et ultrasons,
- thermique : basse et haute température (explosion à la vapeur, hydrolyse thermique) en couplage ou non avec un agent chimique : alcalin (soude, chaux...), acide, ozone, peroxyde,
- biologique : bactéries et champignons (Zhong et al., 2011), enzymes bactériennes et fongiques (Brémond et al., 2018; Sambusiti et al., 2015).

Ces différents prétraitements appliqués aux matrices lignocellulosiques sont présentés ci-après.

Prétraitements mécaniques : broyage, extrusion

Le broyage

Les constructeurs d'unité de méthanisation proposent pour les unités de méthanisation en voie sèche continue ou infiniment mélangé soit :

- Une incorporation directe,
- Un prétraitement incluant un système de broyage.

L'incorporation directe permet de limiter les coûts d'investissement et de fonctionnement liés au prétraitement (énergie, renouvellement des pièces). Les temps de séjour dans les digesteurs doivent, par conséquent, être suffisants pour dégrader la matière.

Le broyage de la matière permet de faciliter son introduction, son mélange et réduit la durée nécessaire à sa biodégradation. Il sécurise le fonctionnement des unités en limitant les bouchages, les phénomènes de croûtage dans le digesteur et les contraintes sur les pâles d'agitation en raison de la diminution de la viscosité du digestat. La société Vogelsang recommande de mettre en place un broyeur dès lors que la longueur des fibres ou la granulométrie de la matière est supérieure à 6 cm (Eberlein, 2021).

De nombreux systèmes de broyeurs sont commercialisés et en particulier les broyeurs à couteaux, à chaînes, à marteaux ainsi que des pompes dilacératrices. Les travaux réalisés dans le cadre du projet PAM financé par l'ADEME ont montré que les broyeurs à chaînes ou à marteaux étaient les plus efficaces pour déstructurer les fibres (Bayard et al., 2019). Ils sont généralement adaptés aux mélanges très pailleux ou riches en fibres végétales et permettent d'améliorer les cinétiques de dégradation et dans une moindre mesure la production de méthane (+10 à +15%) (Bayard et al., 2019). Une autre des conclusions de cette étude concernait les matières moins riches en fibres. Elles peuvent être prétraitées par des broyeurs à couteaux qui sont toutefois, parfois fragiles (Bayard et al., 2019).

Sont présentés ci-après les principaux broyeurs mis en œuvre pour les unités de méthanisation.

La société allemande Vogelsang produit et commercialise des broyeurs pour le prétraitement des matières avant méthanisation en infiniment mélangé. La filiale française créée en 2005 est basée à la périphérie de Montélimar dans la Drôme. Le broyeur à couteaux RotaCut est largement utilisé pour réduire la taille des fibres avant introduction dans les méthaniseurs, plus de 200 unités ont été installées en France (Eberlein, 2021). Le RotaCut fonctionne en voie humide par mélange de la matière fibreuse avec un intrant liquide ou une recirculation du digestat. Le taux de MS visé en sortie pour la suspension organique alimentant le digesteur est de 12%. Différentes grilles de coupe sont disponibles dans la plage de 4 à 50 mm (Vogelsang), les grilles de 12 mm sont installées pour les matières devant être hygiénisées. Le RotaCut est intégré dans un système d'alimentation complet dit PreMix (Figure 28).

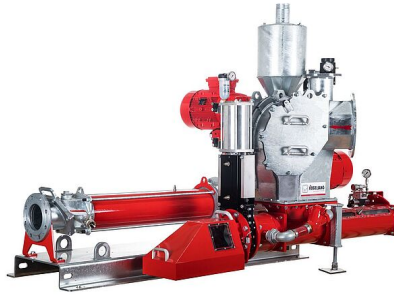


Figure 28 : Photo d'un système Premix de Vogelsang (Vogelsang, 2022)

Ce système intègre, en complément du RotaCut, un piège à cailloux pour éliminer les lourds et une pompe volumétrique. Un PreMix peut alimenter plusieurs digesteurs. La puissance installée est de 20 à 40 kW (selon le modèle) pour des débits de 30 à plus de 100 m³/h (Vogelsang).

Le modèle XRIPPER de Vogelsang, broyeur à couteaux fonctionnant à sec, sera utilisé pour le broyage de matières non fibreuses telles que les déchets de cantine, résidus de fruits et légumes (pommes de terre, betteraves, choux fleurs...) et déchets animaux de type carcasses (Eberlein, 2021).

La société Landia (Danemark) a développé et breveté un procédé d'agitation externe par recirculation du biogaz et du digestat. Une pompe dilacératrice, équipée de couteaux pour hacher la matière, assure la circulation du digestat (du bas vers le haut) et la recirculation du biogaz par effet venturi (Figure 29).



Figure 29 : Illustration du fonctionnement du procédé GasMix de Landia (Landia, 2014)

L'extrusion

L'extrusion est réalisée par écrasement de la matière entre deux vis hélicoïdales afin d'éclater les cellules grâce à des contraintes répétées de pressions et à l'augmentation de la température de la matière (LMEngineering GmbH; Peyrelasse C. et al., 2017). L'accessibilité de la matière est améliorée permettant d'augmenter la production de méthane. LMEngineering GmbH annonce des augmentations de production comprises entre 14% (ensilage de maïs) et 70% (miscanthus) (LMEngineering GmbH). Des mesures de BMP ont été réalisées après extrusion sur de la paille et de la litière accumulée par l'université d'Aarhus au Danemark (Wahid et al., 2015). Les résultats ont montré une augmentation de la production de méthane de 4 à 29%, selon la configuration de l'extrudeur testée et la matière, après 29 jours de dégradation en réacteur batch. Le bénéfice du prétraitement diminue lorsque la durée de dégradation est prolongée jusqu'à 60 jours (-2 à 16%) (Wahid et al., 2015). La consommation énergétique d'un extrudeur Lehmann (MSZ B 110e) a été annoncée à 10 kWh/tonne pour le traitement de 1,5 tonne/h de matière (Wahid et al., 2015).

Environ 150 unités ont été vendues dans le monde par LMEngineering GmbH dont 9 en France, installées ou en cours d'installation (Lausmann, 2021).

Les caractéristiques des principaux procédés commerciaux de prétraitements mécaniques utilisés pour les matières lignocellulosiques sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Caractéristiques des procédés de prétraitements mécaniques appliqués aux matières lignocellulosiques (non exhaustif) (Compilation RECORD 2022)

Technologie	Principe et conditions	Applications	Références
Broyage sur recirculation du digestat			
GasMix de Landia (Danemark)	Recirculation et broyage du digestat (pompe dilacératrice) Taux de MS < 12%	Plus de 200 unités installées dans le monde	https://www.landia.co.uk/products/biogas/landia-gasmix
Host ruminator de Host (Pays Bas)	Recirculation et broyage du digestat	Méthaniseur agricole traitant du fumier et du maïs ensilage (Noyal-Chatillon près de Rennes) pour éviter la formation de croûtes et la sédimentation. Construction 2020	https://www.host.nl/fr/case/noyal-chatillon-france/
Disruptor de Vogelsang (Allemagne)	Broyeur à couteaux en escalier	Amélioration de la fluidité du digestat	https://www.vogelsang.info/fr-fr/produits/desintegration/disruptor/
Broyeurs à marteaux : broyage par percussion de la matière			
Broyeur commercialisé par Ineval (France)	2 modèles disponibles : 1 à 2 tonnes/h (18 kW) 4 à 6 tonnes/h (2 x 18 kW) Défibreux solide en continu équipé de marteaux MS visée de 20 à 30% en amont du broyage	4 unités installées sur des méthaniseurs voie sèche continue (fumier, ensilage, légumes...)	http://www.ineval.fr/portfolio/molares-2/ (Martin, 2021)
Rotacrex de Planet (Allemagne)	Défibrage Investissement de 100 à 150 000 € 2 à 5 ans de retour sur investissement	Tonnage minimal de 4000 à 5000 t/an de matières difficiles (fumier / herbe)	(PlanET, 2015)
Autres technologies de broyeurs à marteaux : BIOaccelerator z de BTS Biogas (Italie), Biogrinder de BHS-Sonthofen GmbH (Allemagne)			
Broyeurs à couteaux : coupe et cisaillement de la matière			
RotaCut® de Vogelsang (Allemagne)	Séparation des indésirables (cailloux) et broyage en voie humide	Plus de 200 unités installées en France	https://www.vogelsang.info/fr-fr/ (Eberlein, 2021)
Autres technologies de broyeurs à couteaux : Rotocrusher de Börger GmbH (Allemagne), Unihacker® de Börger GmbH (Allemagne), BIOaccelerator R de BTS Biogas (Italie), Multichopper de Börger GmbH (Allemagne) : couteaux + disques perforées			
Broyeur à chaînes			
X-chopper® de Nature Energy (Xergi) (Danemark)	Chaîne circulant dans un cylindre	Litière, paille, navet	https://natureenergy.dk/en
Bio-préparateur TQZ de THM recycling solutions (Allemagne) commercialisé par Verde Energy (France)	3 à 15 t/h selon le produit et le modèle (55, 75 et 90 kW) 8 à 10 kWh/tonne de produit Maintenance < 0,35 €/t	Substrats fibreux et pailleux, déchets végétaux, bio-déchets... Le prétraitement permettrait d'améliorer jusqu'à 30% la production de biogaz (donnée fournisseur) 800 unités installées en Europe dont une dizaine de références en France	https://www.verde-energy.fr/
Gamme Bio-QZ d'Andritz (Autriche)	3 modèles : 55 à 160 kW	Fumier, résidus végétaux, betterave ...	https://bio-qz.de/fr/bioqz_neu-fr.php
Extrudeur			
BIOaccelerator s de BTS Biogas (Italie)	Défibrage de la matière pour augmenter la cinétique de dégradation		https://bts-biogas.com/en/plants-development/

Technologie	Principe et conditions	Applications	Références
Bioextrusion de Lehmann® (Allemagne)	<p>Extrusion : écrasement de la biomasse entre deux vis hélicoïdales afin d'éclater les cellules</p> <p>Amélioration de l'accessibilité de la matière</p> <p>Augmentation de la production de méthane</p> <p>Le taux de MS cible de la matière à extruder est de 35%, une dilution peut être réalisée avec du digestat par exemple</p>	<p>150 unités installées dans le monde</p> <p>Dont 9 en France (installées ou en cours d'installation)</p> <p>Matières extrudées : matières fibreuses (maïs, végétaux, fumiers)</p>	<p>http://www.lmengineering.de/index_en.html</p> <p>(Lausmann, 2021)</p>

Weltec Biopower commercialise le MultiMix qui intègre des broyeurs du marché (Vogelsang, Boerger) dans la ligne de prétraitement MultiMix. Les unités intègrent une séparation des lourds (cailloux) et un broyage en voie humide (matières fibreuses, vinasses, résidus de légumes). Aujourd'hui, 350 unités de broyage sont installées en prétraitement des unités de méthanisation.

Prétraitements physiques : cavitation et ultrasons

Des prétraitements à ultrasons ou à cavitation (hydrodynamique) sont aussi installés pour réduire la viscosité du digestat et améliorer la digestion de la matière pour les procédés infiniment mélangé.

La technologie de cavitation brevetée Biobang® est développée par la société Italienne THREE-ES S.r.l. Plus de 150 unités ont été installées à travers l'Europe et une référence est aussi en fonctionnement en Corée. Les capacités de traitement du système s'établissent dans la gamme de 0,5 à 25 m³/h (Brambilla, 2021). L'unité de plus grande capacité (15 m³/h) est installée sur une unité de méthanisation polonaise pour le prétraitement de paille (Brambilla, 2021). Le coût d'investissement (matériel installé) est de l'ordre de 127 000 € pour une unité de 1,5 m³/h (7,5 kW/m³) et 210 000 € pour une unité de 2,5 m³/h (7,5 kW/m³) en 2018 (Biobang, 2018). Biobang annonce des coûts annuels de maintenance d'environ 2 300 € avec un maximum de 3 000 € et un retour sur investissement possible sur un an (Salon des Gas renouvelable, 2021).

Le procédé à ultrasons Biosonator est commercialisé par la société allemande Ultrawaves. Il est mis en œuvre sur les boues d'épuration urbaine et sur les unités de méthanisation traitant des substrats fibreux et difficiles à dégrader à l'exemple de l'herbe et du fumier. Le taux de MS des intrants doit être inférieur à 15% (Ultrawaves). Il est généralement positionné sur une partie du digestat du post digesteur avant renvoi dans le digesteur. Ultrawaves annonce un bénéfice de 10 à 15% sur la production de biogaz ce qui permettrait un temps de retour sur investissement de 3 à 5 ans (Ultrawaves). Une unité est en cours d'installation en France sur un méthaniseur à la ferme. Le procédé à ultrasons Biopush de Weber Entec (Allemagne) a des retours d'expérience sur des unités de méthanisation traitant des substrats difficiles à l'exemple de l'herbe. Une centaine de méthaniseurs sont équipés. Le coût d'investissement pour un méthaniseur de puissance 1 MW est d'environ 150 000 €. Le fournisseur annonce une consommation électrique correspondant à 10% de la surproduction liée aux ultrasons (Eichhorst, 2021).

Les caractéristiques de ces procédés sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Caractéristiques des procédés commerciaux de cavitation et sonication (non exhaustif)
(Compilation RECORD 2022)

Technologie	Principe et conditions	Impacts	Exemples d'applications	Références
CaviMax® de CaviMax Ltd (Angleterre)	Cavitation	Non connu		https://www.cavimax.co.uk/
Biobang® par Three-es Srl (Italie)	Cavitation	Réduction de la viscosité Augmentation de la production de méthane	Plus de 150 unités installées à travers l'Europe.	https://www.biobang.com/web/fr/biobang-fr/
ROTOCAV par E-PIC (Italie)	Cavitation	Non connu		www.epic-srl.com
Biosonator de Ultrawaves (Allemagne)	Ultrasons	Augmentation de la production de énergétique (+8 à +19%) ou diminution de la consommation de substrats (-5 à -13%) à production énergétique constante (données fournisseur) Réduction du taux de MS du digestat	Plus de 100 références en station d'épuration et méthanisation à la ferme	https://ultrawaves.de/biogas-plants/biosonator (Nickel, 2021)
Biopush de Weber Entec (Allemagne)	Ultrasons	Stabilisation de la biologie Augmentation de la production de méthane de 12-17% selon les données fournisseur Réduction de l'usure des agitateurs Réduction de la consommation d'énergie des pompes et agitateur	Une centaine d'unités ont été installées sur des sites de méthanisation L'unité de plus grande capacité peut traiter 380 m ³ /j	https://www.weber-entec.com/ (Eichhorst, 2021)

Prétraitements thermiques et chimiques

Les prétraitements acides et basiques ont été largement étudiés à l'échelle du laboratoire à température ambiante ou à des températures comprises entre 40 à 90°C. En dépit de résultats prometteurs au regard de l'augmentation de la production de méthane et des cinétiques de dégradation, les prétraitements chimiques ne sont pas utilisés à l'échelle industrielle. Les principaux freins concernent les coûts opérationnels (consommation d'eau, de produits chimiques, d'énergie), l'augmentation des concentrations de sels dans le digestat (avec un prétraitement à l'acide chlorhydrique ou à la soude par exemple) et la formation potentielle d'inhibiteurs tels que les polyphénols. Les performances obtenues sont de plus très variables selon les matières prétraitées. Thomas (2019) a ainsi reporté que le prétraitement thermochimique appliqué sur du sorgho biomasse 140 n'avait pas permis d'augmenter son BMP alors que ce prétraitement était efficace (jusqu'à + 55% de potentiel méthane avec la soude) sur du miscanthus plus ligneux que le sorgho.

Différentes options sont étudiées pour réduire les verrous qui freinent l'application de ces prétraitements :

- Sélectionner les matrices à prétraiter en fonction de leur faible biodégradabilité et des performances obtenues par le prétraitement (cinétique et BMP),
- L'utilisation de produits chimiques qui ne pénalisent pas la qualité du digestat. La soude peut par exemple être remplacée par de la potasse qui apporte du potassium, ce dernier ayant un intérêt pour les sols au contraire du sodium apporté par la soude (Carrère et al., 2021),
- Le recyclage de la fraction liquide issue du prétraitement pour limiter les consommations en eau, en produits chimiques et les volumes à traiter (Peyrelasse et al., 2021). Dans ce cas, l'efficacité du prétraitement diminue entre chaque cycle et nécessite un complément en produits chimiques. Des essais réalisés à l'échelle laboratoire par l'APESA ont montré

que des économies de 40 et 60% pouvaient être obtenues pour la soude et l'eau respectivement (Peyrelasse et al., 2021).

La société Xergi rachetée par Nature Energy (Danemark) a développé le procédé NiX® pour prétraiter thermo-chimiquement la matière (pH 10 avec apport de chaux, 160°C, 6 bars). Deux unités ont été installées pour extraire l'azote de substrats très concentrés en azote. Aucune unité n'a été installée pour améliorer la digestion de matières ligno-cellulosiques.

Le Cooker d'Agrikomp (France) est commercialisé pour améliorer la digestion des substrats fibreux en augmentant les cinétiques de dégradation et en réduisant la viscosité du digestat. Il se positionne entre le digesteur et le post-digesteur autorisant l'absence de chauffage sur le post-digesteur. Un échangeur thermique tubulaire prétraite la matière en digestion en appliquant une température comprise entre 40 et 80°C pendant 40 à 120 minutes (Agrikomp, 2021).

Des technologies d'explosion à la vapeur (150-180°C, 8-10 bar) ont été développées par les sociétés Biogas Systems (Economizer SE) et CleanVantage LLC (AD-Booster®).

Aucun retour n'a pu être obtenu auprès de la société Biogas systems (Australie) sur l'actuelle commercialisation du procédé Economizer SE. La technologie de 60 t/h a été installée en Angleterre sur 5 unités de méthanisation par la société Futurebiogas (Angleterre), partenaire de Biogas systems. L'explosion à la vapeur fonctionnait correctement, en revanche de nombreux dysfonctionnements ont été rencontrés au niveau de l'introduction/broyage et de l'extraction de la biomasse traitée lors de l'automatisation complète du process. Aujourd'hui cette technologie n'est plus installée par Futurebiogas (Future Biogas Ltd, 2021).

Le système AD-Booster® de CleanVantage LLC (Etats Unis) intègre un process d'oxydation en voie humique/explosion à la vapeur (Advanced Wet Oxydation/Steam explosion, AWEx®) pour déstructurer les biomasses lignocellulosiques non digérées entre 2 étages de digestion anaérobie. BioVantage.dk ApS est une société danoise créée pour commercialiser cette technologie en Europe. Aujourd'hui, aucune unité industrielle ne fonctionne. Un démonstrateur d'une capacité de 3,5 t/h a été développé et testé plusieurs années sur une unité de méthanisation. BioVantage.dk prévoit d'acquérir un méthaniseur pour poursuivre ces essais et démontrer l'efficacité et la fiabilité de cette technologie.

Les prétraitements thermiques présentent l'avantage, à haute température, de détruire les pathogènes contenues dans certains substrats (cas des fumiers) mais aussi les adventices présentes dans les menues pailles (Douard, 2007).

Prétraitements biologiques

Les prétraitements biologiques sont des prétraitements réalisés grâce à des bactéries, des champignons et/ou des enzymes (Hosseini Koupaie *et al.*, 2019). Ils sont généralement faciles de mise en œuvre et sont appliqués soit en amont de la méthanisation : au niveau du stockage (ensilage en particulier), en pré-compostage, dans une cuve de pré-hydrolyse ou directement dans la cuve de digestion.

Ensilage

La part de culture alimentaire ou énergétique méthanisée est limitée réglementairement pour ne pas concurrencer la production alimentaire. L'Art. D. 543-292 du décret du 07 juillet 2016 stipule que « Les installations de méthanisation de déchets non dangereux ou de matières végétales brutes peuvent être approvisionnées par des cultures alimentaires ou énergétiques, cultivées à titre de culture principale, dans une proportion maximale de 15 % du tonnage brut total des intrants par année civile » (Ministère de l'environnement, 2016). Ne sont pas comptabilisées dans ces 15%, les prairies permanentes et les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) dont l'utilisation en méthanisation est largement répandue. Ces productions végétales produites de manière saisonnière doivent être stockées sur plusieurs mois avant d'être méthanisées.

L'ensilage de la matière végétale est connu pour être un moyen de conservation adapté pour les matières présentant un taux de MS < 40 % : CIVEs, tontes ou autres résidus agricoles (Peyrelasse C. et al., 2017). La matière est hachée puis stockée en tas compact pour éliminer la présence d'oxygène au sein du tas. En présence de sucres fermentescibles, une fermentation à dominante lactique se met en place provoquant l'acidification de la matière. L'ensilage est ainsi stabilisé permettant de conserver

la matière et son potentiel méthanogène. Le pH acide et les conditions anaérobies limitent le développement d'organismes qui pourraient dégrader la matière (AFSSA, 2004).

Les essais réalisés par l'APESA dans le cadre du projet SAM ont montré que la matière organique ainsi que son potentiel méthanogène sont bien conservés si l'ensilage est réalisé dans les règles de l'art (Peyrelasse C. et al., 2017). Après 12 mois de stockage pour un ensilage de maïs plante entière et un ensilage de sorgho fourrager stockés en silos taupinières³, les pertes étaient inférieures à 15% pour la MSV et pour le potentiel méthanogène. Une récupération des jus d'ensilage doit être prévue pour des raisons environnementales et pour pouvoir les méthaniser.

Différentes études se sont intéressées à l'impact de l'ensilage sur la biodégradabilité de la matière et son potentiel méthanogène. Les acides produits pourraient modifier la structure lignocellulosique des substrats des matières ensilées augmentant leur potentiel méthanogène qui compenserait la perte de matière pendant le stockage (Carrere et al., 2016; Singh, 1996; Teixeira Franco et al., 2016). L'ensilage pourrait ainsi être considéré comme un prétraitement biologique pour les résidus agricoles et les cultures énergétiques (Carrere et al., 2016).

Des additifs sont commercialisés pour améliorer la qualité de l'ensilage, il s'agit de sucres pour favoriser la fermentation lactique, d'acides ou de produits bactériostatiques type formol pour inhiber la fermentation butyrique qui dégrade la qualité de l'ensilage (Demarquilly, 1973) et des additifs biologiques contenant des bactéries lactiques et/ou des enzymes.

Pré-hydrolyse

Des fournisseurs proposent des cuves de préhydrolyse anaérobie, aérobie ou semi-aérobie en amont des digesteurs.

L'hydrolyse semi-aérobie catalysée est utilisée pour prétraiter la matière ligno-cellulosique (herbe, paille, fumier) afin d'augmenter son rendement de dégradation. Biogaz Ingénierie (Beaune 21200) installe des cuves d'hydrolyse semi-aérobie catalysée pour prétraiter la matière ligno-cellulosique (herbe, paille, fumier) afin d'augmenter son rendement de dégradation (Dutremée, 2021). Une vingtaine d'unités a été installée en Allemagne par la société Bionova Biogas GmbH. Ce prétraitement a été installé sur quelques sites en France initialement par AEB MéthaFrance. Biogaz ingénierie a depuis installé trois unités selon le process développé par Bionova Biogas GmbH. Deux unités sont en fonctionnement aujourd'hui, la troisième a été arrêtée en raison de difficultés de mélange/introduction. Cette hydrolyse est réalisée dans une cuve chauffée à 37-38°C avec un temps de séjour de 0,4 à 1 jour et une aération séquencée (compresseur). Le pH est de l'ordre de 6,5 à 7. Le gaz produit par l'hydrolyse : CO₂, H₂S et méthane (0,1 à 0,25%) est traité par un biofiltre à fibres naturelles type coco ou bruyère avant rejet à l'atmosphère. Le taux de MS dans cette cuve doit être de l'ordre de 8 à 12% pour permettre son agitation et le pompage de la matière vers le digesteur. Le digestat peut être recirculé pour atteindre ce taux de MS. Ces contraintes font que cette hydrolyse n'est proposée par Biogaz Ingénierie que pour des cas particuliers et en particulier lorsque les intrants intègrent un substrat liquide type lisier pour diluer la matière lignocellulosique (Dutremée, 2021).

La société Evalor (France) commercialise le procédé Boost pour augmenter la cinétique et la dégradabilité des substrats principalement lignocellulosiques. Il s'agit d'une hydrolyse biologique réalisée dans une cuve agitée et chauffée à la température de digestion (mésophile). La ration d'intrants à prétraiter doit permettre à l'hydrolyse de s'installer, ce qui se traduit par la diminution du pH dans la cuve. Le taux de MS visé est de 10%. Le gaz produit pendant l'hydrolyse n'est pas valorisé à l'heure actuelle et rejeté à l'atmosphère. Un programme de recherche a démarré en mars 2020, BOOST'HYDRO, dans le cadre d'une thèse, en collaboration avec INRAE et avec le soutien de la Région Bretagne. Plusieurs axes de recherche sont concernés et notamment la compréhension des phénomènes biologiques, l'étude des voies de valorisation du gaz produit pendant l'hydrolyse et les recettages les plus adaptés. Fin 2019, 9 unités de méthanisation construites par Evalor étaient équipées du procédé Boost soit environ 15% des sites. Le coût d'investissement lié à cet investissement est de l'ordre de 100 000 € (Duedal, 2021).

Les technologies d'hydrolyse biologique sont présentées dans le Tableau 10 (non exhaustif).

Tableau 10 : Caractéristiques des procédés de prétraitements biologiques commerciaux (non exhaustif) (Compilation RECORD 2022)

Technologie	Principe et conditions	Exemples	Référence
-------------	------------------------	----------	-----------

³ Matières produites dans le cadre du programme OPTICIVE (soutenu par l'ADEME) et conduit par GIE GAO (ARVALIS/Terres Univia/Terres Inovia) en partenariat avec Euralis

		d'applications	
Boost de Evalor	Hydrolyse des pailles, cannes de maïs dans une cuve chauffée à la température de digestion	SCEA ROPERT, Bréhan (56)	https://www.reussir.fr/la-it/methanisation-boost
Hydrolyse semi-aérobie catalysée Biogaz ingénierie	Aération séquencée d'une cuve chauffée (37-38°C)	SAS Metha Bel Air Vallée de l'Isle Energie (VIE) Saint Astier	http://biogaz-ingenierie.fr/
Hydrolyse anaérobie d'Arkolia	Hydrolyse mésophile ou thermophile (2 jours)	EARL DEVIENNE (Napagèse)	https://arkolia-energies.com/wp-content/uploads/2020/10/technologie-ARKOMETHA.pdf

Prétraitement fongique

Certains champignons présentent la capacité de dégrader la lignine et pourraient être utilisés en fermentation voie sèche pour prétraiter la biomasse. Les champignons à pourriture blanche ont été identifiés comme les plus performants pour délignifier un substrat (Rouches et al., 2016). D'après Carrère et al., (2016), les champignons permettent une augmentation du BMP jusqu'à 50% mais les pertes de MO estimées entre 10 et 20% sont trop peu mentionnées et peuvent conduire à une surestimation des gains (Carrère et al., 2016). Le projet ANR Stockactif, coordonné par l'UMR FARE et finalisé en 2017 s'est intéressé aux souches de champignons capables de délignifier les biomasses lignocellulosiques (pailles de blé et de miscanthus). Des essais réalisés à l'échelle du laboratoire puis en conditions réelles ont montré que le prétraitement fongique impliquait des surcoûts, + 12 % pour les investissements, + 170 % pour les charges de fonctionnement, qui n'étaient pas compensés par l'augmentation de la production de méthane (Solagro, 2016). A terme, les champignons pourraient permettre de méthaniser des substrats ligneux non traités aujourd'hui (Rouches et al., 2016). Les travaux de recherche sur l'optimisation des conditions de prétraitement (humidité, aération, température, complément nutritionnel et durée) doivent au préalable permettre d'améliorer les performances au regard des pertes de matières (Rouches et al., 2016).

Prétraitement par ajout d'enzymes ou de micro-organismes sélectionnés

Des enzymes sont commercialisées par différents fournisseurs pour améliorer la dégradabilité des matières, réduire la viscosité (et donc les contraintes d'agitation) dans les digesteurs et limiter la flottation des matières en surface.

Les enzymes pouvant hydrolyser la cellulose et l'hémicellulose sont des glycosides hydrolases (Monteiro, 2009) et celles dégradant la lignine sont des laccases et des peroxydases. Plusieurs mélanges enzymatiques sont disponibles dans le commerce pour des applications dédiées à la méthanisation avec des domaines d'activité compatibles avec les conditions de pH et de température.

Les enzymes ou micro-organismes sélectionnés peuvent être introduits dans la filière de méthanisation de différentes manières :

- En amont du méthaniseur dans une zone de prétraitement dédiée ou au niveau du stockage de la matière brute,
- directement dans le digesteur lors d'un procédé en une étape,
- dans la cuve d'hydrolyse lors d'un procédé en deux étapes,
- dans la fraction liquide du digestat lorsqu'il est mis en recirculation.

Ces additifs sont utilisés en méthanisation mais leur impact sur la digestion anaérobie est peu documenté. Les bénéfices avancés par les fournisseurs sont :

- o la réduction de la viscosité du digestat qui permet de diminuer les consommations énergétiques liées à l'agitation,
- o l'augmentation des performances de production de méthane et l'amélioration des cinétiques de traitement,
- o la réduction des croûtes en surface (liées à la flottation de la matière).

Le fournisseur DSM (Pays Bas) commercialise 2 produits à destination des méthaniseurs (DSM, 2021) :

- MethaPlus® pour les substrats riches en fibres : maïs, herbe, fumier.
- Axiase™ pour les substrats à base de céréales : seigle, triticale, blé, orge.

SOBAC (France) commercialise Bacteriometha® comme additif pour les substrats avant méthanisation (SOBAC). Il s'agit d'un mélange de minéraux naturels et d'une sélection de végétaux naturels compostés sur lesquels s'est développé un complexe de micro-organismes spontanés des composts. Il est incorporé directement dans les litières moins de 15 jours avant le curage et peut s'utiliser en méthanisation voie sèche et infiniment mélangé. Il permettrait d'améliorer l'accessibilité de la matière organique avec une meilleure attaque des fibres, améliorerait l'homogénéité et le brassage des substrats dans le digesteur et réduirait la formation de couches flottantes. Il permettrait de plus d'améliorer l'absorption des jus de recirculation dans les tas pour la voie sèche. D'autres produits sont commercialisés par Dupont (Optimash® AD100), Metgen (Metzyme® Forci™), Novozymes (BG Max® 5005/5105/5205), Agrikomp (Enzymaxx) et SEDE (Methazyme).

Des performances ont été mesurées à l'échelle laboratoire voire pilote (Annexe 3). Herrero Garcia et al. (2019) a ainsi montré que les performances étaient dépendantes de la nature de la biomasse avec un impact limité pour le maïs et le triticale alors que des augmentations de production de biogaz de 30% ont été mesurées à l'échelle laboratoire pour du sorgho, de la paille et de la rafle de maïs. Les applications à l'échelle industrielle ne font généralement pas l'objet d'un suivi afin d'évaluer le bénéfice réel imputable aux enzymes/microorganismes. Des performances ont, toutefois, été reportées à l'échelle industrielle sur 30 exploitations agricoles. L'application de MethaPlus® aurait permis d'augmenter les productions de biogaz de 18% en moyenne (4-35%) en comparaison de la production attendue en théorie (Gerhardt et al., 2007) d'après (Kaiser, 2004).

Leur coût pourrait, en revanche, pénaliser leur intérêt d'autant que leur durée de vie est limitée dans le temps (Brémond et al., 2018). Odnell et al. (2016) a ainsi que conclu que même si la production de biogaz est augmentée dans certains cas, le rapport coût / bénéfice des enzymes est probablement trop élevé compte tenu des concentrations nécessaires. Des données complémentaires restent toutefois à acquérir pour déterminer l'impact économique global de ces solutions au regard des bénéfices potentiels (augmentation de la production de méthane, réduction des consommations électriques liées à l'agitation) en fonction du type de matière. Les enzymes/micro-organismes qui présentent un avantage certain au regard de la facilité de leur mise en œuvre pourraient être une option intéressante pour certains sites.

Le principal frein à leur utilisation en méthanisation concerne le peu de données accessibles sur leurs performances et coûts à l'échelle industrielle. Les données disponibles sont généralement issues des fournisseurs eux-mêmes.

Comparaison des performances des prétraitements

Les données disponibles dans la littérature sur les performances des prétraitements appliqués à l'échelle industrielle et pilote sur des matrices lignocellulosique (Annexe 3) sont représentées sur la Figure 30.

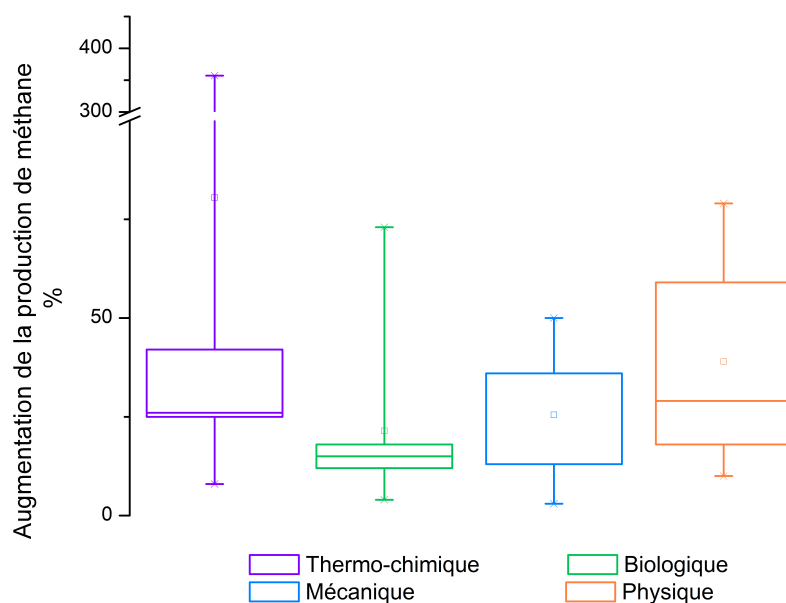


Figure 30 : Comparaison de l'efficacité des prétraitements pour augmenter la production de méthane de matières lignocellulosiques (échelle industrielle et pilote) (RECORD, 2022)

Ce graphique permet de faciliter la comparaison des performances des prétraitements appliqués à l'échelle pilote et industrielle. Il faut toutefois noter que le nombre de données disponibles est faible avec 5 à 7 retours d'expériences par catégorie de prétraitements.

Les performances les plus élevées sont mesurées pour les prétraitements physiques (+29% pour la médiane) et thermo-chimiques (+26% pour la médiane). L'explosion à la vapeur (170°C, 25 min, 4 bars) testée sur du fumier a permis d'atteindre les performances les plus élevées (+357% de production de méthane) à l'échelle pilote (Ahring et al., 2015). Cette technologie n'est toutefois pas disponible commercialement pour le prétraitement de matrices lignocellulosiques. BioVantage.dk ApS (Danemark) travaille à démontrer l'efficacité et la fiabilité du système AD-Booster® d'oxydation en voie humide/explosion à la vapeur grâce à son démonstrateur de 3,5 t/h. Les données reportées pour les prétraitements physiques montrent des augmentations de production de méthane comprises entre +10 et +79%. Les performances sont augmentées de +10% (Garuti et al., 2017) et +18% (Zieliński et al., 2019) pour la cavitation appliquée à l'échelle industrielle. D'autres avantages ont été mesurés et notamment une diminution de la viscosité du digestat. Des bénéfices élevés (+59 et +79% de production de méthane) sont aussi reportés pour les prétraitements aux ultrasons appliqués à l'échelle pilote sur du fumier bovin seul ou en mélange (Ormaechea et al., 2016; Ormaechea et al., 2018). Les prétraitements biologiques ont des performances variables (+4 à +73%). Le meilleur rendement est obtenu pour le pré-compostage (24h, Tamb) réalisé sur la fraction organique des ordures ménagères (Fernandez-Güelfo et al., 2011). Le broyage (prétraitement mécanique) est utilisé pour faciliter l'introduction de la matière et son mélange. Il permet d'améliorer les cinétiques de dégradation et peut aussi avoir un impact positif sur la production de méthane. Les augmentations de production de méthane mesurées dans le cadre du projet PAM (Bayard et al., 2019) sont limitées à 10-15%. Des performances plus élevées ont toutefois été mesurées avec un broyeur à chaînes alors que pour un site aucun impact notable n'a été mesuré (Bayard et al., 2019; Mönch-Tegeder et al., 2014).

Bilan

Les biomasses lignocellulosiques dures (type canne de maïs, paille) subissent généralement un broyage avant digestion en réacteur infiniment mélangé. Les broyeurs à marteaux, à chaînes ou les procédés d'extrusion apparaissent bien adaptés. Pour des biomasses moins dures, un broyage à couteaux est généralement appliqué. La société Vogelsang recommande de mettre en place un broyeur dès lors que la longueur des fibres ou la granulométrie de la matière est supérieure à 6 cm (Eberlein, 2021). Des systèmes sont installés en boucle sur les digesteurs pour améliorer la digestion, réduire la viscosité du digestat et supprimer les problèmes de croutage (cavitation, pompe broyeuse,

ultrasons). Le nombre de ces unités est aujourd'hui en augmentation. L'application d'enzymes (en amont du digesteur ou directement dans la cuve) connaît aussi des retours d'expériences à l'échelle industrielle.

2.4.3. Boues de stations d'épuration

La méthanisation des boues de station d'épuration permet avant tout de réduire la quantité de boues et ainsi leur coût d'élimination, c'est pourquoi de nombreux procédés de prétraitements ont été implantés à l'échelle industrielle. Les procédés des stations d'épuration urbaines (STEU) étant continus, le stockage des boues n'est pas une problématique. Les différents types de boues présentes sur les stations d'épuration sont classées par ordre de biodégradabilité croissante : boues digérées, boues activées issues de procédés d'aération prolongé / boues activées faible charge, boues activées forte charge, boues mixtes (mélange de boues activées et de boues primaires), boues primaires. Si l'intérêt du prétraitement est évalué par l'amélioration du rendement en biogaz ou de l'élimination de la matière organique, il est généralement plus avantageux de prétraiter les boues secondaires que les boues primaires. En outre, certains procédés impliquent le post-traitement des boues digérées (dont la matière la plus facilement biodégradable est déjà éliminée) et leur recirculation dans le digesteur ou post digesteur. En général les prétraitements sont appliqués sur des boues épaissies ou après séparation de phase, réduisant le volume traité et les coûts de prétraitement. Il convient de noter que l'opération de concentration ou épaississement est également appliquée aux boues avant leur introduction dans le méthaniseur. La présente étude bibliographique, synthétisée dans l'annexe 4, est focalisée principalement sur les essais réalisés sur site industriel (hydrolyse thermique à haute ou basse température, centrifugeuse lyseuse, sonication, homogénéisation à hautes pressions, électroporation, enzymatiques) ou à défaut en réacteurs continus à l'échelle du laboratoire (micro-ondes, traitements chimiques ou thermochimiques, prétraitements biologiques, anaérobie ou aérobie). Seuls des prétraitements récents et originaux évalués par des tests de potentiels biométhanogènes (BMP) seront évoqués. Les différents procédés appliqués au traitement des boues sont présentés ci-après.

Hydrolyse thermique à haute température (>100°C)

L'hydrolyse thermique consiste à exposer les boues à de fortes températures comprises entre 140 et 180°C sous pression. Des températures plus élevées améliorent la solubilisation des boues mais provoquent la formation de composés de Maillard, non biodégradables en digestion anaérobie. La durée est généralement de 20-30 min mais Zabranska et al. (2006b) ont montré la possibilité d'opérer avec des temps plus courts, de l'ordre de la minute. Ce traitement entraîne la dégradation de la structure en gel des boues et la libération de l'eau liée, la déstructuration des floccs et la solubilisation des exopolymères. De plus, la destruction des membranes des cellules libère les composés intracellulaires qui deviennent alors accessibles pour la dégradation anaérobie. La déstructuration des floccs améliore l'aptitude des boues à la déshydratation et de tels procédés ont été utilisés dès les années 1970 pour le conditionnement des boues avant leur déshydratation (procédé Porteous). L'amélioration de la déshydratation des boues est observée pour des températures supérieures à 150°C. Les autres conséquences de ce prétraitement sont la réduction de la viscosité (apparente) des boues et la production de composés colorés solubles difficilement biodégradables. Le surnageant de centrifugation est généralement retourné en tête de station d'épuration impliquant une augmentation des coûts d'aération pour éliminer cette DCO. La concentration de ces composés colorés augmente avec l'augmentation de la température de prétraitement, il est ainsi recommandé d'opérer à une température comprise entre 140 et 160°C (Devos et al., 2020).

Actuellement plus de 80 stations d'épuration dans le monde sont équipées de procédés d'hydrolyse thermique pour améliorer la méthanisation des boues, le premier procédé, CAMBI, a été installé sur la station municipale du HIAS à Hamar en Norvège en 1995 (Devos et al., 2020). Les procédés commercialement disponibles (Tableau 11) regroupent des technologies batch, semi-continues ou continues et comprennent ou non un système de détente rapide (système Flash) pour le retour à la pression atmosphérique. Le chauffage est assuré soit par injection de vapeur soit par échangeurs de chaleur. La plupart des prétraitements d'hydrolyse thermique sont appliqués aux boues secondaires ou aux boues mixtes si l'hygiénisation de la totalité des boues est souhaitée. Les boues doivent être épaissies afin de limiter l'énergie nécessaire pour chauffer le volume de boues. Les procédés les plus

récents qu'il soient discontinus (Cambi solid stream, Barber et al., 2017) ou continus (Exelys, Zhao et al., 2015) sont appliqués aux boues digérées après séparation de phase. Comparé au procédé Cambi appliqué aux boues mixtes, le procédé Cambi Solid Stream conduit à de meilleurs gains en amélioration de déshydratabilité et de production de méthane (Barber B. et al., 2017).

Tableau 11 : Caractéristiques des procédés d'hydrolyse thermique commerciaux, (Compilation RECORD 2022)(adapté de Devos et al. 2020).

Procédé	Mode	Préchauffage	Chauffage	Température	Flash	Nombre de références	Références
CambiTHP™	batch	Récupération vapeur	Injection de vapeur	160-180 °C	Oui	> 60	(Barber, 2016)
Biothelys™, Veolia	batch	Récupération vapeur	Injection de vapeur	165 °C	oui	7	(Chauzy et al., 2008)
Exelys™, Veolia	continu	non	Injection de vapeur	165 °C	Non	7	(Abu-Orf & Goss, 2012)
HCHS, Haarsley	semi-continu	Récupération vapeur	Injection de vapeur	150-170 °C	Oui	3	(Williams & Burrowes, 2016)
Turbotec®, Sustec	continu	Mélange boues fraîches et hydrolysées	Injection de vapeur	140°C	Non	2	(Luning et al., 2014)
Lysotherm®, Eliquo	continu	Echangeur de chaleur	Echangeur de chaleur	140-170°C	Non	2	(Geraats, 2014)

Hydrolyse thermique à faible température (<100°C)- Procédés biologiques

L'hydrolyse thermique à des températures inférieures à 80°C a également été étudiée, ces procédés impliquant des réactions biologiques, les durées sont de l'ordre de la dizaine d'heures à quelques journées pour les procédés anaérobie ou de l'ordre de quelques heures pour les techniques aérobies ou microaérobie. Les températures étudiées correspondent aux procédés (hyper)thermophiles ou mésophiles. Le Tableau 12 présente des procédés commerciaux faisant appel à une hydrolyse biologique.

Tableau 12 : Caractéristiques des procédés d'hydrolyse thermique/biologique (Compilation RECORD 2022)

Technologie	Principe et conditions	Exemples d'applications	Références
Monsal42	Hydrolyse thermique /biologique 42°C pendant 3 j 6 réacteurs en série		https://www.suezwatertechnologies.fr
Technologie Monsal55	42°C pendant 1,5 j puis 55°C pendant 24 à 36 h	Great Billing Water Recycling Centre » à Northampton en Angleterre	https://www.suezwatertechnologies.fr

Les enzymes peuvent également être utilisées. Par exemple l'addition de deux glycosidases dans le digesteur a permis l'augmentation de 10 à 20% de la production de biogaz lors d'un essai sur une STEU. Toutefois, lors de cet essai, la température était également augmentée par intermittence (Wawrzynczyk J. (2007). L'utilisation des enzymes en prétraitement est peu favorable car la matière solubilisée peut être dégradée avant son introduction dans le méthaniseur. L'introduction des enzymes dans le méthaniseur est alors préférable mais il convient de considérer le pH optimal de fonctionnement des enzymes qui peut être différent de celui du méthaniseur.

Sonication

La sonication consiste en la propagation d'ondes de pression dans un milieu liquide et en la formation de bulles de cavitation qui implosent violemment lorsqu'elles atteignent une taille critique. Une grande quantité d'énergie mécanique est alors libérée entraînant des phénomènes de fortes turbulences et de forts cisaillements au sein du liquide. La température et la pression peuvent atteindre localement des

valeurs très élevées. Ces phénomènes mécaniques sont favorisés par des fréquences faibles (20-40 kHz) alors que des fréquences élevées (500-1000 kHz) entraînent la formation de radicaux libres (OH^\bullet , HO_2^\bullet , H^\bullet) et des réactions d'oxydation. Dans le cas du prétraitement des boues, les technologies à faibles fréquences sont utilisées et la désintégration de la structure des floccs et la lyse des micro-organismes sont fonction de la durée de sonication ou de l'énergie appliquée. La sonication est appliquée préférentiellement aux boues activées, et dans la plupart des cas à seulement une fraction des boues activées (25% par exemple). Les essais réalisés à l'échelle industrielle montrent l'augmentation de la production de biogaz (l'amélioration de la biodégradabilité des boues est liée à leur solubilisation Carrère et al. 2010) et la réduction de la teneur en MV dans les boues digérées. La cinétique des boues prétraitées étant améliorée, le temps de séjour dans le méthaniseur peut être réduit et/ou la charge augmentée. Par exemple, Barber et al. Reportent sur des résultats à l'échelle industrielle, une amélioration de 25 à 50% des vitesses d'hydrolyse des boues, impliquant une augmentation de 20 à 30% de la charge organique ou réduction de 30% du TSH. De plus, l'amélioration de la déshydratabilité permet de réduire de 10% la consommation de polymères. Les ultrasons permettent également la réduction des problèmes de foisonnement des boues par l'élimination des bactéries filamenteuses.

Plusieurs firmes commercialisent des homogénéisateurs à ultrasons dans le but d'un prétraitement de la digestion anaérobie, ils sont reportés dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Caractéristiques des procédés commerciaux de sonication (Compilation RECORD 2022)

Technologie	Principe et conditions	Exemples d'applications	Références
Sonoflux® Ultrawaves, commercialisé en Allemagne par le groupe SAUR	20 kHz 2 kW/sonotrode* 20-50 W/cm ² * Energie fournie, 23 kJ/L* Boues 8% MS max* Bilan énergie 3-7 kW généré/kW consommé*	STEPs de Tourlaville- Cherbourg et des EcoSiemnes à Saint Nazaire (102 000 EH)	http://www.sonotronic.com http://saur.com
Technologie Sonix™ (Sonico)	20 kHz sonotrodes radiales de forme cylindrique, 6 kW/sonotrode* 15-50 W/cm ² * Energie fournie, 4-5 kJ/L* Boues 9% MS max* Bilan énergie 5-10kW généré/kWconsommé*	STEPs de Avonmouth, (Royaume Uni, 1 200 000 EH), SeAllemagne-Uni, 150 000 EH), Kavlinge, (Suède), Orange County District, Etats- Unis et Beenyp (Australie, 700000 EH).	(Hogan et al., 2004) http://www.sonico.net
IWE Tec (Dr Heildcher GmbH)	20 kHz sonotrodes en cascade, seule une fraction des boues secondaires est soniquée 8 kW/sonotrode* <200 W/cm ² * Energie fournie, 0,5-2 kJ/L* Boues 10% MS max* Bilan énergie <5 kW généré/kW consommé*	14 STEP s reportées dans la publication	(Barber, 2005)
Sewator®	Boues 30% MS max Taille : de 0,5 m ³ /h jusqu'à 1000 m ³ /h Réduction de la viscosité de plus de 80%		https://www.sewator.com/fr/sewator_fr/

* d'après Perez-Elvira et al. (2009)

Homogénéisation haute pression

Différentes technologies impliquant des pressions sur des gammes de quelques dizaines à 900 bars ont été testées à l'échelle du laboratoire. Un essai de démonstration sur station d'épuration a mis en avant l'augmentation de la production de méthane avec un homogénéisateur à 150 bars (Onyeché, 2007). En revanche, le procédé Microsuldge combinant une homogénéisation à 830 bars avec l'ajout de soude n'a pas conduit à l'amélioration de la production de biogaz, malgré une amélioration de l'abattement des matières organiques (Stephenson et al., 2007). Ce procédé n'a pas finalement pas été commercialisé. Le Tableau 14 les références commerciales basées sur cette technologie, seules les pressions faibles ou modérées semblent avoir un intérêt.

Tableau 14 : Caractéristiques des procédés d'homogénéisation hautes pressions commerciaux (Compilation RECORD 2022)

Technologie	Principe et conditions	Exemples d'applications	Références
CrownO (société Biogest)	12 bars débits de 5 à 500 m ³ .h ⁻¹	STE Allemagne, Allemagne 22000 EH, Rosedale, Nouvelles Zélandes, 250000 EH, Viby, Danemark 100000 EH	http://www.biogest.com
Procédé Cellruptor (société Eco-Solids International)	Décompression rapide hors équilibre boues pressurisées à P > 1 bar, puis dépressurisées	Une STEP dans le Yorkshire en Angleterre.	https://www.ecosolids.net/

Electroporation

Cette technologie, également appelée désintégration électrocinétique, utilise des champs électriques de tension élevée (jusqu'à quelques dizaines de kilovolts) sur des pulses de quelques millisecondes. Les boues sont alors désintégrées et des pores sont formés dans les membranes cellulaires, conduisant à la solubilisation des composés intracellulaires et améliorant ainsi leur digestion anaérobie. Un essai de démonstration du procédé OpenCell a été renseigné dans la littérature (Rittman et al. 2008). Malgré des résultats intéressants ce procédé n'est plus commercialisé. Le procédé Biocrack (Vogelsang) utilisant la même technologie est disponible commercialement (Tableau 15), le constructeur avance une amélioration de 8% de la production de biogaz et une réduction de 11% de la quantité de boues à éliminer.

Tableau 15 Caractéristiques des procédés de désintégration électrocinétique (Compilation RECORD 2022)

Technologie	Principe et conditions	Exemples d'applications	Références
BioCrack (Vogelsang)	Désintégration électrocinétique	STEU en Allemagne	https://www.vogelsang.info/fr-fr/

Centrifugeuse-lyseuse

Ce procédé consiste en une centrifugeuse traditionnelle à laquelle un système de lyse cellulaire a été ajouté. Les forces de cisaillement entre des lames fixes solidaires de la paroi interne de la centrifugeuse et des lames mobiles fixées sur le rotor conduisent à la désintégration partielle des boues épaissies. Ce dispositif a été installé sur plusieurs stations d'épuration dans les années 2000 (Zabranska et al., 2006b). Malgré des résultats intéressants (15 à 26% d'augmentation de la production de biogaz) et le faible coût de ce prétraitement (intégré à une opération unitaire présente sur la STEP), la société Lysatec GmbH qui le commercialisait ne semble plus exister.

Prétraitements (thermo)-chimiques

Différents prétraitements chimiques ont été appliqués au laboratoire (Annexe 4), il s'agit principalement de traitements alcalins, acides ou d'oxydation. Les traitements alcalins sont performants pour solubiliser la matière organique des boues et améliorer le rendement méthane. La soude et la potasse sont plus efficaces que la chaux mais si le digestat est valorisé en agriculture, la potasse doit être favorisée. Le procédé Lystek THP[®] qui combine ajout de potasse et un traitement thermique à 75°C est commercialisé (Tableau 16).

Tableau 16 : Caractéristiques des procédés d'hydrolyse thermique/chimique commerciaux
(Compilation RECORD 2022)

Technologie	Principe et conditions	Exemples d'applications	Références
Lystek THP®	75°C Ajout de 86 à 104 kg de solution à 45% de KOH par tonne MS Boues à 13-16% de MS	quelques STEPs au Canada et aux Etats Unis (e.g. Guelph, Peterborough)	

Les traitements acides conduisent à des améliorations de production de méthane (mais inférieures aux procédés alcalins) et à des améliorations importantes de la déshydratabilité des boues. On peut souligner un traitement récemment publié (Wei et al., 2018) qui utilise de l'acide nitreux (HNO₂) produit in situ à partir de NaNO₂ et HCl. Les auteurs indiquent un bilan énergétique positif sur une STEU virtuelle de 400 000 EH.

Les procédés d'oxydation font appel à l'ozonation ou au procédé de Fenton (H₂O₂ en milieu acide et en présence de Fe(II)). Si l'ozonation est utilisée à l'échelle industrielle sur la ligne eau pour réduire la production des boues à la source, son application sur la ligne boue se révèle coûteuse et peut conduire à une minéralisation partielle de la matière organique, impliquant des pertes de potentiel méthane. Une étude (He et al., 2018) propose un prétraitement d'oxydation original avec du ferrate de potassium mais il a été évalué uniquement avec des tests BMP.

Microondes / radio fréquences

Ces procédés sont mis en avant pour leur capacité à augmenter la température de milieux aqueux de manière bien plus rapide que les procédés thermiques conventionnels, ainsi que pour leur facilité à contrôler et la compacité des équipements (Kor-Bicakci et al., 2019). Toutefois leurs impacts sur les performances sont principalement liés à la température et sont comparables à ceux obtenus avec les procédés d'hydrolyse impliquant un chauffage conventionnel. Une différence essentielle est la nature d'énergie consommée par le prétraitement : électricité pour les microondes contre la chaleur pour le chauffage conventionnel. Or la chaleur est généralement disponible sur les stations d'épuration si le biogaz est valorisé en cogénération.

Les études à l'échelle du laboratoire qui ont considéré le bilan énergétique des prétraitements par microondes en amont de la méthanisation convergent vers des bilans négatifs (Appels et al., 2013, Kor-Bicakci et al. 2019). En revanche, Hosseini Koupaie et al. (2018) ont comparé, sur la base de tests BMP, le prétraitement par microondes et l'irradiation par des radiofréquences. Si pour une température donnée, les performances des deux procédés sont équivalentes, le bilan énergétique est nettement plus favorable dans le cas du prototype utilisant les radios fréquences. Les futurs développements de ce procédé sont donc à surveiller.

2.4.4. Graisses : Déchets graisseux et coproduits animaux

Les déchets graisseux sont généralement associés aux sous-produits animaux et sont donc soumis à l'obligation de pasteurisation ou stérilisation. Quelques études à l'échelle du laboratoire (Annexe 5) ont abordé la mono-digestion des déchets graisseux en réacteurs semi-continus, après prétraitement de pasteurisation (Bayr et al., 2012a) ou stérilisation (Escudero et al., 2014). Cependant ces études ne présentent pas de résultats sur la monodigestion en CSTR des déchets non prétraités. Elles convergent sur la nécessité d'appliquer des temps de séjours élevés (50 ou 125 jours) ou de recirculer une partie du digestat permettant ainsi d'éviter le lessivage de la biomasse anaérobie tout en augmentant le temps de séjours des déchets (Affes et al., 2013). Des prétraitements thermo-alcalins peuvent être appliqués aux déchets graisseux. La réaction entre un lipide et une base réalisée à froid ou à chaud, appelée saponification, conduit à la production (ions carboxylates) solubles et d'alcools. La conversion des lipides insolubles dans l'eau en savons solubles résulte alors en l'augmentation du contact entre les déchets et les microorganismes du digesteur, ce qui permet d'améliorer la biodégradation des déchets graisseux et d'éviter la formation d'une couche en surface du réacteur. Après un prétraitement par saponification de graisses animales, Affes et al. (2013) ont observé une augmentation de la cinétique de méthanisation mais pas d'impact sur le rendement en méthane. Par ailleurs, Bayr et al. (2012) ont comparé les digestions mésophile et thermophile de déchets d'abattoir et ont confirmé la meilleure stabilité des procédés mésophiles.

Les déchets graisseux sont donc principalement utilisés en codigestion avec les boues d'épuration, la fraction organique des ordures ménagères ou encore des lisiers (Annexe 5). Les essais de

stérilisation à 133°C montrent soit aucun impact significatif (Grosser et al., 2020) ou une diminution (Cuetos et al., 2010) de la production de méthane. Cette diminution de rendement méthane a été également observée sur des tests BMP après un prétraitement thermique à 170°C d'eaux grasses de restaurant (Carrère et al., 2012). Cette diminution serait due à la formation de composés récalcitrants tels que des polymères azotés complexes (Cuetos et al., 2010). En ce qui concerne la pasteurisation à 70°C, des études montrent aucun impact significatif sur le rendement méthane (Grim et al., 2015; Luste & Luostarinen, 2010) ou alors une légère augmentation (+11%) dans le cas la codigestion de déchets d'abattoir avec du lisier bovin (Luste & Luostarinen, 2010). Cependant Luste et Luostarinen (2010) reportent la possibilité d'augmenter la charge suite à la pasteurisation de déchets d'abattoir codigérés avec des boues d'épuration. Il semble donc préférable d'opérer l'hygiénisation des déchets gras à faible température.

L'installation Bio Energie Touraine utilise le système Biochop (Atlantique Industrie <https://www.atlantiqueindustrie.fr>) (Gatreau & Becot, 2016) pour hygiéniser à 70°C les déchets de catégorie 3 (4000 tonnes/an) (Gatreau & Becot, 2016).

L'hygiénisation peut également être réalisée par hydrolyse hyperthermophile comme montré par Alqaralleh et al. (2018) pour la codigestion de graisses et de boues secondaires. Ainsi la méthanisation en deux étapes (2 j TSH en hyperthermophile (70°C) et 13 j TSH en thermophile (50°C)) a conduit à une augmentation de 65% et 21% du rendement méthane par rapport la méthanisation thermophile (TSH 15 j) pour les mélanges 70/30 et 60/40 graisses/boues (Alqaralleh et al., 2018).

Un essai de sonication appliqué en amont de la codigestion déchets d'abattoir/ lisier bovin n'a pas montré d'amélioration significative du rendement méthane (Luste et al., 2012). Finalement des essais de prétraitements thermo-alkalins (ou saponification lorsqu'ils sont appliqués aux graisses) ont montré des résultats intéressants. Ainsi le prétraitement à la soude à pH 10 à 55°C pendant 24 h d'un mélange de graisses et boues secondaires, a conduit une augmentation de 37% de la production de méthane (Li et al., 2015). Une autre étude sur un mélange d'eaux grasses de restaurant et de boues a montré une amélioration de 58% de la production de méthane suite au prétraitement à la potasse à pH 8, 80°C pendant 30 min (Carrère et al., 2012). Dans cette dernière étude, des essais en BMP ont montré les mêmes résultats après les prétraitements à pH 8, 9 ou 10 et à une température de 80 ou 120°C. En revanche, Li et al. (2015) ont obtenu un BMP légèrement inférieur (-6%) à pH 8 par rapport aux pH 10 et 12 lors du prétraitement à la soude à 55°C du mélange boues/grasses. Les prétraitements thermo-alkalins ou saponification permettent donc de rendre solubles les matières grasses et si la température est supérieure ou égale à 70°C, ce procédé peut assurer la pasteurisation/hygiénisation des déchets.

A l'échelle industrielle, la société Sapoval (Albi, 81) propose un procédé de saponification qui peut être appliqué en amont de stations d'épuration des eaux usées ou en amont d'un méthaniseur (<https://www.sapoval.fr/procedes-brevete-saponification/>).

2.4.5. Biodéchets

Une particularité des biodéchets ou déchets alimentaires est la présence de matière facilement biodégradable. Pour optimiser la valorisation de ces déchets en biogaz, il convient de conserver cette matière afin de préserver le potentiel méthanogène (Parthiba Karthikeyan et al., 2018). Une équipe grecque a développé un prototype de séchoir à domicile. Ils ont montré la réduction de 70% de la masse des déchets. De plus, le glucose présent dans les déchets étudiés n'était pas dégradé pendant un stockage de 18 jours des déchets séchés alors qu'il est dégradé en environ 7 jours pendant leur stockage classique (Sotiropoulos et al., 2015). Les tests de potentiel méthanogène (BMP) ont montré des valeurs plus élevées pour les déchets séchés à 63°C par rapport au séchage à 83°C (Valta et al., 2019).

Les déchets peuvent également être préservés après broyage en cuve semi-étanche. Une étape de fermentation entraîne la baisse du pH et l'inhibition de l'activité de la majeure partie des microorganismes présents dans les déchets. La société Meiko (<https://www.meiko-green.fr/fr/>) propose les systèmes Waste Star/Biomaster qui permettent la collecte le broyage et le stockage jusqu'à 4 ou 8 semaines des biodéchets de restauration collective (Rousseau, 2020). La start-up française Bio-tank (Pont de Casse, 47) propose également des systèmes de stockage fermés limitant

les nuisances environnementales (odeurs, émissions de gaz à effet de serre) et les pertes de potentiel méthanogène (<https://www.biotank.fr/>).

Le procédé d'hydrolyse thermique Cambi développé pour améliorer la méthanisation des boues a également été appliqué aux déchets solides urbains. La première installation près de Lillehammer (Norvège) date de décembre 1999. Elle reçoit 14 000 t/an de déchets principalement composés de déchets alimentaires, déchets verts, papiers et couches ainsi que des déchets triés incorrectement (métaux, pierres, plastiques...). Le prétraitement des déchets consiste en un tamisage et une séparation des déchets les plus lourds. L'hydrolyse thermique entraîne une forte réduction de la viscosité des déchets, ce qui permet la séparation des déchets indésirables, tels que les plastiques. Un bilan réalisé sur l'installation montre que sur 1 000 kg de déchets en entrée, 380 kg sont rejetés. Les 620 kg restants produisent 150 kg de digestat et 100 m³ de biogaz à 60 % de méthane, les taux d'abattement sont supérieurs à 65 % pour la DCO, supérieurs à 70 % pour les matières organiques (Panter & Kleiven, 2005). L'installation Ecopro inaugurée en 2008 à Verdal (Norvège) comprend le procédé d'hydrolyse thermique Cambi en prétraitement de la codigestion de 17500 tonnes par an de biodéchets triés à la source, 12500 tonnes par an de boues d'épuration et de 15000 tonnes par an de déchets municipaux ou industriels, y compris des sous-produits animaux (). Une installation près de Oslo-Norvège traite 50 000 tonnes de déchets municipaux triés à la source ainsi que des déchets alimentaires industriels (PERLINK "<http://www.cambi.no>").

Une étude datant de 2013 a reporté les différentes pratiques industrielles de prétraitement des biodéchets triés à la source sur 17 méthaniseurs suédois (Bernstad et al., 2013). Des techniques très diverses sont reportées : d'une simple ouverture des sacs et déchiquetage à un procédé atypique incluant des opérations de déchiquetage, macération (pulping), dispersion, tamisage (screen disc) et séparation basée sur les différences de densité. Ce dernier procédé implique la plus forte consommation énergétique (84 kWh/tonne déchet en entrée), nécessite 1,1 m³ d'eau par tonne de déchets et conduit à 19% de refus. Toutefois les procédés les plus utilisés étaient la presse à vis et le tamisage. Sur les 17 méthaniseurs, les refus représentaient 2 à 45 % avec une moyenne de 20 %. Des problèmes de qualité de la biomasse pour la méthanisation et des coûts de maintenance élevés étaient souvent reportés. Une étude de cas sur quatre méthaniseurs a permis d'estimer une perte de 14 à 36 m³ CH₄/t déchets triés à la source (9 à 28 % du potentiel total) dans les refus dont des valeurs de 400 à 432 m³/t_{MVS} ont été mesurées. De même, 13 à 32 % de l'azote total étaient écartés. Les pertes en matières organiques biodégradables et azote étaient plus importantes avec les technologies à filtre presse qu'avec celles à dispersion (Bernstad et al., 2013).

D'un point de vue des performances du déconditionnement des biodéchets et de la qualité de la pulpe en sortie, l'étude ADEME « Les solutions de déconditionnement des biodéchets emballés et leurs performances », 2021, montre qu'une solution exclusivement technique ne permet pas d'atteindre un objectif d'élimination totale des indésirables (plastiques de petites dimensions notamment). La sensibilisation des producteurs pour un meilleur tri en amont serait une solution à envisager.

Divers prétraitements mécaniques ont été appliqués à l'échelle pilote sur les FFOM mais sans forcément comparer les résultats de méthanisation avec des déchets non prétraités (Annexe 6). Notamment, Novarino and Zanetti (2012) ont utilisé une extrudeuse alors que Micolucci et al. (2016) ont prétraité les FFOM avec une presse et seule la fraction liquide a été méthanisée alors que la fraction solide a été valorisée par compostage.

A l'échelle du laboratoire, les traitements thermiques ont été associés à des procédés de séparation avec différents objectifs. Gianico et al. (2021) ont proposé une centrifugation de déchets de cafétéria stérilisés, seule la fraction solide a été méthanisée, la fraction liquide ayant été fermentée pour la production d'AGV. Les auteurs reportent une augmentation de 19% de la production de méthane par rapport à la production issue de la fraction solide des déchets non stérilisés. Dans une autre étude, Zhang et al. (2018a) ont éliminé, après stérilisation, la fraction grasseuse (33%) de déchets de cantines. La production de méthane ainsi obtenue a été équivalente à celle des déchets non dégraissés, mais avec une meilleure stabilité du réacteur. Dans cette même étude, l'ajout de bentonite dans le méthaniseur a conduit à 22% d'augmentation de la production de méthane.

Le prétraitement aérobie a été testé à l'échelle du laboratoire pour améliorer la biodégradation de la matière organique lors du procédé de méthanisation. Cette technique a notamment été expérimentée à l'échelle pilote sur la fraction organique des déchets solides municipaux ; une augmentation de la production de méthane de 73% a été obtenue après un traitement aérobie d'une durée de 24 h et utilisant un compost comme inoculum (Fernandez.-Güelfo et al., 2011). Par ailleurs, Mata-Alvarez et al. (1993) ont réalisé un « pré compostage » jusqu'au pré-échauffement de la fraction fermentescible des ordures ménagères d'une durée inférieure à une semaine. Selon la charge organique et le temps de séjour appliqués au digesteur, les résultats ont montré soit une augmentation (+23%) ou une réduction (-11%) de la production de méthane. Il convient de noter que les traitements aérobies

doivent être optimisés de manière à limiter la consommation de matière organique facilement biodégradable. Físgativa et al (2018) ont appliqué un prétraitement aérobie de déchets alimentaires en amont de leur méthanisation en réacteur batch afin de limiter la production d'AGV au démarrage du réacteur. Le BMP a été maintenu après 2 jours d'aération mais a significativement diminué après 4 jours de prétraitement (Físgativa et al., 2018b). Sur des essais de méthanisation en voie solide dans des réacteurs discontinus à recirculation de lixiviat, un prétraitement aérobie de 2 jours a conduit à une réduction de la production de méthane par rapport aux déchets frais mais une augmentation par rapport à celle de déchets stockés dans une fiole ouverte mais non aérés (Físgativa et al., 2019). Finalement, des essais d'oxydation en voie humide (10-15 min à 185°C sous 12 bars d'oxygène) se sont révélés inefficaces pour améliorer le rendement en méthane de biodéchets mais ont conduit à une amélioration de 31% de la production de biogaz issue de la fraction solide de leur digestat (Lissens et al., 2004).

2.4.6. Plastiques biodégradables

La collecte sélective des biodéchets à l'horizon 2024 va générer de nouveaux flux de matière organiques pour la filière méthanisation. En parallèle, un développement croissant de supports plastiques biodégradables (barquette, sac de collecte, capsule café) est observé ces dernières années (Abraham et al., 2021; Batori et al., 2018). Ce fort développement fait que les gisements de biodéchets seront certainement mélangés avec des supports en plastiques biodégradables. En effet, aujourd'hui la collecte sélective des biodéchets nécessite le plus souvent la mise en place de sac de collecte permettant de réduire les odeurs, éviter la lixiviation des jus et faciliter la logistique (Dolci et al., 2021). Toutefois, aujourd'hui peu d'informations sont disponibles sur le devenir des supports de plastiques biodégradables en filière méthanisation. Aujourd'hui, le marché des plastiques biodégradables est surtout composé d'un mix de PLA (acide polylactique), PCL (polycaprolactone), PHA (polyhydroxyalcanoate) et TPS (amidon thermoplastifié) (Boey et al., 2021). Un état des connaissances sur la dégradation des plastiques biodégradables en méthanisation a été réalisé en 2018 (Bátori et al., 2018) et les auteurs précisent que des plastiques biodégradables peuvent être biodégradés avec un temps de séjour de 15-30 jours dans un réacteur de méthanisation. C'est le cas du PHB (polyhydroxybutyrate), de l'amidon, de la cellulose et de la pectine. Un ordre général d'augmentation du taux de biodégradation des plastiques biodégradables dans ces conditions, est le suivant : PHB > PCL > PLA. Cependant, un taux de dégradation significatif n'est pas atteint pour le PCL et le PLA avec ce temps de séjour. Afin d'optimiser les cinétiques de biodégradation, des prétraitements de type mécaniques, thermiques, chimiques et biologiques (Carlsson et al., 2012; Carrère et al., 2016) peuvent être utilisés pour faciliter la dégradation du matériau et ainsi augmenter la surface de contact avec les bactéries. Ainsi, afin d'améliorer la biodégradabilité de ces plastiques en filière méthanisation, différentes technologies de prétraitement ont été étudiées (Battista et al., 2021; Benn & Zitomer, 2018; Ryan et al., 2017). Jusqu'à présent la plupart des prétraitements ont été testés à l'échelle du BMP et une seule étude s'est intéressée à l'impact d'un prétraitement alcalin (55°C, pH = 12, 24-48h) sur du PHB co-digéré avec des boues primaires (Benn and Zitomer, 2018). Benn and Zitomer (2018) ont notamment démontré que le prétraitement permettait d'améliorer la biodégradation (de 5-6%) du PHB sans affecter les performances de la méthanisation.

Le prétraitement mécanique consiste généralement en un broyage, déchiquetage, extrusion ou cavitation et est largement appliqué dans les installations de biogaz existantes (Carrère et al., 2016; Monlau et al., 2012). Yagi et al. (2009) ont étudié l'impact de la réduction de la taille des particules sur la biodégradabilité anaérobie du PCL. Les résultats n'ont pas montré de différence dans la biodégradation de la poudre PCL (après 60 jours d'incubation) pour les différentes distributions de tailles de particules (0-250 µm, 250-500 µm, 0-125 µm, 125-250 µm), avec un taux de dégradation de 80 à 90 % (Yagi et al., 2009). Cependant, la réduction de la taille des particules a un effet positif sur la cinétique de biodégradation et la petite taille des particules induit une cinétique de dégradation plus rapide. Ryan et al. (2017) ont étudié l'impact de la taille des particules (de 10 µm à 3900 µm) sur la biodégradabilité anaérobie du PHBV. Pour toutes les granulométries testées, une production de méthane autour de 580 ± 12 mL / g, correspondant à une biodégradabilité de 86 ± 2%, a été mesurée. Néanmoins, en dessous de 840 µm, une phase de latence plus élevée a été observée car la méthanogénèse a probablement été temporairement inhibée en raison de la diminution du pH attribuée à l'accumulation des acides gras volatils et à l'acidification du réacteur qui en résulte par une hydrolyse plus rapide des plastiques biodégradables de petite taille.

Les prétraitements thermiques et thermochimiques ont également été étudiés pour la dégradation des plastiques biodégradables (Benn & Zitomer, 2018; Hobbs et al., 2019; Vargas et al., 2009). Vargas et

al. (2009) ont étudié l'impact du prétraitement à la vapeur (3 h, 120°C) sur la digestion anaérobie du PLA dans des conditions mésophiles et thermophiles. Dans des conditions mésophiles, la quantité de méthane produite (exprimée en Normo Litre : NL) a été améliorée de 2 NL CH₄ kg⁻¹ MS à 90 NL CH₄ kg⁻¹ MS tandis qu'en conditions thermophiles, le potentiel de méthane a été augmenté de 187 NL CH₄ kg⁻¹ MS à 225 NL CH₄ kg⁻¹ MS. Benn and Zitomer (2018) ont testé la dégradation de plastiques biodégradables (1 PLA, 4 PHB) prétraités thermiquement (35 - 90°C pendant 3 à 48h) et/ou chimiquement (pH 8 à 12 pendant 3 à 48h) dans le but d'augmenter la surface disponible pour les bactéries méthanogènes. Les plastiques biodégradables sont méthanisés dans l'inoculum (digestat) sans apport de co-substrat et l'efficacité de la dégradation est évaluée via le potentiel méthanogène obtenu à partir de chacun de ces plastiques, sans ou avec prétraitement. L'application de température supérieure à 55°C, à des pH supérieurs à 10 et à des durées de traitement supérieures à 24h favorise significativement la dégradation des plastiques biodégradables (potentiel méthanogène multiplié par 2, voire plus pour le PLA qui est très mal dégradé sans prétraitement). Hobbs et al. (2019) ont étudié l'impact du prétraitement alcalin (21°C, pH> 11, 15 jours) pour améliorer le potentiel méthane du PLA cristallin et amorphe en co-digestion avec les déchets alimentaires. Ce PLA a atteint une solubilisation presque complète à 97% et 99%, respectivement, lorsque le prétraitement alcalin a été appliqué. Benn et Zitomer (2018) ont également étudié l'impact du prétraitement alcalin (35-55°C, pH=10-12, 24-48h pour améliorer le potentiel méthane dans des conditions mésophiles de divers PHA et PLA. Pour tous les polymères testés, un prétraitement alcalin a permis d'améliorer le potentiel de méthane, en particulier pour le PLA pour lequel le potentiel méthane est passé de 1 NL CH₄ kg⁻¹ MO à 86 NL CH₄ kg⁻¹ MO (Benn & Zitomer, 2018).

2.4.7. Algues

2.4.7.1. Les microalgues

Le nombre de publications traitant des microalgues est en constante augmentation ces dernières années montrant l'intérêt qu'elles suscitent pour la communauté scientifique. Cet intérêt s'appuie sur leur productivité surfacique élevée, leur capacité à produire des composés d'intérêt et leur consommation de dioxyde de carbone.

Les domaines de l'environnement dans lesquelles elles peuvent être d'intérêt sont très variés. Elles sont utilisées pour le traitement de l'air et en particulier la capture du CO₂ des rejets canalisés (type cimenteries) ou diffus dans les centres villes. Au niveau du traitement de l'eau, leur faculté à consommer les nutriments (N, P, etc.) est bien connue, mais d'autres domaines sont étudiés comme l'élimination des antibiotiques ou des métaux lourds. La production d'énergie (hydrogène, méthane, diesel, éthanol) à partir des microalgues fait aussi l'objet de nombreuses recherches. Les algues ont également un intérêt dans de nombreux autres domaines pour produire des denrées alimentaires, des aliments pour animaux ou des produits à forte valeur ajoutée (cosmétique, pharmaceutique, chimie comme les pigments, les biopolymères et la chimie fine).

La digestion anaérobie pourrait être une option pour intégrer les microalgues dans un cycle vertueux permettant de valoriser :

- les microalgues utilisées en remédiation de l'air ou de l'eau,
- les résidus de microalgues résultant d'une valorisation en énergie ou production de produits à forte valeur ajoutée.

Cependant, la biodégradabilité anaérobie des microalgues est limitée par la structure complexe de leur paroi cellulaire (Passos & Ferrer, 2014). *Chlorella*, *Scenedesmus* et *Nannochloropsis* sp. présentent une paroi cellulaire, à base de polysaccharides, particulièrement résistante (Carrere et al., 2016; G'nzález-Fernández et al., 2012). D'autres espèces, telles que *Chlamydomonas* sp., ont une structure de paroi cellulaire plus facilement biodégradable de type glycoprotéique avec un manque de cellulose (Passos & Ferrer, 2014). Il existe aussi des espèces dépourvues de paroi cellulaire telles que *Dunaliella salina* (Carrère et al., 2016).

Une digestion en mono-substrat pourra être pénalisée par des ratios C/N faibles qui peuvent être à l'origine d'inhibition à l'azote (Klassen et al., 2017).

Différents prétraitements ont été testés à l'échelle du laboratoire pour améliorer l'accessibilité de la matière organique présente à l'intérieur des cellules des microalgues. Les données disponibles sur les performances des prétraitements testés sont issues d'essais réalisés à l'échelle laboratoire ou pilote

(en batch ou continu), en effet aucune application n'est à notre connaissance en opération à l'échelle industrielle (Annexe 7).

Comparaison des prétraitements pour augmenter la biodégradabilité anaérobie des microalgues

Les données disponibles sur la comparaison des performances dans la littérature à l'échelle pilote sont représentées sur la Figure 31.

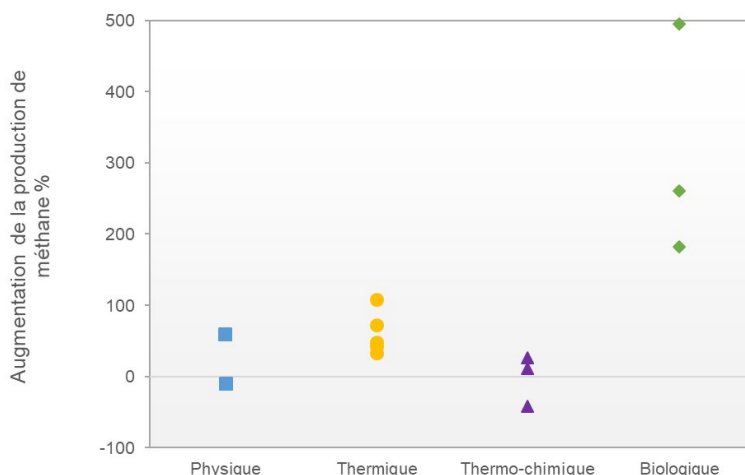


Figure 31 : Performances des prétraitements pour augmenter la production de méthane des microalgues (données issues d'essais pilote) (Compilation RECORD 2022)

L'efficacité des prétraitements des microalgues a été largement étudiée à l'échelle BMP mais peu de données sont disponibles pour des digesteurs fonctionnant en continu. Les performances peuvent être élevées à l'exemple des résultats obtenus pour les prétraitements enzymatiques (Mahdy et al., 2016; Mahdy et al., 2015). Les prétraitements thermiques ont aussi permis d'atteindre de bonnes performances (Kinnunen et al., 2014; Mendez et al., 2015; Passos & Ferrer, 2015; Passos & Ferrer, 2014; Schwede et al., 2013) avec des augmentations de production de méthane comprises entre 32 et 108%. Seule une étude mettant en œuvre une digestion en continue s'est intéressée au prétraitement des microalgues cultivées en milieu salin (Schwede et al., 2013). Une accumulation d'AGV avait été mesurée en raison de concentrations élevées en ammonium et sels entraînant une diminution des performances.

2.4.7.2. Les macroalgues

La digestion anaérobie des macroalgues est peu appliquée à l'échelle industrielle (cf. 3.2.6). Elle fait en revanche l'objet de plusieurs projets de recherche.

Le projet ANR SAVE (2020-2023) : Valorisation agro-énergétique des Sargasses – SAVE coordonné par Stéphane Pacaud de l'ENSAIA. Ce projet s'intéresse au stockage (classique, ensilage) et au prétraitement des sargasses avant méthanisation (Pacaud, 2021). Les tests de stockage visent à déterminer les meilleures stratégies pour conserver la matière malgré les taux élevés d'humidité et la présence de sel qui peut être pénalisante pour l'ensilage. Des prétraitements de type lavage, broyage et séchage seront étudiés. Des pilotes de laboratoire (digesteur chemostat) permettront d'évaluer l'efficacité de ces prétraitements. La co-digestion des sargasses avec des déchets agro-industriels produits aux Antilles sera étudiée pour s'affranchir des principaux verrous liés à leur digestion : production saisonnière, présence d'inhibiteurs (sels) et de polluants (chlordécone, cadmium).

Le projet COASTAL, 2014-2020 (Gimžauskaitė et al., 2020)

Ce projet, financé par un programme Interreg du sud de la Baltique (fonds européens) a étudié la digestion des algues de la mer Baltique pour contrer les conséquences de l'eutrophisation. Des essais ont été menés à l'échelle pilote en Suède (Smyge). Le pilote était constitué de 2 réacteurs de digestion de 150 m³, d'un tampon, d'un filtre pour le biogaz et d'une chaudière. Le pilote a été opéré

pendant 1,5 ans (2016-2017). Différentes techniques de ramassage des algues ont été testées sur la plage ou en mer. Aucune ne permet de collecter des algues exemptes de sables. Des essais de tamisage ont été réalisés pour l'éliminer. La maille qui a permis d'obtenir les meilleurs résultats était celle de 20 mm. Un double tamisage a permis de réduire de 90% la quantité de sable présente. Les inconvénients avancés pour ce prétraitement sont les coûts d'autant plus élevés que le nombre de cycles de tamisage augmente et le fait qu'il ne permet pas d'éliminer la totalité du sable présent. Concernant les essais de méthanisation à l'échelle pilote, les premières études avaient montré que la digestion des algues causait une instabilité de la biologie en raison de la présence d'hydrogène sulfuré ce qui nécessitait d'injecter du chlorure de fer. Pour s'affranchir de cette difficulté et améliorer les rendements de production, la nouvelle phase d'essais s'est intéressée à la co-digestion des algues avec différents déchets municipaux (résidus de tomates, tontes, fumier équin et résidus de betterave à sucre. Ces essais ont montré que la co-digestion des macroalgues permettait d'obtenir des performances de digestion satisfaisantes.

Ces projets montrent les difficultés liées à la digestion des macroalgues. Le ramassage des algues doit se faire de manière à réduire au maximum la présence de sable collecté. Aucun système ne donne toutefois complète satisfaction (Gimžauskaitė et al., 2020).

Des systèmes de tamisage ou de cuve agitée peuvent aussi être appliqués en prétraitement pour limiter l'introduction de sable dans le digesteur (Gimžauskaitė et al., 2020). Le lavage des algues marines à l'eau douce est une option pour réduire la quantité de sable et de sel entrant dans le digesteur mais cela ne permettra pas d'éliminer le sel présent à l'intérieur des cellules. De plus, cette étape de lavage induira un process complémentaire et des coûts d'investissement et de fonctionnement supplémentaires.

Concernant le stockage, les travaux réalisés dans le cadre du projet ANR SAVE permettront d'identifier les techniques les plus conservatives pour stocker les algues après les périodes d'échouage et lisser leur digestion dans le temps. La mono-digestion de macroalgues a conduit à des dysfonctionnements biologiques importants lors des essais menés par l'INRAE (INRAE Transfert Environnement, 2018) et ceux réalisés dans le cadre du projet Coastal (Gimžauskaitė et al., 2020). Les sels et l' H_2S avaient été identifiés comme les principaux inhibiteurs. La réduction de l'effet inhibiteur des algues (sel, soufre) dans le digesteur peut se faire en premier lieu par la co-digestion qui permet de rétablir des conditions favorables à la biologie (ratio C/N, C/S, concentrations en sels et polluants) et assure une continuité des apports pendant les périodes de faible production algale.

Volet 3 : Retours d'expériences terrain sur l'application de technologies de stockage et prétraitements

3.1 Méthodologie mise en œuvre

Le retour d'expérience des exploitants de dispositifs de prétraitement de la matière sont indispensables à la bonne compréhension des enjeux, notamment sur le développement de nouvelles technologies permettant de répondre aux attentes actuelles. De nouveaux intrants difficiles (résidus de culture, biodéchets, graisses, déchets d'abattoirs et de tannerie) sont aujourd'hui traités par le biais de la méthanisation et les systèmes de préparation de la matière ne semblent pas toujours adaptés. Les enquêtes terrain permettent de mettre en évidence ces manquements et ouvrent des voies à la recherche et au développement de nouveaux dispositifs mieux adaptés.

La méthodologie mise en place est la suivante :

- Entretien avec 20 exploitants d'unités de méthanisation agricole, territoriale et de STEP ayant un dispositif de prétraitement ;
- Entretien avec des constructeurs et fournisseurs d'équipements (entre 10 et 20) ;
- Synthèse des retours et croisement des informations reçues.

En ce qui concerne les exploitants d'unités en fonctionnement, les démarches suivantes ont été entreprises :

- Réalisation d'une liste d'unités agricoles, territoriales et de STEP avec systèmes de prétraitements variés ;
- Création d'un questionnaire d'enquête en ligne à destination des exploitants ;
- Diffusion ciblée du questionnaire dans un premier temps auprès de contact couplé à un entretien téléphonique de 30 min à 60 min ;
- Diffusion élargie du questionnaire via les réseaux d'exploitants.

En ce qui concerne les constructeurs et les fournisseurs, les démarches suivantes ont été réalisées :

- Entretien téléphonique ;
- Demande de contacts références afin de pouvoir contacter les utilisateurs de leurs technologies (conservateurs d'ensilage, broyeurs, préfosse...).

Tableau 17 : Données recueillies dans le cadre des enquêtes d'acteurs (Compilation RECORD 2022)

Catégories de données recueillies	Précisions apportées
Gisement de matière	Fumier mou ou pailleux, lisier, ensilage, pailles, menues-pailles, cannes de maïs, lactosérum, déchets d'agro-industries, biodéchets, boues de step...
Technologie de prétraitement	Broyeur/défibreux (en ligne, déporté, sec, humide)
	Pré-fosse de mélange (cuve d'hydrolyse) de quel type (agitation, pompe hacheuse, aérobie, anaérobie)
	Hygiénisateur
	Extrudeur
	Conservateur d'ensilage...
Matières prétraitées	Fumiers, pailles, déchets IAA, biodéchets....
Forces du système	Production de biogaz
	Qualité du biogaz
	Diminution temps de séjour
	Moins de casse matériel
	Moins de croûte
	Moins de mousse
	Moins de consommation électrique...
Faiblesses du système	Augmentation consommation électrique
	Prix d'achat de l'équipement
	Frais de maintenance
	Augmentation du temps de travail...
Investissement	k€
Charges annuelles	k€/an
Niveau de satisfaction du système	Oui, plutôt oui, neutre, plutôt non, non

3.2 Retours d'enquêtes terrain

3.2.1 Déjections animales

- Extraction d'azote

La société Xergi rachetée par Nature Energy (Danemark) a développé le procédé NiX® d'Extraction à l'azote pour prétraiter les matières qui présentent des concentrations élevées en azote. Le procédé breveté prétraite thermo-chimiquement la matière (pH 10 avec apport de chaux, 160°C, 6 bars) pour réduire la teneur en azote de l'intrant et améliorer la dégradation de la matière. L'ammoniac strippé est converti en sulfate d'ammonium par lavage à l'acide sulfurique. La matière est ainsi hygiénisée et produirait 25% de biométhane supplémentaire par rapport à la matière non traitée (DANETV, 2010; Fink, 2019). Deux unités ont été installées, l'une au Danemark pour prétraiter la fraction solide de lisiers, l'autre en Irlande du Nord pour la méthanisation de fientes de volaille (40 000 t/an) en mono-digestion.

- Pré-compostage

Une unité de méthanisation en voie sèche discontinue (garage) traite du fumier, des résidus agricoles (menues paille, maïs ensilage, poussières de céréales) et déchets d'abattoir. Des essais ont été réalisés par l'exploitant pour évaluer l'intérêt du broyage (retourneur d'andain et broyeur à compost) en amont des digesteurs. L'absence de broyage avant l'incorporation induit 3 phénomènes contraignants :

- Pas de montée en chaleur donc consommation importante de chaleur pour monter à 37°C
- Démarrage de la réaction de méthanisation longue
- Moins de production de biogaz

Le retourneur d'andains demande une surface de prétraitement très importante pour pouvoir produire un andain suffisamment important. Le broyeur à compost permet de broyer plus finement la matière que le retourneur d'andains réduisant la durée nécessaire du pré-compostage à 1 semaine contre 2 semaines pour limiter les pertes de matières.

D'après l'exploitant, ces deux pratiques permettent une montée en température de la matière (> 40°C) avant introduction dans le méthaniseur, une augmentation de la production de biogaz et de la cinétique de production.

Suite à ces essais, l'exploitant recommande de réaliser un broyage pour les fumiers pailleux. L'investissement s'élève entre 75 et 150 k € (retourneur d'andain ou broyeur à compost).

3.2.2 Résidus agricoles et productions végétales

Broyage et défibrage

Différents dispositifs de broyage et de défibrage sont retrouvés sur les unités de méthanisation en fonctionnement en France et ailleurs en Europe. Ces équipements sont disposés en ligne dans la chaîne de traitement de l'unité ou de façon déportée. Les broyeurs et défibreurs sont de plus en plus généralisés chez certains constructeurs qui souhaitent s'affranchir des problématiques d'introduction et de traitement de la matière. Pour autant, bien que ces derniers présentent de multiples avantages, ils peuvent également devenir une source de contraintes ou de charges pour l'exploitant de l'installation.

- Le broyeur à couteaux

Parmi les retours d'expérience obtenus, le broyeur à couteaux de type PréMix proposé par la société Vogelsang est installé sur un nombre important d'unités, notamment du fait qu'il est proposé en équipement standardisé par plusieurs constructeurs d'unités de méthanisation agricole clés en mains. Le PréMix est retrouvé sur des installations traitant des matières complexes tels que des fumiers pailleux et des pailles maïs également pour des matières ensilées telles que des Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique. L'intérêt de cet équipement pour des cultures ensilées

finement (brins < 30 mm de longueur) peut poser questions étant donné le caractère haché de la matière première. Il apparaît en effet qu'un nombre important d'installations incorporent des matières ensilées sans passer par un système de prétraitement additionnel, sans pour autant présenter un fonctionnement diminué de leur unité de digestion. Les Prémix disposent d'un piège à cailloux limitant fortement leur intégration dans les digesteurs. Le sable n'est cependant pas retenu par ce système.



Figure 32 : Photo de broyeur à couteaux avec récupérateur de cailloux (SOLAGRO, 2021)

Pour un des exploitants contactés, le Prémix a été installé après deux années de fonctionnement, lui permettant de comparer un avant et un après et d'en tirer les bénéfices et les inconvénients.

Les principaux bénéfices de cet équipement avancés par les exploitants sont les suivants :

- Réduction de la croûte en surface des cuves de digestion ;
- Diminution de la casse d'agitateurs ;
- Diminution du temps de maintenance sur la ligne de digestion, et ainsi de pertes de revenus liées à d'éventuelles interventions ;
- Diminution de la quantité d'indésirables (cailloux, ferrailles, bouts de bois...) en digestion ;
- Augmentation de la cinétique de production de biométhane (il s'agit d'un ressenti qui n'est cependant jamais réellement mesuré) ;
- Concentration des problèmes techniques en un seul point de l'installation au niveau du broyeur, permettant de s'affranchir de contraintes mécaniques liées au gisement en aval dans la ligne de digestion.

Les principales limites de cet équipement avancées par les exploitants sont les suivantes :

- Coût d'investissement : entre 70k€ et 110 k€ en moyenne ;
 - Charges de maintenance et remplacement des couteaux : 5k€/an en moyenne ;
 - Charges liées à la consommation électrique : 2k€/an en moyenne pour un modèle 30 kW fonctionnant 3h/jour.
- Le broyeur à marteaux

Le broyeur à marteaux est principalement retrouvé sur des unités traitant des matières très complexes (fumiers pailleux, pailles de céréales, cannes de maïs, racines d'endives, radicales de betteraves, potirons entiers...). Il est réputé plus efficace que le broyeur à couteaux pour le prétraitement de matières fibreuses et sèches. Les broyeurs à marteaux sont généralement proposés avec des puissances plus élevées que les broyeurs à couteaux, avec des modèles standards de 75 kWe et de

90 kWe pour le prétraitement de matière organique avant méthanisation. Les exploitants contactés possèdent tous des broyeurs Bio-Grinder de la société BHS. Ces dispositifs sont installés sur des unités en voie liquide et solide continue.



Figure 33 : Photo de broyeur à marteaux BHS (SOLAGRO, 2021)

Les principaux bénéfices du broyeur à marteaux avancés par les exploitants sont les suivants :

- Réduction de la croûte en surface des cuves de digestion ;
- Diminution de la casse d'agitateurs ;
- Diminution des phénomènes de bouchons dans les canalisations coudées ;
- Diminution du temps de maintenance sur la ligne de digestion, et ainsi de pertes de revenus liées à d'éventuelles interventions ;
- Bonne acceptation des cailloux qui sont également broyés ;
- Concentration des problèmes techniques en un seul point de l'installation au niveau du broyeur, permettant de s'affranchir de contraintes mécaniques liées au gisement en aval dans la ligne de digestion.

Les principales limites de cet équipement avancées par les exploitants sont les suivantes :

- Coût d'investissement : 100 k€ minimum ;
- Charges de maintenance et remplacement des marteaux et du rotor : 8-10k€/an en moyenne. Un marteau a un coût moyen de 175 €/unité.
- Charges liées à la consommation électrique : 15k€/an en moyenne pour un modèle 75 kW fonctionnant 8h/jour.

- Le broyeur à chaînes

Le broyeur à chaînes est robuste et fiable. Il est installé pour le broyage de matières fibreuses. Une unité de méthanisation a été contactée pour recueillir leur retour d'expérience sur l'utilisation d'un broyeur à chaîne TQZ 1200 de Verde Energy (8 à 10 t/h). Ce broyeur est utilisé pour le prétraitement de fumier bovin pailleux, CIVE, ensilage d'herbe et déchets de pomme. Les cailloux présents dans les intrants sont désagrégés lors de leur passage dans le broyeur. La matière broyée est introduite dans

une pré fosse de mélange (lisier ou digestat) avant pompage vers le digesteur en voie liquide mésophile. Cette pré-fosse permet de retenir la ferraille et des petits cailloux avant l'introduction de la matière dans le digesteur. Le broyeur est installé depuis 2,5 ans ce qui permet d'estimer les coûts de fonctionnement. Les coûts de maintenance sont estimés à 1 500 €/an pour le changement de la paire de chaînes (150 € la paire à changer tous les 2 mois) et le remplacement de la toile de renfort en acier (1 200 € tous les 2 ans), ceci pour un temps de fonctionnement de l'ordre de 3h/jour. Le coût d'investissement est de l'ordre de 98 000 € (donnée Verde Energy). Le broyeur donne satisfaction à l'exploitant. Il permet de protéger les pompes et prévient les bouchages du pendillard qui est utilisé pour épandre le digestat brut. Aucun problème de croûtage ou de flottation de matière n'est constaté dans le digesteur.



Figure 34 : Photo de broyeur à chaînes TQZ (THM recycling solutions, 2021)

- Le broyeur forestier déporté

Le broyeur forestier est une solution privilégiée par certains exploitants qui ne souhaitent pas avoir de dispositif de broyeur en ligne, pouvant pénaliser le fonctionnement de l'installation en cas de panne. Le broyeur forestier est un système mobile déporté utilisé principalement dans le cadre du broyage de déchets verts. Il est adapté sur certaines unités de méthanisation pour le broyage de fumier et de résidus de culture. Il est réputé particulièrement robuste mais n'est pas adapté pour les fumiers mous. Les modèles retrouvés lors des entretiens sont de la marque Hantsch et Menart. Ils sont retrouvés principalement en version diesel mais existent également en version électrique ou raccordés derrière à un tracteur.



Figure 35 : Photo de broyeur à déchets verts Hantsch Willibald Mini-Shark (SOLAGRO, 2021)

Les principaux bénéfices du broyeur forestier avancés par les exploitants sont les suivants :

- Peu d'entretien quotidien ;
- Diminution des phénomènes de bouchons dans les canalisations coudées ;
- Diminution du temps de maintenance sur la ligne de digestion, et ainsi de pertes de revenus liées à d'éventuelles interventions ;
- Concentration des problèmes techniques en un seul point de l'installation au niveau du broyeur déporté, permettant de s'affranchir en partie de contraintes mécaniques liées au gisement sur la ligne de digestion.

Les principales limites de cet équipement avancées par les exploitants sont les suivantes :

- Coût d'investissement : 100 à 150 k€ minimum neuf selon les modèles ;
- Charges de maintenance : 1€20/tonne traitée selon le constructeur ;
- Entretien pluriannuel coûteux : remplacement et réglage des couteaux et mise à l'arrêt du broyeur pendant plusieurs jours.

- Le GasMix

L'université Aarhus au Danemark a évalué l'impact du GasMix sur plusieurs unités de méthanisation. Les résultats de cette étude ont été présentés par Landia en 2015 au workshop annuel organisé par l'IBBA (Inter Baltic Biogas Arena).

Le suivi d'une unité agricole (lisier bovin, porcin, fumier en ensilage de maïs) a montré que la viscosité du digestat non équipé du Gasmix était supérieure de 46% à celui équipé (Thorkild, 2015).

Une seconde unité agricole (lisier, litière, glycérol, déchets agricoles variés) a fait l'objet d'un suivi. La production de méthane était supérieure de 11% pour le digesteur équipé d'un GasMix tout en améliorant le mélange de la partie haute du digesteur (couche flottante). L'effet positif du GasMix était plus marqué pour le prétraitement des matières lignocellulosiques avec une réduction de la taille des particules et de la cristallinité de la cellulose (Thorkild, 2015).

La société néerlandaise Host commercialise un procédé de recirculation du digestat avec broyeur intégré (HoSt Ruminator System) pour empêcher la formation de croûte en surface et améliorer la digestion. Une unité agricole est ainsi équipée en Ille-et-Vilaine.

- Cavitation

La dernière unité française de cavitation BioBANG® a été installée en mars 2021 sur l'unité de méthanisation Reims Biométhane (Figure 36). Cette unité de 700 Nm³/h est équipée de deux digesteurs primaires et d'un post-digesteur. Les intrants comprennent des oignons, betteraves, paille et ensilage de maïs à raison de 50 t/j. Le BioBANG® de 2 m³/h fonctionne en continu en recirculation sur l'un des deux digesteurs primaires (Biobang, 2021).



Figure 36 : Photo du système Biobang® installé sur l'une unité de méthanisation Reims Biométhane (Biobang, 2021).

Les bénéfices visés sont une réduction de la viscosité du digestat permettant d'optimiser les consommations énergétiques liées à l'agitation et au pompage (Biobang, 2021). Des augmentations de production de biogaz sont aussi attendues en raison de l'amélioration de l'accessibilité de la matière et de l'augmentation possible du taux de MS de la ration (Biobang, 2021).

- Les produits de conservation

Trois sociétés (Lallemand, Schaumann et Roullier) proposant des conservateurs d'ensilage et des produits de conservation de matières végétales (acides) ont été contacté dans le cadre de cette étude. Les produits proposés sont des inoculants (bactéries lactiques homo et hétérofermentaires) et des conservateurs chimiques (produits acides tamponnés à l'ammoniac ou à l'eau). Ce marché est très développé en Allemagne en 2021 mais encore très récent en France. Environ 80% des éleveurs produisant de l'ensilage en Allemagne ont recours à des inoculants, alors qu'en France ils ne représentent que 20% d'entre eux. Concernant les ensilages à destination de la méthanisation, la grande majorité des unités allemandes ajoutent des inoculants quand en France ils sont cinquantaine à le faire en 2021.

L'utilisation de produits de conservation s'expliquent par trois grandes problématiques rencontrées par les exploitants :

- Une perte moyenne d'origine fermentaire constatée en ensilage de l'ordre de 10 à 15% de matière sèche en tonnage sur un silo. Cette perte peut être supérieure dans le cas d'écoulement de jus d'ensilage ;
- Une contamination possible des matières par des levures et des champignons ;
- Une montée en température du front d'attaque induisant une diminution du potentiel méthanogène.

Les bénéfices annoncés par ces trois sociétés sont les suivants :

- Une perte de matière sèche en tonnage réduite de 5 à 10% ;
- Une production d'acide acétique, accélérant l'étape d'acétogénèse en digestion. Cet acide augmente également la stabilité aérobie et diminue les pertes du pouvoir méthanogène sur le front d'attaque (maintien le front d'attaque à une température inférieure à 20 °C) ;
- Une production de propylène glycol avec une disponibilité énergétique importante ;
- Un effet concurrentiel des inoculants avec des souches produisant des molécules inhibitrices.

Le coût moyen des inoculants est de 1,5 €/t matière brute traitée (entre 1,2 et 2 €/tonne selon les fournisseurs). Le rapport investissement sur gain annoncé par les producteurs d'inoculants est de 1 pour 5.

Le coût moyen des acides est de 4 €/tonne de matière brute traitée. Bien que leur prix soit plus élevé, ils sont les seuls adaptés pour la conservation de produits très secs (menues-pailles, poussières de céréales...) pour lesquels la conservation par ensilage est impossible. Il est donc conseillé d'opter pour des inoculants pour des matières solides avec un taux de matière sèche inférieur à 45% et pouvant être ensilé (taux de sucre disponible suffisant), et de privilégier les conservateurs acides (ou basiques) pour les intrants solides très secs ne pouvant pas être ensilés.

La couverture des silos avec une bâche est conseillée par les fournisseurs de conservateurs d'ensilage. L'absence de couverture ou l'ajout d'un couvert végétal induiraient selon eux des pertes non négligeables jusqu'à un mètre de profondeur en partie supérieure du silo.

3.2.3 Boues de stations d'épuration

- Élimination des filasses

Les sites sont, pour partie, équipés de broyeurs ou de tamis fin pour l'élimination des filasses des boues, problématiques pour la filière de traitement. Le tamis à boues sous pression (Strainpress®) de la société Huber Technology donne généralement satisfaction auprès des exploitants malgré des coûts d'investissement et de fonctionnement élevés. Il pourrait toutefois diminuer la déshydratabilité des boues (Falipou et al., 2020).

- Amélioration de la biodégradabilité des boues et de la déshydratabilité des digestats

Des prétraitements sont installés sur les boues en amont du processus de méthanisation pour un peu plus de 10% des unités de méthanisation de STEP en France (Falipou et al., 2020). Ces traitements sont de type :

- Hydrolyse thermique à haute température : 7 STEP équipées et 1 unité en cours d'installation,
- Sonication (ultrasons) : 4 unités équipées. Le système Biopush de Weber Entec sera prochainement installé sur la station d'épuration de Mont-de-Marsan, une première en France pour la société allemande.
- Electrocinétique : 1 unité équipée. Il s'agit de la première référence en France installée sur la station d'épuration de Reventin Vaugris (125 000 EH). Le prétraitement doit être démarré à l'été 2021 avec comme objectif d'améliorer la déshydratabilité du digestat.

Les performances directement imputables aux prétraitements sont difficilement mesurables lorsqu'ils sont installés simultanément avec le processus de méthanisation au cours d'une phase de réhabilitation de la station. Une station s'est équipée d'un traitement hydrolyse thermique/méthanisation pour le traitement des boues secondaires centrifugées. Cet investissement donne pleinement satisfaction et a permis de réduire le tonnage de boues produites d'un facteur 3 facilitant réduisant les coûts liés à l'évacuation des boues. L'hydrolyse thermique peut aussi être installée entre deux étages de digestion. C'est le cas d'une station d'épuration de 550 000 EH, en France, équipée de quatre hydrolyseurs thermiques. Le fournisseur annonce une augmentation de la production de gaz de 25% ainsi qu'une réduction du volume de boues à déshydrater. L'investissement pour les quatre hydrolyseurs s'est élevé à 3,4 M€. Les consommations d'énergie sont sous forme de vapeur (8500 t/an) et d'électricité pour le malaxeur/ mélangeur de l'hydrolyse Thermique (15 kWh), la pompe à eau de l'hydrolyseur (4 kW) et la pompe à boues hydrolysées (7,5 kWh). Ces équipements donnent satisfaction malgré des coûts de fonctionnement élevés liés à la maintenance des équipements sous haute pression et au curage annuel des hydrolyseurs.

Certaines stations ont, au contraire, fait le choix de ne plus utiliser leur prétraitement :

- Une unité de sonolyse a été arrêtée après 4 à 5 ans de fonctionnement. Les ultrasons étaient utilisés pour traiter 30% du flux de boues secondaires après le tambour d'égouttage. Le prétraitement de la sonolyse (broyeur et pompe) posait des problèmes de maintenance en raison de la présence de filasses. Les bénéfices liés aux ultrasons n'étaient pas clairement établis ce qui a conduit à les arrêter.
- Un traitement par hydrolyse thermique a aussi été arrêté après quelques mois d'essais en 2017. Les hydrolyseurs traitaient une partie du digestat recirculé sur les méthaniseurs de boues primaires et secondaires (après pré-déshydratation par centrifugation). Lors de la période d'essais, plusieurs difficultés ont été rencontrées et notamment des défauts de fonctionnement des hydrolyseurs et l'augmentation de la concentration en azote dans les retours en tête conduisant à l'augmentation des concentrations en sortie de station d'épuration. Le rejet des eaux traitées de cette station se fait en milieu sensible avec des exigences strictes sur les paramètres azote ce qui ne permet pas d'accepter ce flux d'azote supplémentaire.

3.2.4 Graisses

Le prétraitement des graisses par saponification est proposé par la société SAPOVAL (81000 Albi) pour faciliter leur digestion anaérobie. Il permet la solubilisation et la stabilisation des matières prétraitées pour limiter les problématiques physiques (colmatage, encrassement, croûtage) et biologiques (inhibition, moussage, capacité de digestion) liées aux graisses. Un brevet a été déposé. Ce prétraitement se fait dans une cuve agitée, non chauffée, avec addition d'une base de type soude, potasse ou lait de chaux. Le pH visé est de 8,5 à 9,5. Il peut être mis en œuvre sur les graisses de la station d'épuration et toutes graisses issues des eaux usées (bacs à graisses, flottation des restaurateurs). Les coûts d'investissement sont de l'ordre de 50 à 150 k€ pour un coût de fonctionnement de 5 à 15 €/t selon le type de graisses traitées. L'équipement serait rentabilisé entre 1 et 4 ans grâce aux gains opérationnels et à la fiabilisation du processus de digestion. Plusieurs équipements sont en exploitation ou seront démarrés en 2021 pour le prétraitement de graisses avant méthanisation en France (STEU de Vichy, Limoges) et en Belgique (SAPOVAL, 2021).

3.2.5 Biodéchets

Des fournisseurs proposent des solutions techniques pour stocker les biodéchets et préserver le potentiel méthanogène tout en limitant les nuisances liées aux odeurs, insectes et nuisibles.

Des techniques de déshydratation des biodéchets sont commercialisées par GEB Solutions (89 300 Joigny). Cette déshydratation permet de conserver la matière mais présente certains inconvénients et notamment une consommation d'énergie élevée. De plus, une réhydratation ou un mélange de la poudre de biodéchets à un co-substrat sera nécessaire pour permettre sa digestion.

- Stockage : Bio Tank® (Hindelang, 2021)

La société Bio Tank (47 800 Pont du Casse) commercialise des contenants étanches pour stocker les biodéchets en absence d'oxygène. Le processus d'hydrolyse démarre dans ces contenants, le CO₂ produit chasse l'oxygène présent permettant de conserver la matière acidifiée. L'étanchéité permet également de supprimer les nuisances telles que les odeurs et la présence de nuisibles. Ce mode de stockage a été évalué par un laboratoire spécialisé, une conservation de 99% du potentiel méthanogène a pu être obtenue sur une durée de stockage d'un mois. Une production d'hydrogène et d'hydrogène sulfuré a été mesurée pendant ce stockage. Les événements sont traités par adsorption au charbon actif avant émission à l'atmosphère. Deux configurations sont disponibles selon que les biodéchets sont bruts ou emballés. En présence d'emballages, ceux-ci sont éventrés puis l'ensemble est compacté pour le stockage. Un déconditionnement sera nécessaire avant la digestion anaérobie sur le site de méthanisation. Pour les biodéchets non emballés, un broyeur à peigne d'une maille de 10 mm est intégré au Bio Tank.

La première unité de 12 m³ sera installée en septembre 2021 pour une chaîne d'hypermarché. Bio Tank développe de plus petites unités de 0,5 à 2 m³ pour proposer une gamme de points d'apports volontaires de biodéchets. Les Bio Tank de 12, 15 et 20 m³ seront mis à disposition sur le site producteur de biodéchets. Un tarif de 100 à 200 €/t sera facturé pour la location du matériel et l'élimination du biodéchet selon la région et l'exutoire (méthaniseur équipé ou non d'un déconditionneur). Les plus petites unités (< 10 m³) seront vendues, le tarif n'est pas arrêté au 15/06/21.

- Prétraitement et préparation de la ration

Un tri peut être nécessaire en premier lieu pour vérifier la qualité de la matière et éliminer les indésirables résultant d'erreurs de tri. La présence d'emballages nécessite une étape de déconditionnement des biodéchets pour séparer les emballages des matières biodégradables. Cette étape est soit réalisée par le producteur de déchets soit par l'unité de méthanisation. Les procédés classiques de déconditionnement broient la matière en entrée avant séparation des emballages. Des systèmes innovants existent afin de perforer les emballages et d'en extraire les matières organiques valorisables. Selon une étude récente (Les solutions de déconditionnement des biodéchets emballés et leurs performances, ADEME 2021), 43 installations de déconditionnements sont installées en France.

Réglementairement, les biodéchets doivent être broyés à une taille maximale de 12 mm avant d'être hygiénisés.

Des cuves d'hydrolyse sont installées sur quelques unités pour le prétraitement des matières fortement fermentescibles afin de diminuer le risque d'acidose dans le digesteur. La société Naskeo (92240 Malakoff) a installé 3 cuves d'hydrolyse sur les résidus agro-industriels et déchets carnés. La cuve est agitée et chauffée à 45-55°C et dimensionnée pour un temps de séjour de quelques jours (Fougerit, 2021). Un industriel spécialisé dans la collecte et la méthanisation de biodéchets agro-industriels a été contacté au cours de l'enquête. Les 5 sites en service sont équipés d'une cuve d'hydrolyse biologique en amont du digesteur anaérobie. L'hydrolyse se fait en continue après l'étape d'hygiénisation. La cuve est agitée et la température maintenue à 45 ou 55°C. Le pH n'est pas contrôlé, il s'établit naturellement autour de 4,5. Les gaz produits au cours de cette hydrolyse sont évacués par un évent soit à l'atmosphère soit vers le ciel gazeux du digesteur. L'efficacité de ce traitement n'a pas été mesurée mais permettrait, selon l'industriel, d'améliorer la production de biogaz de 10 à 15% grâce à l'amélioration des cinétiques de dégradation qui permet d'augmenter la quantité de matières traitées.

3.2.6 Algues

Peu de retours d'expériences sont reportés sur la méthanisation des algues. L'usine de Solrød au Danemark méthanise des macroalgues d'échouage en co-digestion (Gimžauskaitė et al., 2020). En juin 2020, cette unité était la seule référence connue à méthaniser ce type d'intrants.

L'unité de Solrød, mise en service en 2015, a une capacité de 226 000 tonnes/an avec une valorisation du biogaz par cogénération. Le coût d'investissement s'est élevé à 11,6 millions d'euros. Les algues sont co-digérées, dans un méthaniseur infiniment mélangé, avec des résidus organiques (pectine, acide lactique, bouillie de levure) et du fumier (Figure 37). Elles ne représentent que 7 000 tonnes/an soit moins de 4% du tonnage de matières entrantes traitées.

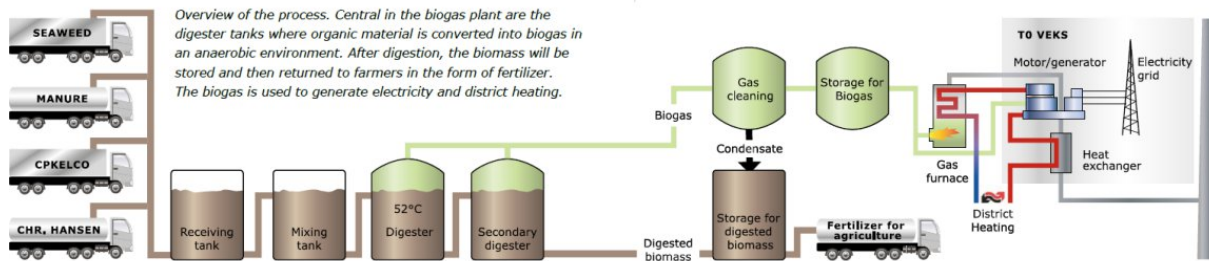


Figure 37. Schéma de principe de l'unité de méthanisation de Solrød au Danemark (IEA Bioenergy, 2015)

Le ramassage des algues pour les méthaniser a permis de résoudre les problèmes liés à la présence des algues sur la plage (odeurs, impact paysager) et dans l'eau en réduisant les concentrations de nutriments (N et P) et par conséquent les problèmes d'eutrophisation. L'unité de Solrød reçoit deux types d'algues, une algue verte (*Zostera marina*) et une algue brune (*Pilayella littoralis*, *Ectocarpus* sp). La concentration en cadmium est limitée à 0,8 mg/kg MS algale. Si cette limite est dépassée, principalement en hiver, le lot d'algues est rejeté en mer. Le développement d'outils adaptés au ramassage des algues était toujours à l'étude en 2020.

Les algues subissent des prétraitements sur le site de méthanisation avant digestion. Elles sont, en premier lieu, introduites dans une cuve fortement agitée pour séparer les algues des sables. Les algues sont ensuite hachées finement dans un macérateur puis mélangées aux autres matières premières.

3.3 Synthèse des entretiens d'acteurs

Tableau 18 : Synthèse des retours d'expérience sur les dispositifs de prétraitements suite aux entretiens d'acteurs (Compilation RECORD 2022)

Catégorie d'intrants	Nombre de retours	Interlocuteur	Typologie d'installation	Technologie de méthanisation	Prétraitement	Conditions opératoires	Coûts d'investissements	Charges de fonctionnement	Maturité	Bénéfices	Limites	Gains de production	Autres impacts	Satisfaction exploitant
Biodéchets	1	Exploitant	Territoriale	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Ligne de déconditionnement		600 k€	100 k€	Industrielle	Extraction des emballages des biodéchets et production d'une soupe "pompable" qui peut ensuite être incorporée en méthanisation				Oui tout à fait
	1	Exploitant	Agricole collective	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Broyeur et hygiénisation				Industrielle			Non clairement établi		Oui tout à fait
Boues de STEU	1	Exploitant	STEU	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Ultrasons	Prétraitement de 20% du flux de boues secondaires épaissies			Industrielle			Non clairement établi		Plutôt non du fait que le bénéfice n'est pas clairement établi
	3	Exploitant	STEU	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Hydrolyse thermique	Hydrolyse positionnée sur la totalité du flux entre le premier et deuxième étage de digestion	3 447 k€ (4 hydrolyseurs) STEU de 555 333 EH	8 500T vapeur d'eau consommées/an Malaxeur/ Mélangeur Dynamique Hydrolyse Thermique Exelys : 15 kWh Pompe Eau industrielle Exelys : 4 kWh Pompe Boues Hydrolysées Exelys : 7,5 kWh	Industrielle	Concentration des contaminants dans les digestats pouvant impacter leur épandage Coûts de fonctionnement (équipement sous pression)		+25% de production de gaz	Réduction du volume de digestat à déshydrater	Plutôt satisfait
	3	Exploitant	STEU	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Hydrolyse thermique	Prétraitement des boues secondaires centrifugées			Industrielle			Oui mais non évalué	Boues fluides facilement transportables et ne nécessitant qu'une agitation à pale centrale pour le méthaniseur	Oui tout à fait
Matrices lignocellulosiques agricoles	1	Exploitant	Territoriale	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Ligne mélangeuse/extenseur/pré-fosse	Extrudeur Lehmann	350 k€	50 k€	Industrielle	Augmentation du taux de déchets solides fibreux en digestion		Oui mais non évalué		Oui tout à fait
	5	Exploitant	Agricole individuel	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Broyeur à couteaux de type Prémix	En ligne avec recirculation de digestat	90 k€	5 k€/an de pièces et 3 k€/an d'électricité	Industrielle	Réduction de la croûte en surface des cuves de digestion ; Diminution de la casse d'agitateurs ; Diminution du temps de maintenance sur la ligne de digestion, et ainsi de pertes de revenus liées à d'éventuelles interventions ; Diminution de la quantité d'indésirables (cailloux, ferrailles, bouts de bois...) en digestion ; Augmentation de la cinétique de production de biométhane (il s'agit	Coût d'investissement élevé ; Charges de maintenance et remplacement des couteaux importantes ; Consommation électrique élevée ;	Oui mais non évalué		Oui tout à fait

										d'un ressenti qui n'est cependant jamais réellement mesuré) ; Concentration des problèmes techniques en un seul point de l'installation au niveau du broyeur, permettant de s'affranchir de contraintes mécaniques liées au gisement en aval dans la ligne de digestion.				
1	Exploitant	Agricole individuel	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Broyeur à chaîne Verde Energy (TQZ 1200)	Broyage fumier bovin pailleux, CIVE, ensilage d'herbe, déchets de pomme	98 k€ pour 8 à 10 tonnes/h	150 € / 2 mois (changement de la paire de chaîne) + 1200 € / 2 ans pour le changement de la toile de renfort en acier	Industrielle	Broyeur fiable et robuste	Prix d'investissement Une préfosse est installée en aval du broyeur, elle permet de récupérer les petits cailloux	Oui mais non évalué			oui plutôt content
1	Exploitant	Agricole individuel	Voie piston thermophile	Broyeur à marteaux BHS	En ligne	100 k€	Charges de maintenance et remplacement des marteaux et du rotor : 8k€/an.	Industrielle	Diminution des pannes d'agitation ; Bonne acceptation des cailloux qui sont également broyés ; Concentration des problèmes techniques en un seul point de l'installation au niveau du broyeur, permettant de s'affranchir de contraintes mécaniques liées au gisement en aval dans la ligne de digestion.	Coût d'investissement et charges d'exploitation importantes.	Oui mais non évalué			Plutôt satisfait
1	Exploitant	Agricole individuel	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Broyeur à marteaux BHS	En ligne	100 k€	Charges de maintenance et remplacement des marteaux et du rotor : 10k€/an en moyenne. Un marteau a un coût moyen de 175 €/unité. Charges liées à la consommation électrique : 15k€/an en moyenne pour un modèle 75 kW fonctionnant 8h/jour.	Industrielle	Réduction de la croûte en surface des cuves de digestion ; Diminution du temps de maintenance sur la ligne de digestion, et ainsi de pertes de revenus liées à d'éventuelles interventions ; Concentration des problèmes techniques en un seul point de l'installation au niveau du broyeur, permettant de s'affranchir de contraintes mécaniques liées au gisement en aval dans la ligne de digestion.	Coût d'investissement et charges d'exploitation importantes.	Oui mais non évalué			Oui tout à fait
1	Exploitant	Territoriale	Voie liquide infiniment mélangée mésophile	Broyeur à marteaux BHS	En ligne	100 k€		Industrielle	Réduction de la croûte en surface des cuves de digestion ; Diminution des phénomènes de bouchons dans les canalisations coudées ; Diminution du temps de maintenance sur la ligne de digestion, et ainsi de pertes de revenus liées à d'éventuelles interventions ;	Charges de maintenance élevées et consommation électrique importante.	Oui mais non évalué			Oui tout à fait
1	Exploitant	Agricole collectif	Voie piston thermophile	Broyeur forestier déporté	Déporté	100 k€	1€20/tonne traitée en maintenance de routine. Entretien pluriannuel coûteux : remplacement et réglage des couteaux et mise à l'arrêt du broyeur pendant plusieurs jours.	Industrielle	Peu d'entretien quotidien ; Diminution des phénomènes de bouchons dans les canalisations coudées ; Diminution du temps de maintenance sur la ligne de digestion, et ainsi de pertes de revenus liées à d'éventuelles interventions ; Concentration des problèmes techniques en un seul point de l'installation au niveau du broyeur déporté, permettant de s'affranchir	Investissement.	Oui mais non évalué			Oui tout à fait

										en partie de contraintes mécaniques liées au gisement sur la ligne de digestion.				
	1	Exploitant	Agricole individuel	Voie piston thermophile	Broyeur forestier déporté	Déporté	150 k€		Industrielle	Peu d'entretien quotidien.	Entretien général tous les deux ans coûteux avec mise à l'arrêt de l'équipement pendant 1 semaine.	Oui mais non évalué		Plutôt satisfait
	3	Commercial	Agricoles individuel et collectif	Toutes	Conservateurs d'ensilage	Ajout du produit à la récolte (dispositif sur ensileuse)	1,5 €/tonne de matière brute traitée	Aucune	Industrielle	Une perte de matière sèche en tonnage réduite de 5 à 10% ; Une production d'acide acétique, accélérant l'étape d'acétogénèse en digestion. Cet acide augmente également la stabilité aérobie et diminue les pertes du pouvoir méthanogène sur le front d'attaque (maintien le front d'attaque à une température inférieure à 20 °C) ; Une production de propylène glycol avec une disponibilité énergétique importante ; Un effet concurrentiel des inoculants avec des souches produisant des molécules inhibitrices.	Coût d'investissement ; Taux de matière sèche de la matière < 45% pour pouvoir utiliser des inoculants.	+5 à +10%		Plutôt satisfait

Volet 4 : Perspectives R&D, Fiches par technologies, fiches par intrants

4.1. Perspectives R&D sur les prétraitements en méthanisation

Cette étude RECORD a permis de mettre en évidence les avancées scientifiques aux échelles laboratoire et industrielle dans le domaine des prétraitements appliqués à la filière méthanisation. Que ce soit à un niveau général ou selon les substrats, des pistes de développement ont été identifiées afin d'améliorer le déploiement et l'utilisation des technologies de prétraitements à l'échelle industrielle.

Ces perspectives de R&D portent notamment sur le développement de projets sur l'analyse des impacts que peuvent avoir les prétraitements sur d'autres paramètres que l'amélioration de la production d'énergie ou la cinétique de dégradation : la rhéologie du milieu, les communautés microbiennes, la qualité des digestats et l'environnement, l'approche multi-critères.

Huit propositions ont pu être établies :

Disposer de données de référence sur les coûts

Aujourd'hui, aucune base de données exhaustive⁴ ne référence les coûts d'investissement et de fonctionnement (dont les consommations énergétiques) des différents prétraitements à l'échelle industrielle. Il pourrait être intéressant, à l'avenir de réaliser une étude dédiée spécifiquement à ce volet économique.

Mettre en œuvre des projets à l'échelle industrielle

D'une manière générale, il est nécessaire que ces technologies de prétraitements puissent être testées sur des unités de méthanisation semi-industrielles voir industrielles afin d'en tirer des informations sur leur exploitation, mise en pratique et leur consommation énergétique (CAPEX et surtout OPEX).

Identifier les verrous limitant le développement des prétraitements sur les biomasses atypiques

En ce qui concerne les biomasses atypiques (matrices lignocellulosiques, algues, plastiques biodégradables...), il y a un manque de recul sur les technologies de prétraitement à appliquer et leur transfert à l'échelle industrielle. Certaines technologies ayant démontré des intérêts à l'échelle laboratoire n'ont pas été transférées à l'échelle industrielle et il est important de comprendre les verrous techniques ou opérationnels limitant ces montées en échelle. L'explosion à la vapeur, déjà appliquée sur les boues d'épuration, a montré des résultats prometteurs pour le traitement des matrices lignocellulosiques mais sa mise en œuvre industrielle est plus complexe. Des industriels travaillent au développement de cette technologie. Certains prétraitements utilisés à l'échelle industrielle tels que les prétraitements biologiques (enzymes/micro-organismes) ne disposent pas de suffisamment de données sur leur intérêt économique global au regard des bénéfices potentiels.

Analyser les prétraitements sous le prisme de l'amélioration de la rhéologie/viscosité pour la diminution de la consommation énergétique

Les technologies de prétraitement peuvent modifier la rhéologie/viscosité des mélanges de biomasse, réduisant l'énergie relative au pompage et au mélange des cuves de méthanisation. Les technologies de prétraitement peuvent également contribuer à la réduction des croûtes et des dépôts de surface améliorant les transferts dans le méthaniseur. Plusieurs technologies de prétraitement telles que les traitements mécaniques, thermiques et enzymatiques ont montré leurs intérêts pour améliorer la rhéologie proprement dite. Par exemple, une cavitation hydrodynamique a démontré son intérêt pour

⁴ A noter l'existence d'une base de données sur les prétraitements mécaniques (CAPEX, OPEX), réalisée par Bio-VALO, CSF novembre 2021 et d'un « mémoire technique – Solutions de prétraitement biologique en méthanisation », CSF, Juillet 2021: <https://systemesenergetiques.org/travaux-de-recensement-des-solutions-de-pretraitements-des-matieres-pour-la-methanisation/>

améliorer la viscosité, contribuant ainsi à réduire l'énergie pour le mélange, le chauffage et le pompage (Garuti et al., 2017). De même, les prétraitements enzymatiques ont aussi montré leur intérêt pour abaisser la viscosité des mélanges de méthanisation (Brémond et al., 2018). En parallèle, il a également été démontré que certaines technologies de prétraitements peuvent contribuer à l'amélioration de la déshydratation du digestat à la suite du processus de digestion anaérobie notamment sur les digestats issus de la méthanisation des boues de STEP et les biodéchets (Zhang et al., 2018b).

Analyser les impacts des prétraitements sur les communautés microbiennes

Une meilleure compréhension de l'impact des technologies de prétraitements sur les communautés microbiennes présentes dans les méthaniseurs. En effet, certaines technologies de prétraitement pourraient avoir un impact sur les communautés microbiennes et donc par conséquent sur les performances des méthaniseurs.

Analyser les impacts des prétraitements sur les digestats

Une meilleure compréhension de l'impact des technologies de prétraitements sur la qualité agronomique des digestats et leur pouvoir de fertilisation et d'amendement organique. Les technologies de prétraitement peuvent pour certaines affecter la teneur en éléments nutritifs et la stabilité de la matière organique du digestat (Sole-Bundo et al., 2017). À l'heure actuelle, peu d'études de recherche ont étudié l'impact des technologies de prétraitements sur ces paramètres (Sole-Bundo et al., 2017).

Analyser les impacts des prétraitements sur les sols, les eaux

L'impact des prétraitements sur les paramètres sanitaires. Les technologies de prétraitements peuvent avoir une incidence positive ou négative sur les propriétés sanitaires des digestats. En effet, le prétraitement thermochimique peut contribuer à augmenter la quantité de potentiels inhibiteurs du sol directement (par addition chimique, Na, S, Fe) ou indirectement par la formation de sous-produits (tels que les furanes et les polyphénols) qui pourraient causer des effets néfastes sur le sol (Leven et al., 2006; Yan et al., 2015). Le prétraitement peut également affecter la teneur en agent pathogène, antibiotique et réduire la quantité de contaminants organiques (Leven et al., 2006; Sole-Bundo et al., 2017; Yan et al., 2015; Yang et al., 2017). Il sera aussi important d'élargir dans le futur l'étude de l'impact possible de certaines technologies de prétraitements sur les écosystèmes terrestres (vers de terre, bactérie, champignons...) et aquatiques (microalgues, daphnies, lentilles d'eau...) lors du retour au sol du digestat. Dans le cas des flux de biodéchets et/ou plastiques biodégradables, une attention toute particulière devra être portée sur le devenir des additifs et des microplastiques (Batori et al., 2018; Chen et al., 2021).

Mesurer les impacts des prétraitements à partir d'ACV

Une meilleure compréhension du bénéfice environnemental de ces technologies de prétraitements en réalisant notamment des analyses du cycle de vie (ACV) de la filière méthanisation avec et sans la brique de prétraitements. À l'heure actuelle, peu de projet ont étudié l'impact environnemental des technologies de prétraitements (Carballa et al., 2011; Franchetti, 2013; Li et al., 2017). Par exemple différentes technologies de prétraitements appliquées à deux types de déchets (déchets de cuisine et boues d'épuration) ont démontré leur intérêt environnemental évalué à l'aide d'une méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV) (Carballa et al., 2011 ; Franchetti et al., 2013 ; Li et al., 2017).

Pour conclure, le bénéfice d'un prétraitement ne peut se juger uniquement au gain de potentiel méthanogène ou à l'amélioration de la cinétique de dégradation. Afin de cerner tout son potentiel, il est important de regarder l'impact que peut avoir le prétraitement sur : la rhéologie du milieu, les communautés microbiennes, la qualité des digestats et l'environnement (Figure 38).

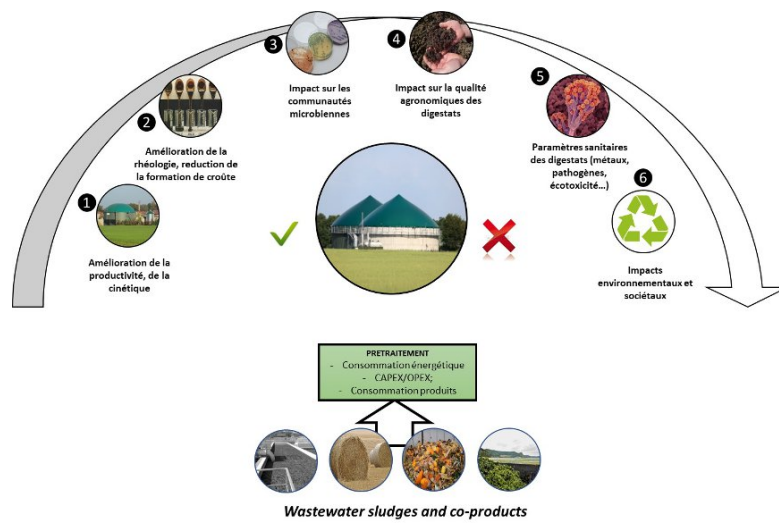


Figure 38 : Différentes perspectives laboratoires et industrielles sur l'application de prétraitement en méthanisation et analyse multicritère proposés pour évaluer les bénéfices d'un prétraitement (adapté de Elalami et al. 2019)

Une approche multicritères pourrait s'appliquer facilement, lors des tests pilotes à l'échelle laboratoire ou directement lors de la validation industrielle, afin de cerner tout le bénéfice que pourrait avoir une filière de prétraitement en amont de la méthanisation.

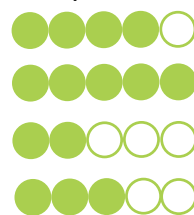
4.2. Fiches par technologies

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 1

LE BROYEUR À COUTEAUX

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets


Compatibilité



Crédit photo : ADBA

Le broyage au broyeur à couteaux est un **traitement mécanique** de la matière. Il est utilisé pour **réduire la taille des fibres** avant introduction dans le méthaniseur, par coupe et cisaillement de la matière. Cela permet de faciliter l'introduction, le mélange, et de diminuer le temps nécessaire à la dégradation de la matière. Cela permet de sécuriser le fonctionnement des unités en limitant les bouchages, les phénomènes de croustilles et les contraintes sur les pâles des agitateurs en diminuant la viscosité du digestat.

Il est proposé en équipement standardisé par de nombreux constructeurs d'unités de méthanisation agricole clé en main.

 Niveau de maturité technologique : Application industrielle



BIOGAZ

- **Augmentation de la cinétique de production** de méthane (ressenti mais non mesuré)



TECHNIQUE

- Diminution de la casse des agitateurs
- **Diminution de la quantité d'indésirables** dans le digesteur (cailloux, ferrailles, bouts de bois, etc.)
- **Diminution du temps de maintenance** sur la ligne de digestion
- Concentration des problèmes techniques en un seul point, accessible, de l'installation au niveau du broyeur, ce qui limite les contraintes mécaniques en aval

BIOLOGIQUE

- **Réduction de la croûte** en surface des cuves de digestion



TECHNIQUE

- Parfois **fragiles**



CAPEX

- **Coût d'investissement** : entre 70 k€ et 110 k€

OPEX

- **Charges de maintenance** et remplacement des couteaux: env. 5 k€/an
- Charges liées à la **consommation électrique**: env. 2 k€/an pour un modèle 30 kW fonctionnant 3h/jour

QUELQUES MODÈLES:

Rotacut (Premix) : Vogelsang

Rotocrusher : Börger

Unihacker : Börger


BIOaccelerator R : BTS Biogas


Multichopper : Börger



Plus de 200 broyeurs à couteaux installés en France

*  Retour d'expérience exploitant

 Info constructeur

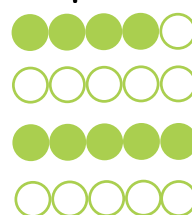
 Retour d'expérience R&D

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 2

LE BROYEUR FORESTIER

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets

Compatibilité



Crédit photo : Solagro

Le broyage au broyeur forestier déporté est un **traitement mécanique** de la matière. C'est un système mobile, privilégié par certains exploitants qui ne souhaitent pas avoir de broyeur en ligne, pouvant pénaliser le fonctionnement de l'installation en cas de panne. Il est principalement utilisé pour le broyage de déchets verts. Il est aussi adapté sur certaines installations pour le broyage de fumier et de résidus de culture. Réputé particulièrement robuste, il n'est en revanche pas adapté pour les fumiers mous.

Ils sont retrouvés principalement en version diesel mais existent également en version électrique ou raccordés derrière un tracteur.

✂ Niveau de maturité technologique: Application industrielle

TECHNIQUE

- **Peu d'entretien quotidien. Entretien prévu une fois tous les 10 ans.**
- **Diminution de temps de maintenance sur la ligne de digestion**
- Simplification du process, ne bloque pas le process en cas de problème comme peut le faire un broyeur placé sur la ligne d'incorporation.
- Diminution des phénomènes de bouchons dans les canalisations coudées



CAPEX

- **Coût d'investissement** : entre 100 k€ et 150 k€



OPEX

- **Charges de maintenance**: 1,20 €/tonne traitée
- Entretien pluriannuel coûteux: remplacement et réglage des couteaux et mise à l'arrêt du broyeur pendant plusieurs jours

QUELQUES MODÈLES:

*Mini Shark: Hantsch Willibald
Noremat*

Un exploitant interrogé utilise un broyeur déporté environ 300 heures par an, en broyant toutes les matières au moment de leur réception pour les stocker broyées.

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 3

LE BROYEUR À CHAINES


	Compatibilité
 Fumiers	
 CIVE	
 Résidus de culture	
 Biodéchets (solides)	



Crédit photo : Verde Energy

Le broyage au broyeur à chaînes est un **traitement mécanique** de la matière, installé pour le broyage des matières fibreuses. Il peut notamment être utilisé pour le prétraitement du fumier pailleux, des ensilages, des déchets de fruits. Les cailloux présents dans les intrants sont désagrégés lors de leur passage dans le broyeur. Cela permet de protéger les pompes et prévient les bouchages du pendillard utilisé pour l'épandage du digestat.

Les travaux réalisés dans le cadre du projet PAM financé par l'ADEME ont montré que les broyeurs à chaînes (avec les broyeurs à marteaux) étaient les plus efficaces pour déstructurer les fibres.

 Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- **Augmentation de la cinétique de production** de méthane
- Augmentation de la cinétique de dégradation de la matière
- Gain de production, ressentis mais non mesurés



TECHNIQUE

- Broyeur fiable et robuste

CAPEX

- **Coût d'investissement** : 98 k€ pour 8 à 10 tonnes/h.



OPEX

- **Charges de maintenance** : environ 150 € tous les deux mois pour le changement de la paire de chaînes puis 2000 € tous les deux ans pour le changement de la toile de renfort en acier.

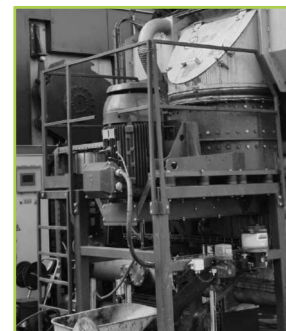
QUELQUES MODÈLES:

TQZ 1200 : Verde Energy
X-chopper : Nature Energy
Bio-préparateur TQZ : THM recycling solutions
Gamme Bio-QZ : Andritz

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 4

LE BROYEUR À MARTEAUX

	Compatibilité
 Fumiers	
 CIVE	
 Résidus de culture	
 Biodéchets (solides)	



Crédit photo : Solagro

Le broyage au broyeur à marteaux est un **traitement mécanique** de la matière, que l'on retrouve principalement sur des unités traitant des matières complexes: fumiers pailleux, pailles de céréales, cannes de maïs, racines et radicules, potirons entiers, etc. il est réputé plus efficace que le broyeur à couteaux pour les matières fibreuses et sèches.

Il est généralement proposé pour des projets à des puissances plus élevées que pour le broyeur à couteaux. Les travaux réalisés dans le cadre du projet PAM financé par l'ADEME ont montré que les broyeurs à marteaux (avec les broyeurs à chaînes) étaient les plus efficaces pour déstructurer les fibres.

✂ Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- Amélioration de la cinétique de dégradation de la matière
- Dans une moindre mesure, amélioration de la production de méthane



TECHNIQUE

- Diminution de la casse des agitateurs
- Bonne acceptation des cailloux qui sont aussi broyés**
- Diminution du temps de maintenance** sur la ligne de digestion
- Concentration des problèmes techniques en un seul point, accessible, ce qui limite les contraintes mécaniques en aval
- Diminution des phénomènes de bouchons dans les canalisations coudées



BIOLOGIQUE

- Réduction de la croûte** en surface des cuves de digestion
- Limitation des risques de flottaison des fibres dans les digesteurs

CAPEX

- Coût d'investissement** : 100 k€ minimum



OPEX

- Charges de maintenance** et remplacement des marteaux et du rotor: env. 8-10 k€/an. Un marteau a un coût moyen de 175€.

- Charges liées à la **consommation électrique**: env. 15 k€/an pour un modèle 75 kW fonctionnant 8h/jour

TECHNIQUE

- Avec les intrants riches en cailloux, les marteaux s'usent vite et le broyeur se met souvent en défaut.

QUELQUES MODÈLES:

Ineval (France): 1 à 2 tonnes/h (18kW)
ou 4 à 6 tonnes/h (2 x 18 kW)
Rotacrex : Planet

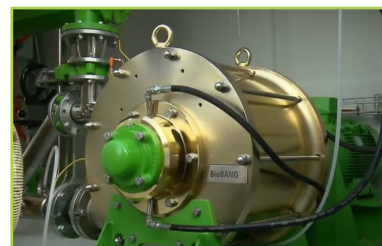
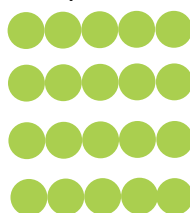
BIOaccezlerator z : BTS Biogaz
Biogrinder : BHS Sonthofen

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 5

LA CAVITATION

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets

Compatibilité



Crédit photo : Biobang

Il s'agit d'un prétraitement physique (pompage/mise en dépression), pouvant être utilisé pour réduire la viscosité du digestat et améliorer la digestion de la matière pour les procédés infiniment mélangés., mise en place en recirculation sur le digesteur. Cette technologie est brevetée par Biobang et développée par la société Italienne THREE-ES Srl. Ses capacités de traitement s'étendent de 0,5 à 25m³/h. Elle permet de réduire la taille des particules des substrats et notamment de décomposer la ligno-cellulose.

✂ Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- Amélioration de la digestion de la matière
- Augmentation de la production de biogaz d'environ 20%



TECHNIQUE

- Permet de traiter des substrats difficiles en décomposant la ligno-cellulose.
- Améliore la fluidité du substrat pour faciliter le pompage.
- Réduit les risques de blocage dans les canalisations coudées

BIOLOGIQUE

- Réduction de la viscosité du digestat
- Réduction de temps de séjour nécessaire pour la digestion des substrats

CAPEX

- Coût d'investissement : De 127 000€ pour une unité de 1,5 m³/h à 210 000€ pour une unité de 2,5 m³/h.

OPEX

- Coûts de maintenance: de 2300 à 3000 €/an.

QUELQUES MODÈLES:

Cavimax: Cavimax Ltd
Biobang : Three-ES Srl
ROTOCAV : E-PIC

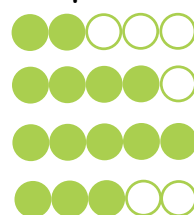
Plus de 150 unités à travers l'Europe, et une en Corée. La plus grande (15 m³/h) est installée en Pologne pour le prétraitement de la paille.

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 6

L'EXTRUDEUR

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets solides

Compatibilité



L'extrusion est un **prétraitement mécanique** de la matière. Elle est réalisée entre deux vis hélicoïdales afin d'éclater les cellules grâce à des contraintes répétées de pressions et à l'augmentation de la température de la matière. Cela améliore l'accessibilité de la matière et ainsi augmente la production de méthane.

Le taux de matière sèche cible du produit à extruder est de 35% MS. Une dilution peut être réalisée avec du digestat par exemple.

✂ Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- **Augmentation de production de méthane** comprise entre 14% (ensilage de maïs) et 70% (miscanthus)

TECHNIQUE

- Diminution de la casse des agitateurs
- **Diminution de la quantité d'indésirables** (cailloux, ferrailles, bouts de bois, etc.) dans le digesteur
- **Diminution du temps de maintenance** sur la ligne de digestion
- Concentration des problèmes techniques en un seul point, accessible, de l'installation au niveau du broyeur, ce qui limite les contraintes mécaniques en aval

BIOLOGIQUE

- **Réduction de la croûte** en surface des cuves de digestion

OPEX

- Charges liées à la **consommation électrique**: 10kWh/tonne pour le traitement de 1,5 tonne/h.

QUELQUES MODÈLES:





Bioaccelerator : BTS biogas
Bioextrusion : Lehmann



Environ 150 unités vendues dans le monde dont 9 en France

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION - Fiche 7

LE PRÉTRAITEMENT À ULTRASONS

-  Fumiers
-  CIVE
-  Résidus de culture
-  Boues de STEP

Compatibilité



Le prétraitement à ultrasons est un prétraitement physique, pouvant être utilisé pour réduire la viscosité du digestat et améliorer la digestion de la matière pour les procédés infiniment mélangés. Il peut être mis en œuvre sur les boues d'épuration urbaine, ou sur les unités de méthanisation pour traiter des substrats fibreux et difficiles à dégrader tels que le fumier ou l'herbe. Il est généralement positionné sur une partie du digestat ou après le post digesteur avant renvoi dans le digesteur.

 Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- **Bénéfice de 10 à 15% sur la production de biogaz, permettant un retour sur investissement de 3 à 5 ans.**
- **Diminution de la consommation de substrats**

TECHNIQUE

- Permet de traiter des substrats difficiles
- **Réduit l'usure des agitateurs**
- **Réduit la consommation d'énergie des pompes et agitateurs**

BIOLOGIQUE

- **Stabilisation de la biologie**
- **Réduction du taux de MS du digestat**

CAPEX


- **Coût d'investissement** : environ 150 000 € pour un méthaniseur d'1MW.

OPEX

- Charges liées à la **consommation électrique**: surproduction de l'ordre de 10%.

QUELQUES MODÈLES:

Ultrawaves: Biosonator
Boipush: Weber Entec

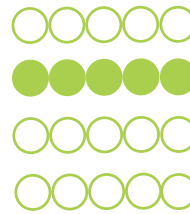
 Une centaine de méthaniseurs (Europe) sont équipés du procédé Biopush de Weber Entec en station d'épuration et à la ferme.

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 8

L'ENSILAGE (CONSERVATION)

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets

Compatibilité



Crédit photo: Arvalis

L'ensilage de la matière végétale est une méthode de prétraitement biologique, connu pour être un moyen de conservation adapté pour les matières présentant un taux de MS inférieur à 40%. Il consiste à hacher la matière puis la stocker en tas compact de façon à éliminer l'oxygène afin de créer un milieu anaérobie. Va alors avoir lieu une fermentation lactique réalisée par des bactéries, provoquant l'acidification de la matière. L'ensilage est ainsi stabilisé, ce qui permet de conserver la matière et son potentiel méthanogène.

✂ Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- Conservation du potentiel méthanogène sur de longues durées
- Les acides produits pourraient modifier la structure ligno-cellulosique des substrats, augmentant ainsi leur potentiel méthanogène



TECHNIQUE

- **Facile de mise en œuvre**
- **Nécessite peu de matériel donc peu coûteux**

BIOLOGIQUE

- Le pH acide et les conditions anaérobies **limitent le développement de micro-organismes** qui pourraient dégrader la matière.

TECHNIQUE

- Ne s'applique qu'aux cultures agricoles
- Nécessite de grandes surfaces de stockage
- Peut causer des pertes de potentiel méthanogène si mal réalisé



PRODUITS CONCERNÉS :

Cultures principales à hauteur de 15% maximum en tonnage dans la ration du méthaniseur : **maïs dédié, prairies temporaires**, etc.

CIVE : **sorgho, seigle** ainsi que **prairies permanentes**, etc.

Des additifs sont commercialisés pour améliorer la qualité de l'ensilage: des sucres pour favoriser la fermentation lactique, des acides ou des produits bactériostatiques pour inhiber la fermentation butyrique qui dégrade la qualité de l'ensilage, et des additifs biologiques contenant des bactéries lactiques ou des enzymes.

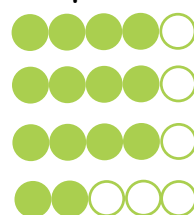


LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 9

ENZYMES et MICRO-ORGANISMES

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets

Compatibilité



Les prétraitements par ajout d'enzymes ou de micro-organismes sélectionnés sont une possibilité de prétraitement biologique pour améliorer la dégradabilité de la matière.

Les enzymes pouvant hydrolyser la cellulose et l'hémicellulose sont des glucosides hydrolases, et celles dégradant la lignine sont des laccases et des peroxydases. Plusieurs mélanges enzymatiques sont disponibles dans le commerce pour des applications dédiées à la méthanisation; avec des domaines d'activité compatibles avec les conditions de pH et de température.

Ces enzymes ou micro-organismes peuvent être introduits en amont de la méthanisation au niveau du stockage, directement dans le digesteur, dans la fraction liquide du digestat remis en circulation, ou bien consister en une étape spécifique.

Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- Amélioration de la dégradabilité de la matière
- Augmentation de la production de méthane



TECHNIQUE

- Diminue les contraintes d'agitation
- Diminue les consommations énergétiques liées à l'agitation

BIOLOGIQUE

- Réduit la viscosité dans le digesteur
- Limite la flottation des matières en surface
- Réduit le croûtage en surface du digesteur

TECHNOLOGIQUE

- Peu de données accessibles sur leurs performances et leur coût à l'échelle industrielle



ECONOMIQUE

- Rapport coût/bénéfice trop élevé compte tenu des concentrations nécessaires pour observer un résultat.

TECHNIQUE

- Performances dépendantes de la nature de la matière traitée
- Durée de vie limitée dans le temps

QUELQUES PRODUITS

MéthaPlus : DSM
 Axiase: DSM
 Bacteriometha : SOBAC
 Optimash : Dupont
 Metgen : Metzime Forci
 Enzymaxx : Agrikomp...

SOBAC commercialise « Bactériométha », un additif pour les substrats qui peut être ajouté directement sur la litière des animaux 15 jours avant curage. Il est composé d'un mélange de minéraux naturels et de végétaux naturels sur lesquels s'est développé un complexe de microorganismes spontanés des composts.

* Retour d'expérience exploitant

Info constructeur

Retour d'expérience R&D

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 10

L'HYDROLYSE THERMIQUE À HAUTE TEMPÉRATURE

- Boues de STEP
- Matières agricoles

Compatibilité



Crédit photo : Véolia

L'hydrolyse thermique consiste à exposer les boues à de fortes températures comprises entre 140 et 180°C sous pression. Des températures plus élevées améliorent la solubilisation des boues mais provoquent la formation de composés de Maillard, non biodégradables en digestion anaérobie.

La durée est généralement de 20 à 30 minutes. Ce traitement entraîne la dégradation de la structure en gel des boues et la libération de l'eau liée, la déstructuration des floccs et la solubilisation des exopolymères. De plus, la libération des membranes des cellules libère des composés qui deviennent alors accessibles pour la digestion anaérobie.

Il existe des technologies en batch, semi-continues ou continues, qui comprennent ou non un système de détente rapide pour le retour à la pression atmosphérique.

Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ ■ Libération des composés intracellulaires qui deviennent accessibles à la digestion

TECHNIQUE ■ Dégradation de la structure des boues, solubilisation des exopolymères
 ■ Amélioration de l'aptitude des boues à la déshydratation
 ■ Réduction de la viscosité

OPEX ■ Coût d'aération augmentés pour éliminer la DCO liée au retour du surnageant en tête de process

TECHNIQUE ■ Production de composés colorés solubles difficilement biodégradables

QUELQUES MODÈLES:

CambiTHP,
 Biothelys : Veolia,
 Exelys : Veolia,
 HCHS : Haarsley,
 Turbotec : Sustec,
 Lysotherm : Eliquo

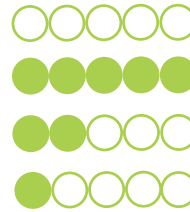
Plus de 80 STEP dans le monde sont équipées de procédés d'hydrolyse à haute température pour améliorer la méthanisation des boues. Le tout premier procédé a été installé en Norvège en 1995.

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 11

INOCULANTS ET CONSERVATEURS D'INTRANTS VÉGÉTAUX

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets

Compatibilité




Crédit photo: Schaumann Bioenergy


Des additifs sont commercialisés pour améliorer la conservation des matières végétales par ensilage. Ces produits sont ajoutés à la récolte à l'aide d'un dispositif installé sur l'ensileuse. Il en existe différents types. Deux produits sont principalement proposés :

- Les inoculants : bactéries lactiques homo et hétérofermentaires
- Conservateurs: produits acides tamponnés à l'ammoniac

C'est un marché très développé en Allemagne, mais qui l'est encore peu en France. Une cinquantaine d'unités de méthanisation en utilisent, contre la quasi-totalité des installations allemandes.

 Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- Production d'acide acétique (accélère l'étape d'acétogénèse en digestion) 
- L'acide acétique augmente la stabilité aérobie avec une diminution des pertes sur le front d'attaque
- Gain de production de 5 à 10%

BIOLOGIQUE

- Effet concurrentiel avec des souches produisant des molécules inhibitrices
- Perte de matière sèche réduite de 5 à 10% en ensilage
- Montée en température du front d'attaque réduite

ECONOMIQUE

- Surcoût par rapport à un ensilage classique :
 - Inoculants : 1,5 €/tMB traitée en moyenne
 - Acides : 4 €/tMB traitée

TECHNIQUE

- Le taux de matière sèche doit être inférieur à 45% pour pouvoir utiliser des inoculants


QUELQUES FABRIQUANTS:


Schaumann Bioenergy
Roullier
Lallemand



Conseil unanime des fournisseurs : il est indispensable de bâcher les silos. L'absence de couverture ou l'ajout d'un couvert végétal induirait des pertes importantes jusqu'à 1 mètre de hauteur.

*  Retour d'expérience exploitant

 Info constructeur

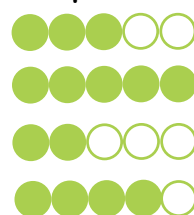
 Retour d'expérience R&D

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 12

LA PRÉ-HYDROLYSE

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets


Compatibilité



Crédit photo : Naskeo

La pré-hydrolyse est une méthode de prétraitement biologique de la matière proposée par certains fournisseurs en amont des digesteurs, pour augmenter la dégradabilité des matières lignocellulosiques afin d'augmenter leur rendement. Il existe des méthodes de pré-hydrolyse anaérobie, aérobie ou semi-aérobie.

L'hydrolyse semi-aérobie catalysée est par exemple réalisée dans une cuve chauffée à 37°C avec un temps de séjour de 0,4 à 1 jour et une aération séquencée. Le pH est de l'ordre de 6,5 à 7. Le gaz produit par l'hydrolyse (CO₂, H₂S, CH₄) est traité par un biofiltre avant rejet dans l'atmosphère.

 Niveau de maturité technologique : Application industrielle



BIOGAZ

- Amélioration de la dégradation de la matière
- Augmentation de la cinétique de dégradabilité de la matière



CAPEX

- Le coût d'investissement est de l'ordre de 100 000 euros.



TECHNIQUE

- Le taux de matière sèche dans la cuve d'hydrolyse semi-aérobie doit être de 8 à 12%
- Le gaz produit pendant cette étape n'est pas valorisé



Un programme de recherche « BOOST'HYDRO » a démarré en mars 2020 dans le cadre d'une thèse, en collaboration avec l'INRAE, axé notamment sur la compréhension des phénomènes biologiques, l'étude des voies de valorisation du gaz produit pendant l'hydrolyse et les recettes les plus adaptés.

QUELQUES MODÈLES:

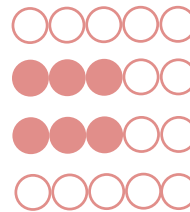
BOOST : Evalor
 Hydrolyse semi-aérobie catalysée : Biogaz ingénierie
 Hydrolyse anaérobie : Arkolia

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 13

LES PRÉTRAITEMENTS FONGIQUES

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets

Compatibilité



Crédit photo : Solagro

Le prétraitement fongique est un prétraitement biologique faisant appel à la capacité de certains champignons de dégrader la lignine, qui pourrait être utilisée en fermentation voie sèche. Les champignons à pourriture blanche ont été identifiés comme les plus performants pour délignifier un substrat. Ils permettraient une augmentation du BMP jusqu'à 50%. Mais les pertes de MO estimées entre 10 et 20% sont trop peu mentionnées et peuvent conduire à une surestimation des gains.

✂ Niveau de maturité technologique : Résultats laboratoire prometteurs



BIOGAZ ■ Augmentation du BMP jusqu'à 50% (Carrere et al., 2016)



ECONOMIQUE ■ Implique des surcoûts de 12% pour les investissements et 170% pour les charges de fonctionnement (ANR Stockactif, UMR FARE)



BIOLOGIQUE ■ Pertes de matière organique (estimées entre 10 et 20%) qui contrebalancent l'augmentation du BMP (Carrere et al., 2016).



QUELS LEVIERS POUR RÉDUIRE CES VERROUS?



- Utiliser les champignons pour traiter des substrats ligneux qui ne sont pas méthanisables aujourd'hui
- Les travaux de recherche sur l'optimisation des conditions de prétraitement (humidité, aération, température, complément nutritionnel et durée) doivent au préalable permettre d'améliorer les performances au regard des pertes de matière.

- Le projet ANR Stockactif, coordonné par l'UMR FARE et finalisé en 2017 s'est intéressé aux souches de champignons capables de délignifier la biomasse lignocellulosique (paille de blé et de miscanthus)
- Un brevet associant trois laboratoires publics a été déposé. Il s'intitule « prétraitement de biomasses lignocellulosiques par des champignons filamenteux pour la production de bioénergies. »



LABORATOIRES

UR LBE Narbonne, UMR FARE Reims, UMR BBF Marseille, UMR IATE Montpellier, DEEP INSA Lyon

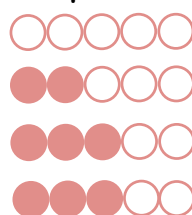
* Retour d'expérience exploitant Info constructeur Retour d'expérience R&D

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 14

LES PRÉTRAITEMENTS CHIMIQUES (acides/bases)

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets

Compatibilité



Les prétraitements acides et basiques sont des prétraitements chimiques de la matière qui ont été largement étudiés à l'échelle du laboratoire à température ambiante ou à des températures allant de 40 à 90°C. En dépit de résultats prometteurs concernant l'augmentation de la production de méthane et des cinétiques de dégradation, ils ne sont pas utilisés à l'échelle industrielle à cause de nombreux freins économiques et biologiques.

✂ Niveau de maturité technologique : Résultats laboratoire prometteurs



BIOGAZ

- **Bénéfice sur la production de méthane**
- **Augmentation de la cinétique de biodégradation**



ECONOMIQUE

- **Consommation d'eau**
- **Consommation de produits chimiques**
- **Consommation d'énergie**



BIOLOGIQUE

- Augmentation des concentrations en sels dans le digestat
- Formation potentielle d'inhibiteurs tels que les composés phénoliques

TECHNIQUE

- Performances très variables selon les matières prétraitées

QUELS LEVIERS POUR RÉDUIRE CES VERROUS?



- Sélectionner les matrices à prétraiter en fonction de leur faible biodégradabilité et des performances obtenues par le prétraitement (cinétique et BMP)
- Utiliser des produits chimiques qui ne pénalisent pas la qualité du digestat. La soude peut par exemple être remplacée par de la potasse qui apporte du potassium ayant un intérêt pour les sols au contraire du sodium apporté par la soude.
- Recycler la fraction liquide issue du prétraitement pour limiter sa consommation en eau et en produits chimiques.

QUELQUES PROCÉDÉS ÉTUDIÉS:

Prétraitement à la soude, à l'acide chlorhydrique, à la potasse, etc.

Des essais (Thomas, 2019) ont montré qu'un prétraitement à la soude pouvait permettre d'augmenter le BMP du Miscanthus jusqu'à +55%

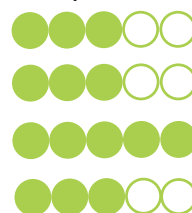


LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 15

LES PRÉTRAITEMENTS THERMIQUES

- Fumiers
- CIVE
- Résidus de culture
- Biodéchets

Compatibilité



Crédit photo: Agrikomp

Il existe plusieurs possibilités de prétraitement thermique de la matière :

- ❖ Les prétraitements par un dispositif de chauffage installés entre le digesteur et le post-digesteur. Sont commercialisés pour améliorer la digestion des substrats fibreux en augmentant leur cinétique de dégradation et en réduisant la viscosité du digestat. Ils fonctionnent par échangeur thermique tubulaire, qui chauffe le substrat de fermentation pendant 40 minutes de 40 à 80°C.
- ❖ Les technologies d'explosion à la vapeur, où les substrats sont traités à 150 à 180°C et 8 à 10 bars. Ces technologies sont encore peu développées à l'échelle industrielle car elles rencontrent des difficultés d'utilisation, et font encore l'objet de R&D pour être optimisées.

✂ Niveau de maturité technologique : Application industrielle

BIOGAZ

- **Augmente la production de biogaz** avec la même quantité d'intrants
- **Augmente la cinétique** de biodégradation



TECHNIQUE

- **Améliore la pompabilité** du substrat
- **Améliore l'agitation**
- Chauffage du digestat type Cooker : Facile à intégrer dans une unité existante

BIOLOGIQUE

- **Améliore la viscosité du digestat**
- À haute température, **élimination des pathogènes** contenus dans certains substrats

CAPEX

- **Coût d'investissement** : environ 150 000 € pour un méthaniseur d'1MW.

TECHNIQUE

- Explosion à la vapeur : nombreux dysfonctionnements au niveau de l'introduction/ broyage et extraction de la biomasse lors de l'automatisation du process.



Agrikomp commercialise sa propre unité de prétraitement thermique, installée sur ses installations de méthanisation.



Des essais sont en cours par BioVantage en Europe pour démontrer l'efficacité du système AD-Booster (process d'oxydation en voie humique/explosion à la vapeur) déjà en place aux États-Unis.

QUELQUES MODÈLES:

Cooker : Agrikomp

*Explosion à la vapeur :
Biogas Systems
BioVantage*

* Retour d'expérience exploitant

Info constructeur

Retour d'expérience R&D

LES PRÉTRAITEMENTS EN MÉTHANISATION – Fiche 16

LA SAPONIFICATION

■ Graisses

Compatibilité



■ Matières agricoles



Crédit photo : HAL Archives ouvertes

Le prétraitement des graisses par saponification est proposé par la société SAPOVAL pour faciliter leur digestion anaérobie. Il permet la solubilisation et la stabilisation des matières prétraitées pour limiter les problématiques physiques et biologiques liées aux graisses. Un brevet a été déposé. Ce prétraitement se fait dans une cuve agitée, non chauffée, avec addition d'une base de type soude, potasse ou lait de chaux. Le pH visé est de 8,5 à 9,5. il peut être mis en œuvre sur les graisses de la station d'épuration et toutes graisses issues des eaux usées.

✂ Niveau de maturité technologique : Application industrielle

- | | | | |
|---|-------------------|--|---|
| 😊 | BIOLOGIQUE | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Solubilisation et stabilisation des matières ▪ Limite les problèmes d'inhibition, moussage et capacité de digestion liés aux graisses | 👥 |
| | TECHNIQUE | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Limite les problèmes de colmatage, encrassement et croûtage liées aux graisses ▪ Fiabilisation du process de digestion | |
| | ECONOMIQUE | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rentabilisé en 1 à 4 ans grâce aux gains opérationnels et à la fiabilisation du processus de digestion | |

☹ **CAPEX** ■ Coût d'investissement de l'ordre de 50 à 150k€.

OPEX ■ Coût de fonctionnement de 5 à 15€/tonne selon le type de graisse traitée.

EXPLOITATIONS ÉQUIPÉES:

STEP de Vichy
STEP de Limoges

🔍 À l'échelle industrielle, la société Sapoval (Albi, 81) propose un procédé de saponification qui peut être appliqué en amont de stations d'épuration des eaux usées ou en amont d'un méthaniseur

* 🏭 Retour d'expérience exploitant

👷 Info constructeur

🧪 Retour d'expérience R&D

4.3. Fiches par intrants

Les pré-traitements des déjections animales LISIERS

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Conception des ouvrages	Ø	Limiter la durée avant métha < 1 ou 2 semaine Couverture	9		Limiter la perte de potentiel méthanogène
	Ø	Stockage en pointe avec possibilité de vider la fosse intégralement	9		Limiter la décantation
Mécanique	Ø	Séparation de phase et co-digestion phase solide	9		Equilibrer le C/N et le faible taux de MS de la ration



Les pré-traitements des déjections animales FUMIERS

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Mécanique	1, 2, 3, 4	Broyage amont méthanisation	9		Améliorer la cinétique de dégradation
	6	Extrusion	9		
Biologique	9	Enzymes biologiques	9		Améliorer la biodégradation Réduire la viscosité du digestat
Thermo- chimique	15	Thermique Haute température (explosion à la vapeur)	9		



Les pré-traitements des biomasses lignocellulosiques

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Mécanique	1, 2, 3, 4	Broyage	9		Augmenter la biodégradation Augmenter le potentiel méthanogène Réduire la viscosité du digestat
	6	Extrusion	9		
Biologique	9	Enzymes biologiques	9		
	13	Fongique (inoculation par des champignons)	4		
Thermo-chimique	11	Pré-hydrolyse	9		
	15	Thermique Haute température (explosion à la vapeur)	9		
	14	Alcalin	4		
Physique	7	Sonication (Ultrasons)	9		
	5	Cavitation	9		



Les stockages des résidus agricoles

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Mécanique	1, 2, 3, 4	Broyage amont stockage (<i>Fumiers</i>)	9		Limiter les pertes au stockage Prévenir et contrôler le risque d'auto inflammation durant le stockage
Biologique	9	Ensilage (<i>CIVE</i>)	9		Conserver le potentiel méthanogène sur de longues durées
	11	Inoculation de bactéries lactiques ou de conservateurs (<i>CIVE</i>)	9		Limiter les pertes Améliorer le potentiel méthanogène



Les pré-traitements des déchets grassex

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Mécanique	1, 2, 3, 4	Broyage	9		Nécessité de broyage de certains substrats
Thermo-chimique	16	Saponification	9		Faciliter la digestion Stabiliser et solubiliser les matières
	10	Hydrolyse Thermique Haute Température	9		Liquéfier pour permettre le pompage des graisses
Physique	7	Sonication (Ultrasons)	9		Limiter les problèmes de bouchage et de croûte



Les pré-traitements des boues urbaines

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Thermo-chimique	10	Hydrolyse Thermique Haute Température	9		Stériliser Réduire la viscosité Accélérer de la dégradation Augmenter la charge Réduire les odeurs
	0	Homogénéisation Haute pression	9		Augmenter la production de méthane
	14	Traitement alcalin ou acide	4		Augmenter la fraction d'azote minéralisé dans le digestat Améliorer la déshydratabilité
Physique	7	Sonication (Ultrasons)	9		Éliminer les filamenteuses Augmenter la biodégradation
	0	Electroporation (champs pulsés), centrifugeuse lyseuse	7		Augmenter la biodégradation Augmenter la production de méthane
	0	Micro-ondes, radiofréquence	4		



Les pré-traitements des biodéchets

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Mécanique	1, 2, 3, 4	Broyage, déconditionnement	9		Nécessité de broyage de certains substrats (légumes, ...)
Thermo-chimique	12	Pré-hydrolyse	9		Conserver le potentiel méthanogène Améliorer la biodégradation
	10	Hydrolyse Thermique Haute Température	9		Réduire la viscosité des déchets Accélérer de la dégradation Augmenter la charge
	15	Thermique Haute Température (Explosion à la vapeur)	5		Liquéfier
Physique	6	Adsorption par ajout de bentonite dans le méthaniseur	4		Stabiliser le procédé
	6	Stérilisation + séparation	4		Augmenter de la charge



Les pré-traitements des plastiques biodégradables

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Mécanique	1, 2, 3, 4	Broyage, déchiquetage	9		Faciliter la biodégradation Augmenter la surface de contact avec les bactéries Augmenter la cinétique de dégradation
Thermo-chimique	6	Extrusion	9		
	5	Cavitation	9		
	15	Thermique Haute Température (Explosion à la vapeur)	5		
	14	Alcalin	4		



Les pré-traitements des algues

Type	N° fiche	Pré-traitement	TRL (0 à 9)	REX - +	Objectifs
Mécanique	8	Tamisage	5		Éliminer les sables
Biologique	8	Co-digestion avec des biodéchets	7		Stabiliser la biologie par rapport à la présence d'H ₂ S
	9	Enzymes	4		
Thermo-chimique	10	Thermique Haute température	4		Dégrader la paroi cellulaire à structure complexe
	14	Alcalin	4		
Physique	7	Sonication	4		Améliorer la biodégradation
	8	Micro-ondes	4		



Annexe 1 : Outil BACUS de SOLAGRO

L'outil BACUS (propriété SOLAGRO) permet de réaliser sur un territoire une analyse fine du potentiel méthane au niveau communal, cantonal ou régional suivant les besoins.

Cet outil dynamique permet également de produire un état prospectif (horizon 2030, 2050) conforme au scénario Afterres2050 (scenario type « facteur 4 », modélisé via l'outil MOSUT, propriété Solagro)

C'est un outil comportant plusieurs fichiers de calculs et plusieurs bases de données de plusieurs milliers de lignes, est le fruit d'un travail rigoureux d'exploitation de plusieurs bases statistiques. (DISAR, SAA, INSEE, FAO, Agreste, douanes, Recensement Agricole), BACUS est régulièrement mis à jour en fonction des publications des sources statistiques officielles.

		184	185	186	192	193	#N/A	187	189	190	191	192	193	
		16 396 587	19 102 461	0	1 730 370	808 513	0	38 037 932	29 423 934	1 382 201	267 269	1 730 370	808 513	
		161 672	194 910	0	0	20 402		376 985	349 175	0	0	0	20 402	
		CH4_Dej 2010	CH4_Paille 2010	CH4_CIMSE 2010	Residus_1AA _2010_Méth ane	CH4 déchets méthanisés 2050	CH4_Total 2010		CH4_Dej 2050	CH4_Paille 2050	CH4_CIMSE 2050	Residus_1AA _2010_Méth ane	CH4 déc méthan 2050	
1	1217	MILLAU-EST	404	161 672	194 910	0	0	20 402	376 985	0	349 175	0	0	20 402
2	1204	CAMARES	391	911 951	1 010 115	0	0	25 630	1 947 696	0	1 527 331	0	5 065	0
3	1235	AIN-T-ROME-DE-TAR	422	2 191 094	2 491 881	0	0	38 368	4 721 342	0	4 196 676	0	18 793	0
4	1236	NT-SERNIN-SUR-RAN	423	1 984 476	2 244 819	0	38 673	40 769	4 308 737	0	3 662 528	300 692	78 932	38 673
5	1229	SAINT-AFFRIQUE	416	1 501 447	1 791 506	0	1 432 265	151 413	4 876 631	0	2 939 268	323 816	113 282	1 432 265
6	1202	HELMONT-SUR-RANCI	389	1 679 434	1 971 191	0	7 803	29 899	3 688 328	0	3 135 486	98 736	6 518	7 803
7	1240	EVERAC-LE-CHATEAU	427	1 655 120	1 948 093	0	0	48 208	3 651 421	0	2 783 343	21 637	6 375	0
8	1205	CAMPAGNAC	392	786 016	926 129	0	0	21 762	1 733 907	0	1 088 554	0	0	21 762
9	1231	SAINT-BEAUZELY	418	853 198	1 003 371	0	42 404	26 067	1 925 040	0	1 309 021	18 139	3 561	42 404
10	1221	NANT	408	409 130	491 769	0	137 959	39 515	1 078 372	0	864 769	109 160	467	137 959

Dans cet outil, il est considéré 3 types de ressources :

- La ressource produite
- La ressource mobilisable
- La ressource mobilisée (ou méthanisée si elle l'est à des fins de méthanisation).

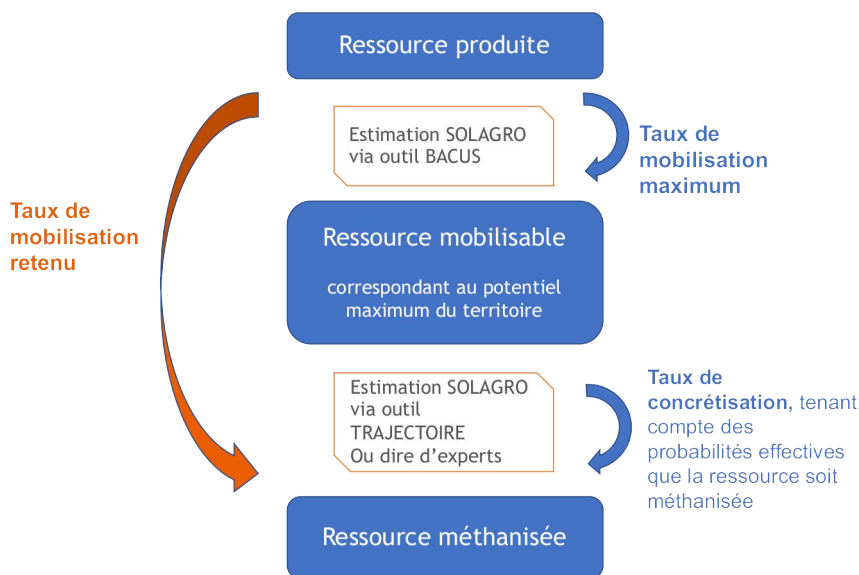


Figure 1 Description des 3 états de la ressource estimés dans cette étude

Ressource produite : Il s'agit de la ressource brute produite à un horizon de temps donné. Il est important de préciser que dans le cas des effluents d'élevages, les ressources produites sont les fumiers et lisiers c'est-à-dire les déjections animales maîtrisées. Les temps passés en bâtiment sont donc déjà pris en compte dans la ressource produite. Pour les ressources comme les CIMSE, qui ne sont pas forcément encore mises en place, nous parlerons de « capacité de production de CIMSE ».

Anciens termes employés : GBP - Gisement Brut Produit

Ressource mobilisable : Il s'agit de la ressource accessible c'est-à-dire qui peut être mobilisée d'un point de vue technique et économique à un horizon de temps donné. Cette estimation tient compte notamment des autres usages (par exemple : paille pour les litières), des conditions économiques (seuil de rentabilité pour la récolte des CIMSE), des conditions logistiques (taux de collecte des déchets) etc... Il s'agit du potentiel maximum du territoire.

L'estimation de la ressource mobilisable est réalisée via l'outil interne Solagro « BACUS ».
Le taux permettant d'estimer la ressource mobilisable à partir de la ressource produite est le « taux de mobilisation maximum ».

Anciens termes employés : GBD – Gisement Brut Disponible, GND - Gisement Net Disponible, ressource, méthanisable, récoltable

Ressource mobilisée : Il s'agit de la ressource dont on suppose qu'elle sera, dans les faits, réellement mobilisée à un horizon de temps t. Dans le cas de la méthanisation, partant de l'existant et simulant le développement d'un parc de méthaniseurs, l'outil « TRAJECTOIRE » permet de définir la part de la ressource mobilisable qui pourrait effectivement être méthanisée à un horizon de temps t. L'estimation de la ressource mobilisée peut également provenir des ateliers territoriaux ou de dire d'experts permettant de rendre compte des probabilités d'utilisation concrète de la ressource mobilisable. Le taux de concrétisation permet de calculer la part de la ressource mobilisable qui pourrait concrètement être utilisée in fine, à un horizon de temps t.

Annexe 2 : Ratios C/N des principaux substrats méthanisés

Famille	Sous-famille	Ratio C/N			Références
		Moyenne	Minimum	Maximum	
Déjections animales	Fumier bovin	15 ± 3	9	22	Base de données de l'APESA et outil Méthasim de l'IFIP (IFIP, 2018)
	Fumier équin	31 ± 12	11	54	
	Fumier volaille	10 ± 3	5	17	
	Lisier canard	11 ± 6	3	22	
	Lisier bovin	10 ± 2	6	14	
	Lisier porc	4 ± 2	1	11	
	Fiente	9 ± 2	7	11	
Résidus agricoles et productions végétales	Paille céréale	67 ± 31	37	150	Base de données de l'APESA et outil Méthasim de l'IFIP (IFIP, 2018)
	Résidu de maïs (rafle/canne/spathe)	90 ± 45	44	150	
	Menues paille	63 ± 34	28	108	
	CIVE d'hiver	19 ± 3	15	22	
	CIVE d'été	30 ± 12	9	62	
	Ensilage herbe	20 ± 6	13	26	
Déchets verts des collectivités	Tonte	16 ± 5	12	22	Base de données de l'APESA et outil Méthasim de l'IFIP (IFIP, 2018)
	Broyat	13 ± 3	9	16	
Déchets et effluents des industries	Industrie de la viande	21 ± 26	1	123	Base de données de l'APESA et outil Méthasim de l'IFIP (IFIP, 2018)
	Industrie végétale	30 ± 24	1	82	
	Produits transformés	26 ± 27	2	92	
	Lactosérum	18 ± 7	7	30	
	Effluents IAA	17 ± 11	6	39	
	Boues IAA	9 ± 6	5	26	
	Graisses IAA	160 ± 204	6	848	
Boues et graisses de STEP	Boues primaires	44 ± 59	9	112	Base de données de l'APESA, (Fisgativa et al., 2018a), outil Méthasim de l'IFIP (IFIP, 2018)
	Boues secondaires	5 ± 1	4	8	
	Graisse STEP	18 ± 7	8	29	
Biodéchets	FFOM	23	1 valeur		Base de données de l'APESA, (Fisgativa et al., 2018a), outil Méthasim de l'IFIP (IFIP, 2018)
	GMS	18 ± 8	8	27	
	Biodéchets de cantine et restauration	14 ± 2	11	18	
Algues	Macroalgues	15	6	25	Base de données de l'APESA, (Frigon et al., 2013; Milledge et al., 2019)
	Microalgues et spiruline	6	4	13	

Annexe 3 : Performances des prétraitements appliqués à l'échelle industrielle ou pilote/laboratoire pour les matières ligno-cellulosiques

Résultats à l'échelle industrielle, en réacteurs continus à l'échelle pilote ou laboratoire ou en BMP uniquement pour les procédés innovants.

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Echelle industrielle								
Fumier Bovin + ensilage d'herbe	Mécanique (Broyage)	Broyeur à chaînes Bio-TQZ de THM recycling solutions	Broyage en ligne sur méthaniseur à la ferme	Tests BMP sur échantillons prélevés en amont et en aval du broyeur	259* à 237 Nm ³ CH ₄ /t _{MV Sin} (+0 %) BMP déjà très élevé avant le broyeur	Amélioration de 12% de la cinétique de dégradation	Site Aidlingen, Allemagne Résultats considérés comme moins fiables que ceux mesurés sur le site de Metholec en raison de difficultés d'échantillonnage	(Bayard et al., 2019)
Fumier Bovin + ensilage d'herbe	Mécanique (Broyage)	Broyeur à chaîne X-Chopper® de Nature Energy	Broyage en ligne sur méthaniseur à la ferme	Tests BMP sur échantillons prélevés en amont et en aval du broyeur	180* à 270 Nm ³ CH ₄ /t _{MV Sin} (+50 %)	Forte augmentation de la cinétique de dégradation : 143%	Site Metholec , Ennezat (63)	(Bayard et al., 2019)
Fumier Bovin	Mécanique (Broyage)	Broyeur à marteaux Valormax BA915D de Noremat	Broyage en ligne sur méthaniseur à la ferme	Tests BMP sur échantillons prélevés en amont et en aval du broyeur	268* à 275 Nm ³ CH ₄ /t _{MV Sin} (+3 %)	Amélioration de 14% de la cinétique de dégradation	Ferme expérimentale ENSAIA La Bouzule (54)	(Bayard et al., 2019)
Fumier Bovin	Mécanique (Broyage)	Broyeur à marteaux Rotacrex de Planet	Broyage en ligne sur méthaniseur à la ferme	Tests BMP sur échantillons prélevés en amont et en aval du broyeur	199* à 224 Nm ³ CH ₄ /t _{MV Sin} (+13 %)	Amélioration de 16% de la cinétique de dégradation	Méthanisation à la ferme	(Bayard et al., 2019)
Lisier / fumier / ensilages d'herbe, de maïs et de grains / grains concassés	Mécanique (Broyage)	Broyeur à chaîne BIO-QZ de Andritz	Durée du broyage : 15 s à 65% de la puissance maximale	2 Digesteurs de 800 m ³ mésophile fonctionnant en parallèle. L'un est alimenté avec un substrat broyé	200* à 272 Nm ³ CH ₄ /t _{MV Sin} (+36%)	La consommation électrique du broyeur a été mesurée à 11.3 ± 1,3 kWh/t MB pendant les essais		(Mönch-Tegeder et al., 2014)

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
				l'autre non.		< bénéfique		
Mélasse, ensilage de résidus de farine de maïs et lisiers porcins	Physique (Cavitation)	Biobang®	Rotacut (Vogelsang) BioBANG®, Three-ES – Italy, 20 kWel- Pression à l'entrée de 2 bars 2.0 - 2.5 m³/h installé entre le digesteur 1 et 2 3 mois de suivi de l'unité sans cavitation (référence) puis 6 mois de suivi avec cavitation	Méthaniseur mésophile (42°C) 3 digesteurs anaérobie en série de 1400 m³ chacun	+ 10%	Diminution de la viscosité de 31 à 37% (digesteur 3) et de la granulométrie du digestat avec comme conséquence une diminution des consommations électriques imputables à l'agitation et au pompage (-17%) et l'énergie de chauffage	Augmentation de 6% de la consommation électrique du site de méthanisation Consommation d'énergie de 470 kJ/kg TS (40 kWé) pour la cavitation, compensée à près de 80% par la réduction des consommations d'énergie liées au broyage et à l'agitation Production d'inhibiteurs possible	(Garuti et al., 2017)
Papier filtre, concentré alimentaire, fibre de foin, ensilage d'herbe et de maïs	Biologique (Enzyme)	Test de différentes enzymes dont MethaPlus® L100 Plus L 100 à échelle laboratoire. Test de MethaPlus® L100 sur 30 exploitations agricoles à taille réelle	Absence de données sur les modalités d'application des enzymes	Pilote puis industrielle (30 exploitations agricoles)	MethaPlus® L100 plus L 100 identifié comme le plus efficace à l'échelle laboratoire (production de sucres) +15% de production de biogaz à l'échelle pilote +4-35% de production de biogaz à l'échelle industrielle comparativement à la production attendue en théorie (+18% en moyenne)		Le bénéfice lié à la production supplémentaire compenserait le coût des enzymes Il faut toutefois préciser que l'augmentation de la production de gaz estimée est faite par rapport à la production attendue en théorie ce qui peut amener des biais	(Gerhardt et al., 2007) d'après (Kaiser, 2004)
Bouse de vache, ensilage	Biologique (Enzyme)	MethaPlus® L100	Dosage non connu	Digesteurs, mésophile (2 x	Augmentation de l'énergie produite : +	Réduction des difficultés de		(DSM, 2013) France

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
d'herbe				2285 m ³)	12%	pompage et agitation.		
Ensilage de maïs, fumier, ensilage de culture entière	Biologique (Enzyme)	MethaPlus® L100	Dosage non connu	Digesteur mésophile (2560 m ³)	Amélioration de la conversion de la biomasse (10%)	Diminution de la production de digestat		(DSM, 2014) Allemagne
Ensilage de maïs et seigle	Biologique (Enzyme)	Enzyme de DSM produite à partir d'Aspergillus niger et trichoderma logiderma	Incorporation aux intrants 100 g/kg MS	2 Digesteurs de 2000 m ³ fonctionnant en parallèle avec et sans enzyme 5-5,8 kg MSV/m ³ .j	+ 2,6% à 4,7% de production électrique	Diminution de la viscosité du digestat		(Schimpf et al., 2013)
Fumiers, Matières stercoraires, Pailles de maïs, Digestat réincorporé	Biologique Micro-organismes sélectionnés	Bactériométha®	Application directement sur la litière des animaux à la création (1/3 de la dose) puis 15 jours avant curage (2/3 dose) Dose : 0,8 kg/m ³ de fumier	Méthanisation voie sèche 4 garages	Production d'énergie supérieure avec Bactériométha® : 18% d'écart	Diminution significative des odeurs des intrants		(SOBAC, 2018) Fournisseur
Echelle pilote/Laboratoire								
Paille et litière accumulée	Mécanique (extrusion)	Extrudeur pilote de 18 kg/h	Rotation des vis à 600 tour/min 5 configurations de vis testées	Test de potentiel méthanogène	Augmentation de la production de méthane 4 à 29% (28 jours de dégradation) -2 à 16% (60 jours de dégradation)	Augmentation de l'accessibilité des sucres	Bilan énergétique négatif à cette échelle pilote : Consommation énergétique de 226-324 kWh/t	(Wahid et al., 2015)
Fumier bovin et paille de blé	Physique	Ultrasons	Fréquence : 24 kHz	Pilote infiniment mélangé (21 m ³) 35°C	193* à 249 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+29 %)			(Zieliński et al., 2019)
Fumier bovin	Physique	Ultrasons	520 kJ/kg TS	Pilote (18,75 L) 55,1°C	290 à 460 m ³ Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+59%)			(Ormaechea et al., 2018)
Fumier bovin, biodéchets et glycérine	Physique	Ultrasons	1,040 kJ/kgTS.	Pilote (18,75 L) 55,1°C	290* à 520 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+79 %)			(Ormaechea et al., 2016)

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Fumier bovin et paille de blé	Physique	Cavitation	Pompe hydrosonique 2 kW	Pilote infiniment mélangé (21 m ³) 35°C	193* à 228 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+18 %)			(Zieliński et al., 2019)
Macrophyte Potamogeton maackianus	Thermo-chimique	Alcalin	80°C, 3h 20 g NaOH/100 gMS	Pilote infiniment mélangé (4,5L) 37 et 55°C	+42 % en mésophile et +8% en thermophile		Diminution de la production après 22 jours de digestion (inhibition lié à la lignine dissoute) puis acclimatation	(Koyama et al., 2017)
Ensilage de sorgho fourrager	Thermo-chimique	Alcalin	40°C, 24h 10 g NaOH/100 gMS	Pilote infiniment mélangé (1,5L) 35°C	237* à 297 Nm ³ CH ₄ t ⁻¹ MVS (+25 %)	Meilleure stabilité du pilote alimenté par l'ensilage prétraitée (augmentation de l'alcalinité)		(Sambusiti et al., 2013)
Tige de tournesol	Thermo-chimique	Alcalin	55°C, 24h 4 g NaOH/100 gMS	Pilote infiniment mélangé (1,5 L) 35°C	152* à 191 Nm ³ CH ₄ t ⁻¹ MVS (+26 %)			(Monlau et al., 2015)
Fibres des fumier bovin digéré	Thermo-chimique	Alcalin	121°C, 24h 4 g NaOH/100 gMS	Pilote infiniment mélangé (2,4 L) 53°C	+25% avec 30% MVS intrant prétraitée			(Tsapekos et al., 2016)
Déchets de citron et déchets ménagers	Thermo-chimique	Explosion à la vapeur	150°C, 20 min, 60 bars	Pilote infiniment mélangé (5 L) 55°C	102* à 537 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} +426% (BMP)	Dégradation du D Limonene (94,3%)		(Forgács et al., 2012)
Fumier	Thermo-chimique	Explosion à la vapeur	170°C, 25 min, 4 bars oxygène	Pilote infiniment mélangé (30 L) 55°C	70* à 320 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+357 %)	Amélioration de la dégradation de la lignine		(Ahring et al., 2015)
Fraction fermentescible des ordures ménagères	Biologique	Pré-compostage	Inoculation avec du compost mature 2,5%vol 24h à T ambiante	Pilote infiniment mélangé 4,5 L 55°C	+73,3%			(Fernandez.-Güelfo et al., 2011)
Herbe ensilée	Biologique (enzyme)	MethaPlus® L100 Application directe	Introduction avec les intrants à une concentration de 200 mg/kg de MS puis niveau d'entretien à 100 mg/kg de MS à partir de la 10 ^{ème} semaine.	Pilote (50 L), pH 8,4, 37°C, alimenté 3 fois par semaine, homogénéisation manuelle lors des introductions, ensilage avant méthanisation	Pas d'augmentation de la production de biogaz	Stabilise la teneur en MS dans le réacteur et diminue la viscosité		(De Moor et al., 2013)
Ensilage de	Biologique	Différentes	Application	Pilote (150 à 400	Aucun effet sur la	Dégradation		(Binner et

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
maïs	(enzyme)	enzymes testées dont Méthaplus et Viscozym	directe	L), 40 ou 50°C pour 2 enzymes : Optimase (Schmack Biogas AG) et Biogasverstärker (Bioreact)	production de méthane	partielle ou totale des enzymes dans le digesteur en moins d'1 h		al., 2011)

* performance de la méthanisation sans prétraitement

Annexe 4 : Performances des prétraitements appliqués à l'échelle industrielle ou pilote/laboratoire pour les boues de stations d'épuration

Résultats à l'échelle industrielle, en réacteurs continus à l'échelle pilote ou laboratoire ou en BMP uniquement pour les procédés innovants

Biomasses / Effluents	Type de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Echelle industrielle							
Boues mixtes	Hydrolyse thermique injection de vapeur + détente(Flash)	Sur boues épaissies à 16-18 MS 165-180°C 30-60 min	CSTR TSH 17 j	243* à 274 m ³ /t _{MS} (+13 %)	Stérilisation Réduction de la viscosité Meilleure déshydratabilité Accélération de la dégradation Augmentation de la charge Réduction des odeurs	Procédé Cambi Résultats sur STEP de Hamar (Norvège) de 90 000 EH Phase liquide du digestat doit être retournée en tête de STEP (DCO « colorée » et composés azotés) Procédé Cambi implanté sur > 60 sites dans le monde (Barber, 2016)	Kepp et al.2000
Boues mixtes	Explosion vapeur	140°C 1 min 0,6 MPa	CSTR 2 étapes 55-53°C	Biogaz 507* à 599 m ³ /t _{MVin} (+18%)		Résultats sur station de Liberec, (République Tchèque) 100 000 EH	(Zabranska et al., 2006b)
Boues activée (aération prolongée)	Hydrolyse thermique + détente	160°C, 30 min	CSTR		Augmentation de l'abattement des MV de 35 à 50%	Procédé Biothéllys (Véolia) Résultats sur STEP de Saumur (France)	(Chauzy et al., 2008)
Boues mixtes (40% boues activées)	Hydrolyse thermique injection de vapeur + détente(Flash)	Sur boues activées seulement	CSTR TSH 22 j Mésophile	220* à 263 m ³ /t _{MS} (+20 %)	Déshydratabilité augmente de 19,3 à 25% MS Réduction de boues solides après séparation de phase de 13145 à 9454 t/an	Procédé Cambi Résultats sur STEP Amperverbang (Allemagne)	(Barber B. et al., 2017)
Boues mixtes (40%)	Hydrolyse	Cambi sur	CSTR	220* à 317	Déshydratabilité	Procédé Cambi Solid Stream	(Barber B. et al.,

Biomasses / Effluents	Type de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
boues activées)	thermique injection de vapeur + détente(Flash)	boues digérées épaissies, séparation de phase et recirculation de la phase liquide dans le digesteur	TSH 22 j Mésophile	m ³ /t _{MS} (+44 %)	augmente de 19,3 à 36,6% MS Réduction de boues solides après séparation de phase de 13145 à 5203 t/an	Résultats sur STEP Amperverbang (Allemagne)	2017)
Boues digérées	Hydrolyse thermique continue Injection de vapeur	165°C, 30 min 0,9 MPa, Configuration digestion, lyse, digestion	2 CSTR HRT = 12 j dans le 1er HRT = 16 j dans le 2nd	Augmentation de 15-20% Biogaz 10 000 Nm ³ /j dans 1er et 9287 Nm ³ /j dans le 2nd).	Réduction de 30% de la quantité de boues	Procédé Exélys (Véolia) Résultats sur STEP de Marquette-lez-Lille (France) 700 000 EH	(Zhao et al., 2015)
Boues mixtes	Enzymatique	2 glycosilases (Novosyme A/S) 2.5 kg de chaque enzyme/tonne MS) ajout dans le digesteur	CSTR TRH = 24 j 35°C mais boucle échangeur thermique à 55°C pendant 30 à 40 min toutes les 4 h	+10 à 20%	Amélioration de la déshydratabilité	Essai de 6 mois sur une STEP	(Wawrzynczyk, 2007)
Boues mixtes (62% boues activées)	Sonication	Appliqué à 25% des boues activées	CSTR TSH= 18 j	Biogaz 7680 m ³ /j +30%	Augmentation de la dégradation de MO de 42% (sans sonication) à 54% et réduction de la MV dans le digestat (de 60% à 54%)	Résultats sur STEP de Meldorf Allemagne (65 000 EH). Technologie Ultrawaves GmbH	(Neis et al., 2008)
Boues	Sonication	20kHz Appliqué à 100% des	CSTR TSH= 18 j	Biogaz +30%	Elimination des filamenteuses Réduction de la	Résultats sur STEP de Meldorf Allemagne (65 000 EH). Technologie Ultrawaves GmbH	(Neis et al., 2008)

Biomasses / Effluents	Type de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
		boues activées			MV dans le digestat (de 60% à 45%)		
Boues mixtes (66% secondaires)	Sonication	20 kHz 13.7 W/cm ² Débit de boues 8.33 m ³ /s TSH 1.5 s	CSTR 5000 m ³ 29-33°C TSH 22,5 j,	+13 à +58% pendant l'essai. En fin d'essai de 620* à 900 L biogaz/j (+45%) charge env 120 m ³ boues /j		Résultats sur STEP Ulu Pandan Plant Singapour	(Xie et al., 2007)
Boues concentrées	Homogénéisateur haute pression	150 bars débit : 2,7 m ³ .h ⁻¹		+30%		Démonstration sur STEP	(Onyeche, 2007)
Boues mixtes (32% secondaires)	Haute pression + alcalin:	830 bar +NaOH 8000 Lboues/h Prétraitement des boues activées uniquement	CSTR Mésophile TSH 19 j	Très faible impact.	Augmentation élimination MO +14 % Réduction de la viscosité des boues secondaires de 258 centistokes à 25 centistokes	Démonstration STEP Las Angeles (Joint Water Pollution Control Plant) Etas-Unis Procédé Microsuldge	(Stephenson et al., 2007)
Boues mixtes épaissies	Electroporation Champs pulsés	20–30 kV quelques msec Traitement de 65% du débit de boues	CSTR 3,300 m ³ Mesophile TSH: 30-35 j	De 38 000 à 60 500 kWh/j (+59 %)	Amélioration abattement MO : de 52 à 56% et augmentation de la charge Augmentation de la température des boues (réduction de la consommation de	Procédé OpenCelTM. Résultats sur STEP de Mesa-Etats Unis	(Rittmann et al., 2008)

Biomasses / Effluents	Type de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
					chaleur du digesteur		
Boues urbaines	Centrifugeuse lyseuse	3140 rpm 39 m3 h-1	CSTR 2*4400 m3 TSH = 40 j mésophile	Biogaz 335* à 422 Nm ³ /t _{MV Sin} (+26 %)		Résultats sur la station de Liberec, (République Tchèque) 100 000 EH	(Zabranska et al., 2006a)
Boues urbaines	Centrifugeuse lyseuse	2250 rpm 12 m3 h-1	CSTR 2*1800 m3 TSH = 35 j mésophile	Biogaz 462* à 529 Nm ³ /t _{MV Sin} (+15 %)		Résultats sur station de Fürstenfeldbruck, (Allemagne) 70 000 EH	(Zabranska et al., 2006a)
Echelle pilote/Laboratoire							
Boues mixtes	Hydrolyse thermique, faible température:	70°C 9-48 h	CSTR 5 L 55 °C TSH: 10 d	150* à 180 m ³ /t _{MV Sin} (+20 %)		Besoin en chaleur couvert par l'augmentation de la production de méthane	(Ferrer et al., 2008)
Boues activées	autohydrolyse microaérobie:	Flacons fermés 25%vol boues, 75% vol air 55°C 12 h	CSTR 30 L 35 °C TSH: 20 d charge=3,8 kg DCO/ m3 d	10 L/j + 20 %			(Souza et al., 2013)
Boues mixtes	Microaération:	4volumes d'air/gTS 35 °C, 4 h	CSTR 14 L 35 °C TSH: 20 d	120 m ³ /t _{MV Sin} +16,4%	détérioration déshydratabilité et augmentation de la viscosité		(Ruan et al., 2019)
Boues activées	Thermique Thermique + alcalin	134°C 3.4 bar 30 min 134°C 3.4 bar 30 min, pH 12 (NaOH)	CSTR 50 L TSH=25 j, 37°C	107* m ³ /t _{MV Sin} +49% +142 %		Bilan énergétique +2.50 kJ/g MVS +4.17 kJ/g MVS Mais la consommation de NaOH n'est pas considérée (dose non donnée dans l'article)	(Chen et al., 2020)

Biomasses / Effluents	Type de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Boues activées	Alcalin	KOH 5 g KOH/100 g MS 20gMV/L 25 °C, 2 jours	CSTR 2.5 L TSH=20 j, 37°C	109* m ³ /t _{MV Sin} +39%	Augmentation de la fraction d'azote minéralisée dans le digestat (NH ₄ ⁺)	KOH doit être favorisé par rapport à NaOH si valorisation agronomique du digestat	(Elalami et al., 2020)
Boues mixtes	Acide	HCl, pH 2, 24h à 4°C	Semi-continu 22L, 35°C, TSH=12j,	141* m ³ /t _{MV Sin} +10%	Amélioration déshydratabilité (-40% de polymères pour même MS)		(Devlin et al., 2011)
Boues activées	Acide	Acide nitreux HNO ₂ Produit in situ NaNO ₂ , 20 g N/L +HCl 1M Ajout acide 1.8 mg N/L 24 h, 25°C	Semi-continu 1L, 35°C, TSH=15j, charge=2.1gM V/Lj	132* m ³ /t _{MV Sin} + 16%	Amélioration de la déshydratabilité +14% (MS des boues déshydratées)	Bilan économique positif sur une STEP hypothétique de 400 000 EH.	(Wei et al., 2018)
Boues activées	Ozonation	0.05 gO ₃ g ⁻¹ MS en prétraitement 0.045 gO ₃ g ⁻¹ MS en post-traitement + recirculation	CSTR2 L 35 °C TSH: 28 d	120* m ³ /t _{MV Sin} +108% 360* m ³ /t _{MV Sin} 0%	Amélioration élimination MS de 31% à 59% De 31% à 85%	Précédé utilisé industriellement sur la ligne eau pour la réduction des boues (Biolyse O-Suez, Aspal-Air Liquide, Praxair Lyso) Couteux en prétraitement de méthanisation, risque de minéralisation et perte de potentiel méthane Limité en post-traitement (milieu réducteur complexe, nombreuses réactions)	(Goel et al., 2003)
	Oxydation	Procédé Fenton pH3 (H ₂ SO ₄) 0.067 g Fe(II)/ g H ₂ O ₂ et 60 g H ₂ O ₂ /kg MS 60 min	Semi-continu 13L, 55°C, TSH=5j	400* m ³ /t _{MV Sin} +36%	Diminution du temps de succion capillaire mais pas d'effet sur la déshydratation sur filtre presse		(Erden & Filibeli, 2010)
Boues urbaines	Microondes	800 W 3,5 min 336 kJ/kg boues T _{finale} =80°C	CSTR 50 L TSH=20 j, 37°C Cva= 1.425 kg/m ³ j	*3367 L/m ³ _{boue} +50%		Bilan énergétique <0 -279 MJ/m ³ _{boue} Bilan économique <0 -2,66 €/m ³ _{boue}	(Appels et al., 2013)

Biomasses / Effluents	Type de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Boues activées épaissies	Microondes	2450 MHz Rampe 2.25°C/min 80°C 1 min 160°C 1 min	Codigestion avec boues primaires préfermentées (33%) Semi-continu, CSTR 1 L TSH= 20 j mésophile	+6% +11%	Digestats « class B biosolids » après digestion mésophile « class A biosolids » après digestion thermophile	Bilan production d'électricité négatif -2,1kJ/g MVS _{in} -15,6 kJ/g MVS _{in}	(Kor-Bicakci et al., 2019)
Boues activées épaissies 8% TS	Microondes+ H ₂ O ₂	MO 2450MHz 600W 80°C 0,2 g _{H2O2} /gTS 50% des boues traitées	Semi-continu 2L, 37°C, TSH=20j, charge=2.92g MV/Lj	215* m ³ /t _{MVSin} +20%	Diminution de la viscosité	Coût élevé	(Liu et al., 2018)
Testé en BMP							
Boues activées 12gMS/L	Oxydation	K ₂ FeO ₄ 200mg (FeVI)/L 1 h 600 rpm, 25°C	Batch, 37°C 30 j	89 m ³ /t _{MVSin} +42%			(He et al., 2018)
Boues activées	Radiofréquence RF Microonde MO	RF :13,56 MHz MO :2,45 GHz Rampes :3°C/m in 60°C, palier 0 min 120°C palier 0 min 120°C palier 2h	BMP	0,346* kJ/g boues RF= +5% MO=+7% RF= +14% MO=+12% RF= +20% MO=+17%		Bilan production d'énergie (énergie nette) plus favorable dans le cas des radiofréquences RF=0,32 kJ.g ⁻¹ _{boue} MO= 0,14 kJ.g ⁻¹ _{boue} RF=0,30 kJ.g ⁻¹ _{boue} MO= -0,28 kJ.g ⁻¹ _{boue} RF=-0,60 kJ.g ⁻¹ _{boue} MO= 0,28 kJ.g ⁻¹ _{boue}	(Hosseini Koupaie et al., 2018)

Annexe 5 : Performances des prétraitements appliqués à l'échelle pilote/laboratoire sur les déchets gras et coproduits animaux

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Echelle laboratoire								
Déchets d'abattoir	Thermique	Stérilisation	133°C, 20 min, > 3 bars	CSTR 10 L, 35 °C et 55°C HRT= 50 j Charge 1,5 gMVS/L j	Mésophile 720 m ³ /t _{MVS} Thermophile : réacteur instable : accumulation AGV, NH ₄ ⁺ , et acides gras longue chaîne 1070 m ³ biogaz/t _{MVSin} 65-70% CH ₄ Diminution de la production à HRT= 105 j et charge 1,6 gMVS/Lj			(Bayr et al., 2012b)
Déchets d'abattoir de bœuf, catégorie 3, taille 2/3 cm Dilution dans eau 1 :2,7	Thermique	Pasteurisation	70°C, 2 h	CSTR, 35°C TSH 125 j Charge 1,3 gMVS/L j			Accumulation d'AGV et acides gras longue chaîne si charge trop élevée	(Escudero et al., 2014)
Graisses de carcasses	Thermo-chimique	Saponification	0.04 mol NaOH/g DCO (pH 12) 70°C, 1 h	CSTR 5 L Semi-continu, avec recirculation du digestat (20%) HRT=33 j Charge 0,95 et 2,2 gDCO/Lj	Pas d'impact à la charge de 0,95 gDCO/L j +13% : 341 m ³ /t _{DCO} à charge de 2,2 gDCO/Lj Amélioration de la cinétique : +53% pour la production journalière maximale pour les deux charges	Emulsification des déchets et amélioration de leur biodisponibilité		(Affes et al., 2013)
Codigestion déchets d'abattoir +lisier bovin (1 :3)	Thermique	Pasteurisation	70°C, 1 h Appliqué au mélange Taille (<12 mm)	CSTR 5 L, 35 °C HRT= 21 j Charge 2,1-2,4 gMVS/Lj	Légère augmentation +7% 290 ± 10 m ³ /t _{MVSin} pasteurisé vs 270 ± 10 m ³ /t _{MVSin} non pasteurisé			(Luste et al., 2012)
	Mécanique	Ultrasons	1000 kJ/kgMS		Pas d'effet significatif (+11%)			

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
					300 ± 20 m ³ /t _{MVSi} n prétraité vs 270 ± 10 m ³ / t _{MVSi} n non traité			
Déchets d'abattoir (volailles) 40% (base MS) de graisses	Mécanique+ Thermique	Broyage < 3mm Stérilisation	133°C, 20 min, > 3 bars	CSTR 3 L 34°C TSH 36 j Charge 1,2 gMVS/Lj	-9 % (2,9 L/j)	Formation de composés récalcitrants (polymères complexes comprenant de l'azote) dans substrat prétraité Digesteurs instables avec ou sans prétraitements, accumulation de d'AGV et d'acides gras longue chaîne. Problèmes de moussage		(Cuertos et al., 2010)
Codigestion Déchets d'abattoir (volailles 40% graisses) + FFOM (0.7% graisses)				CSTR 3 L 34°C TSH 36 j Charge 2,6 gMVS/Lj				
FFOM (tri à la source) 82% massique + Déchets alimentaires 3% + déchets abattoirs 15%	Mécanique + thermique Echelle industrielle	Dilution, élimination des sacs puis pasteurisation	2 pulpeurs (addition d'eau)+ disperseur +tamisage Pasteurisation dans tank 8 m3 70°C, 1 h	CSTR 5 L 52°C TSH 35 j Charge 3 g MVS/Lj	Aucun impact : 17,0 ± 0,9 MJ/kg _{MVS} après pasteurisation contre 17,3 ± 0,9 MJ/kg _{MVS} sans pasteurisation		Méthaniseur industriel d'Uppsala-Suède) Pasteurisation nécessite 1.72± 0.14 MJ/kgMVS (9% de l'énergie produite par le méthaniseur) Simulation d'hygiénisations thermophiles intégrées (52°C, 10h nécessiterait 1 MJ/kg VS, soit 5% de l'énergie produite)	(Grim et al., 2015)
Codigestion graisses de STEP + boues mixtes 5 : 95 (%MV)	Thermique	stérilisation	133°C, 20 min > 3 bar Sur graisses seulement	CSTR 5,5 L semicontinu 37°C, TSH 10 j	Pas de différence significative (3%) sur la production de méthane			(Grosser et al., 2020)

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Codigestion déchets d'abattoir + boues d'épuration (1 : 7)		Pasteurisation	70°C, 1 h Appliqué au mélange	CSTR 4 L, 35 °C HRT= 20 j	Pas d'impact significatif sur le rendement spécifique: 430 ± 40 m ³ /t _{MVS} pasteurisé vs 400 ± 30 m ³ /t _{MVS} non pasteurisé mais augmentation de la concentration de l'alimentation et de la production journalière	Substrat plus homogène Diminution de 10% de la taille des déchets d'abattoir		(Luste & Luostarinen, 2010)
Codigestion Graisses et Huiles (FOG en anglais) + boues activées 70 : 30 ou 60 : 40	Biologique	Hydrolyse hyperthermophile	CSTR 70°C HRT = 2 j	CSTR 55°C HRT = 15 j (contrôle) ou 13 j après hydrolyse	Mélange 70 : 30 + 65 % 576 ± 19 vs 349 ± 54 m ³ /t _{MVS} Mélange 60 : 40 + 21% 534 ± 33 vs 440 ± 20 m ³ /t _{MVS}	Hygiénisation (Class A biosolids)	Meilleur bilan énergétique pour le système à 2 étapes hyperthermophile/thermophile que le thermophile monoétape	(Garuti et al., 2017)
Codigestion Graisses et Huiles (FOG)+boues primaires 1 : 33 (vol/vol)	Thermo-chimique		pH=10 (NaOH), 55°C, 24 h	Méthanisation 2 étapes CSTR 15 L 55°C HRT=24 j + 24 j Charge = 1,83 gMVS/L j	+37% sur production journalière (17,7 L/j avec prétraitement vs 12,9 L/j sans)			(Li et al., 2015)
Codigestion boues secondaires + eaux grasses de restaurant (90/10)	Thermo-chimique	Thermo-alcalins/saponification	80°C, 30 min, pH=8, 0,14gKOH/gMVS	CSTR 2 L, 35°C, TSH=21 j	+58% de 172 à 271 m ³ /t _{MVS}		Coût élevé de KOH	(Carrere et al., 2012)

Annexe 6 : Performances des prétraitements appliqués à l'échelle industrielle et pilote/laboratoire sur les biodéchets

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Echelle industrielle								
Déchets municipaux alimentaires, déchets verts, papiers et couches ainsi que des déchets triés incorrectement (métaux, pierres, plastiques...)	Thermique	Procédé Cambi	Tamisage et séparation des déchets les plus lourds 170°C, Flash détente		60 m ³ CH ₄ à partir de 620 kg de déchets triés (sur 1000 kg de déchets entrant) + production 150 kg digestat	Forte réduction de la viscosité des déchets, ce qui permet la séparation des déchets indésirables (plastiques)	Méthaniseur Lillehammer (Norvège) 14 000 t/an de déchets	(Panter & Kleiven, 2005)
Echelle pilote								
FFOM	Mécanique	Presse	Seulement la fraction liquide est utilisée pour la méthanisation (la fraction solide est compostée)	CSTR 0,23 m ³ 37 °C et 55°C TSH=20j Charge = 3-6 gMVS/L j	Maximum 820 et 900 m ³ biogaz/t _{MVS} à 4,5 gMVS/L j en mésophile et thermophile Moyenne 520 m ³ CH ₄ /t _{MVS} (mésophile) et 619 m ³ CH ₄ /t _{MVS} (thermophile)		33 kWh consommés par tonne de biodéchets traités	(Micolucci et al., 2016)
FFOM diluée avec des boues	Mécanique	Extrusion	Grille 8 mm	CSTR, 1 m ³ 10% TS 40°C Charge 4,3 gMVS/L j	508 m ³ biogaz/t _{MVS}			(Novarino & Zanetti, 2012)
FFOM	Biologique	« pré compostage » auto échauffement	Durée < 1 semaine	Réacteur agité, 3 m ³ 55°C 16-22% MS HRT=6 j Charge 17,8	-11% TSH 6 j 230 vs 350 m ³ /t _{MVS} +32 %			(Mata-Alvarez et al., 1993)

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
				gMVS/ L j HRT=12 j Charge 9,7 gMVS/ L j	TSH12 j 410 vs 320 m ³ /t _{MVS}			
Echelle laboratoire								
Déchets de cantine	Thermique + séparation	Stérilisation + élimination de la phase grasseuse	121°C 30 min Graisses éliminées 33%	CSTR 22 L 3% TS 35°C TSH=20j Charge 1,39 gMVS/L j	Prétraité 482 m ³ /t _{MVS} stable Non traité 479 m ³ /t _{MVS} instable	Prétraité la charge peut être augmentée à 1,84 gMVS/L j Non traité la charge doit être diminuée à 1,1 gMVS/L j		(Zhang et al., 2018c)
	Adsorption	Ajout de bentonite dans le méthaniseur			Avec bentonite 584 m ³ /t _{MVS} stable Non traité 479 m ³ /t _{MVS} instable			
Déchets de cafétéria	Thermique + séparation	Stérilisation + centrifugation	134°C, 3,2 bars 30 min Seule la fraction solide est méthanisée, la fraction liquide est utilisée pour la production d'AGV	CSTR 10 L TSH=20j Charge 2 gDCO/Lj	+19% 310 m ³ /t _{MVS} prétraité 260 m ³ /t _{MVS} non traité	Diminution de 34% de la DCO solide et augmentation de 170% de la DCO de la fraction liquide	55kJ/kg pour le traitement thermique Valeur économique : AGV+CH ₄ : 83 US \$/ton de déchet contre 29,5 US \$/ton de déchet pour CH ₄ seul	(Gianico et al., 2021)
Déchets municipaux et déchets de citron	Thermique	Explosion à la vapeur	150°C 20 min 60 bar	Semi-continu 55°C, TSH 21j	560 m ³ /t _{MVS}			(Forgács et al., 2012)
FFOM taille particules 30 mm en moyenne	Biologique	« Compostage »	Inoculé avec du compost mature 2,5% (vol/vol) Température ambiante 24 h	CSTR 5 L, 55°C 30% TS TSH =15 j	+73% 0,26 vs 0,15 L/Lréacteur j			(Fernandez.-Güelfo et al., 2011)
Déchets de cantine +	Biologique	Aérobie	39°C 2 j 50 L/h air	Réacteur voie solide discontinu à recirculation de lixiviat	- 4% par rapport au frais + 144% par rapport au stocké non aéré			(Fisgativa et al., 2019)

Biomasses / Effluents	Catégorie de prétraitement	Description prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Site et indicateurs de mise en œuvre	Référence
Contrôle stockage dans une fiole ouverte , 2 j à température ambiante				Liq/solide : 2,1 : 1	356 m ³ /t _{MVS} 371 m ³ /t _{MVS} frais 146 m ³ /t _{MVS} stocké			
Biodéchets triés à la source (Danemark) broyés (<1cm) et retrait des sacs plastiques par tambour rotatif avec addition de 8% de paille de blé pour augmenter les MS	Chimique	Oxydation voie humide	185°C, 12 bar O ₂ , 10 min 2 g/L Na ₂ CO ₃	CSTR 3 L 55°C TSH=20j charge 2,1 gMVS/Lj	Pas d'impact 360 m ³ /t _{MVS} avec ou sans prétraitement			(Lissens et al., 2004)
Digestat solide (après presse à vis, méthaniseur Dranco 50000 t/an de biodéchets et déchets verts, broyés < 5cmx2cm adition d'eau pour TS=40g/L			185°C, 12 bar O ₂ , 15 min 2 g/L Na ₂ CO ₃	CSTR 3 L 55°C TSH=15j charge 1,45 gMVS/Lj brut et 0,9-1,2 gMVS/Lj prétraité	+31% 340± 20 vs 260 ± 30 m ³ /t _{MVS}	Perte de 16 % de la DCO		

Annexe 7 : Performances des prétraitements appliqués à l'échelle industrielle et pilote/laboratoire sur les algues

* performance de la méthanisation sans prétraitement

Biomasses / Effluents	Eau douce/saline	Catégorie de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Freins/ indicateurs de mise en œuvre	Référence
Echelle pilote/Laboratoire : essais en continu ou semi-continu								
Monoraphidium sp., Stigeoclonium sp., Scenedesmus sp. and Nitzschia sp.	Eau douce	Physique (micro-ondes)	900W 3 min 70 MJ/kg MVS 26 g MS/L	nfiniment mélangé (1,5 L) 35°C TSH : 20 j	170* à 270 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+59%)		Performances diminuées pour des TSH de 15 j 130* à 170 Nm ³ CH ₄ t ⁻¹ MVS (+31%)	(Passos et al., 2014)
Spirulina maxima	Eau douce	Physique (Ultrasons)	10 min	nfiniment mélangé (1,5 L) 35°C TSH : 20 j	190* à 170 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (-10 %)			(Samson & Leduy, 1983)
Oocystis sp	Eau douce	Thermique (Hydrothermal)	130°C, 15 min 1,7 bars	nfiniment mélangé (1,5 L) 37°C TSH : 20 j	120* à 170 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+42 %)	Les cellules Oocystis sp ont été endommagées par le prétraitement		(Passos & Ferrer, 2015)
C. vulgaris	Eau douce	Thermique	120°C, 40 min Infiniment mélangé (1 L), 35°C TSH : 15 j	85 à 126 m ³ CH ₄ /t DCO _{in} (+48 %)	Aucune inhibition à l'ammonium			(Mendez et al., 2015)
90% microalgae and 10% bacteria	Eau douce	Thermique	95°C, 10h	Infiniment mélangé (1,5 L) TSH : 20 j	180* à 310 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+72 %)		Des résultats proches sont obtenus à 75°C (+67 %)	(Passos & Ferrer, 2014)
Pediastrum sp., Micractinium sp. Scenedesmus sp.	Eau douce	Thermique	60°C, 2, 4, 6h	SBR (20L) à 20°C TSH: 14-16 j	103* à 136 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+32 %)			(Kinnunen et al., 2014)
Nannochloropsis salina	Eau Saline	Thermique	100°C, 120°C 2h	nfiniment mélangé (22 L), 38°C TSH : 120 j	130* à 270 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+108%)		Accumulation d'AGV en raison de concentrations élevées en ammonium et sel Diminution des	(Schwede et al., 2013)

Biomasses / Effluents	Eau douce/saline	Catégorie de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Freins/ indicateurs de mise en œuvre	Référence
							performances	
Spirulina maxima	Eau douce	Thermo-chimique	50°C, pH 11 (NaOH)	nfiniment mélangé (1,5 L) 35°C TSH : 20 j	190* à 210 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+10 %)		Neutralisation du pH à 7 avant digestion anaérobie	(Samson & Leduy, 1983)
Spirulina maxima	Eau douce	Thermo-chimique	50°C, pH 3 (HCl)	nfiniment mélangé (1,5 L) 35°C TSH : 20 j	190* à 110 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (-42 %)	Inhibition liée à la production de sous-produits de dégradation toxiques ou à la présence de chlorures (addition d'HCl)	Neutralisation du pH à 7 avant digestion anaérobie	(Samson & Leduy, 1983)
Spirulina maxima	Eau douce	Thermo-chimique	150°C, pH 11 (NaOH)	nfiniment mélangé (1,5 L) 35°C TSH : 20 j	190* à 240 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+26 %)		Neutralisation du pH à 7 avant digestion anaérobie	(Samson & Leduy, 1983)
Chlorella vulgaris	Eau douce	Biologique (enzymes)	Alcalase 2.5 L de Novozymes (protéase) à la dose de 0,585 AU /g MS. pH 8	Infiniment mélangé (1 L) 35°C TSH : 20 j	128,4 m ³ CH ₄ /tDCO _{in} (+260%)	Légère inhibition à l'azote		(Mahdy et al., 2015)
Chlorella vulgaris	Eau douce	Biologique (enzymes)	Enzymes Novozymes. 3h 50°C puis 75°C 30 min Viscozyme (mixture de carbohy rases) à la dose de 36,3 FBG/ g MS : pH 5,5. Alcalase 2.5 L (protéase) à la dose de 0,585 AU /g MS. pH 8	Infiniment mélangé (1 L) 35°C TSH : 20 j	23 ^{5*} à 65 m ³ CH ₄ /tDCO _{in} (+182%) avec carbohydrase et 23 ^{3*} à 137 m ³ CH ₄ /tDCO _{in} (+495%) avec protéase	Solubilisation de la DCO		(Mahdy et al., 2016)
Echelle pilote/Laboratoire : essais en batch								

⁵ Estimé par rapport aux données publiées

Biomasses / Effluents	Eau douce/saline	Catégorie de prétraitement	Conditions prétraitements	Conditions méthanisation	Production de méthane	Autres impacts	Freins/ indicateurs de mise en œuvre	Référence
Mix de microalgues	Eau douce	Thermique (Explosion à la vapeur)	Autoclave industriel de 8 m ³ 0,2-1,7 bars 20 min 100, 130°C	Batch, 55°C	158* à 255 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+61%)			(Lavric et al., 2017)
Scenedesmus sp	Eau douce	Thermo-chimique	150 °C, 60 min H ₂ SO ₄ : 0.1% v/v	Batch, 37°C	104-163* à 204-316 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+95% moyenne)			(Marques et al., 2018)
Mix de microalgues	Eau douce	Biologique (C. thermocellum)	Application directe 10% volumique	Batch, 55°C	158* à 176 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+12%)	Augmentation de l'hydrolyse de la paroi cellulaire par les enzymes bactériennes		(Lavric et al., 2017)
Chlorella sorokiniana	Eau douce	Biologique enzymatique)	Enzyme/substrat ratio : 1%, pH 7, 24 h à 37°C. Enzyme : Ns22128 (cellulose) de Novozymes®	Batch, 37°C	318* à 546 Nm ³ CH ₄ /t _{MVS} (+72%)			(Cordova et al., 2018)

Bibliographie

Références bibliographiques VOLET 1

- ADEME, Bureau Veritas. 2021. Synthèse finale des installations de biométhane en projets..Etat des lieux des projets d'injection de biométhane bénéficiant d'un récépissé d'identification ADEME (période de 2012 à novembre 2020), 45 p.
- Couturier C. et al. 2016. Scénario Afterres2050 version 2016, 2016
- Frigon, J.C., Matteau-Lebrun, F., Hamani Abdou, R., McGinn P. J., J.B., O.L.S., R., G.S. 2013. Screening microalgae strains for their productivity in methane following anaerobic digestion. *Applied Energy*, **108**, 100-107.
- Hafner, S.D., Fruteau de Laclos, H., Koch, K., Holliger, C. 2020. Improving Inter-Laboratory Reproducibility in Measurement of Biochemical Methane Potential (BMP). *Water*, **12**(6), 1752.
- Jard, G., Marfaing, H., Carrère, H., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Dumas, C. 2013. French Brittany macroalgae screening: Composition and methane potential for potential alternative sources of energy and products. *Bioresource Technology*, **144**, 492-498.
- Ribeiro, T., Cresson, R., Pommier, S., Preys, S., André, L., Béline, F., Bouchez, T., Bougrier, C., Buffière, P., Cacho, J., Camacho, P., Mazéas, L., Pauss, A., Pouech, P., Rouez, M., Torrijos, M. 2020. Measurement of Biochemical Methane Potential of Heterogeneous Solid Substrates: Results of a Two-Phase French Inter-Laboratory Study. *Water*, **12**(10), 2814.

Références bibliographiques VOLET 2

- Abraham, A., Park, H., Choi, O., Sang, B.I. 2021. Anaerobic co-digestion of bioplastics as a sustainable mode of waste management with improved energy production - A review. *Bioresour Technol*, **322**, 124537.
- Abu-Orf, M., Goss, T. 2012. Comparing Thermal Hydrolysis Processes (CAMBITM and EXELYSTM) For Solids Pretreatment Prior To Anaerobic Digestion. *Proc. Water Environ*, 1024–1036
- Ademe. 2021. Les solutions de déconditionnement des biodéchets emballés et leurs performances.
- Ademe Bourgogne. 2014. Biologie des digesteurs Guide complet à destination des exploitants d'unités de méthanisation.
- Affes, R., Palatsi, J., Flotats, X., Carrere, H., Steyer, J.P., Battimelli, A. 2013. Saponification pretreatment and solids recirculation as a new anaerobic process for the treatment of slaughterhouse waste. *Bioresour Technol*, **131**, 460-7.
- AFSSA. 2004. Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage pour une meilleure maîtrise des risques sanitaires, Agence française de sécurité sanitaire des aliments, pp. 118.
- Agrikomp. 2021. Composants Pré-traitement thermique. in: *Cooker*.
- Ahring, B.K., Biswas, R., Ahamed, A., Teller, P.J., Uellendahl, H. 2015. Making lignin accessible for anaerobic digestion by wet-explosion pretreatment. *Bioresour Technol*, **175**, 182-8.
- Alqaralleh, R.M., Kennedy, K., Delatolla, R. 2018. Improving biogas production from anaerobic co-digestion of Thickened Waste Activated Sludge (TWAS) and fat, oil and grease (FOG) using a dual-stage hyper-thermophilic/thermophilic semi-continuous reactor. *J Environ Manage*, **217**, 416-428.
- Alvarez, R., Lidén, G. 2008. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*, **33**(4), 726-734.
- Appels, L., Houtmeyers, S., Degreve, J., Van Impe, J., Dewil, R. 2013. Influence of microwave pretreatment on sludge solubilization and pilot scale semi-continuous anaerobic digestion. *Bioresour Technol*, **128**, 598-603.

- Arrêté du 14 juin 2021. 2021. Arrêté du 14 juin 2021 modifiant l'arrêté du 10 novembre 2009 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les installations de méthanisation soumises à autorisation en application du titre Ier du livre V du code de l'environnement.
- Arrêté du 17 juin 2021. 2021. Arrêté du 17 juin 2021 modifiant l'arrêté du 10 novembre 2009 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation soumises à déclaration sous la rubrique n° 2781-1.
- Atelge, M.R., Atabani, A.E., Banu, J.R., Krisa, D., Kaya, M., Eskicioglu, C., Kumar, G., Lee, C., Yildiz, Y.Ş., Unalan, S., Mohanasundaram, R., Duman, F. 2020. A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery. *Fuel*, **270**, 117494.
- Barber B., Nilsen PJ, P., C. 2017. Cambi Solid Stream: Thermal hydrolysis as pre-treatment for dewatering to further reduce operating costs. in: *WEFTEC*, (Ed.) p. Proceedings of the Water Environment Federation.
- Barber, W.P. 2005. *Water and Environment Journal*. *The effects of ultrasound on sludge digestion.*, **19**, 2-7.
- Barber, W.P.F. 2016. Thermal hydrolysis for sewage treatment: A critical review. *Water Res*, **104**, 53-71.
- Barbot, Y.N., Al-Ghaili, H., Benz, R. 2016. A Review on the Valorization of Macroalgal Wastes for Biomethane Production. *Mar Drugs*, **14**(6).
- Barriatoulah, A. 2011. Guide pour les bonnes pratiques pour les projets de méthanisation.
- Batori, V., Akesson, D., Zamani, A., Taherzadeh, M.J., Sarvari Horvath, I. 2018. Anaerobic degradation of bioplastics: A review. *Waste Manag*, **80**, 406-413.
- Battista, F., Frison, N., Bolzonella, D. 2021. Can bioplastics be treated in conventional anaerobic digesters for food waste treatment? *Environmental Technology & Innovation*, **22**, 101393.
- Bayard, R., Buffière, P., Teixeira Franco, R., Coarita Fernandes, H., Tehranchi, M., Pacaud, S., Ravard, B., Le Roux, Y. 2019. Rapport final du projet PAM : Préparation des intrants avant méthanisation - Caractérisation de l'évolution bio-physico-chimique des intrants en fonction des conditions de préparation mécanique.
- Bayr, S., Pakarinen, O., Korppoo, A., Liuksia, S., Vaisanen, A., Kaparaju, P., Rintala, J. 2012a. Effect of additives on process stability of mesophilic anaerobic monodigestion of pig slaughterhouse waste. *Bioresour Technol*, **120**, 106-13.
- Bayr, S., Rantanen, M., Kaparaju, P., Rintala, J. 2012b. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes. *Bioresour Technol*, **104**, 28-36.
- Benn, N., Zitomer, D. 2018. Pretreatment and Anaerobic Co-digestion of Selected PHB and PLA Bioplastics. *Frontiers in Environmental Science*, **5**.
- Bernstad, A., Malmquist, L., Truedsson, C., la Cour Jansen, J. 2013. Need for improvements in physical pretreatment of source-separated household food waste. *Waste Manag*, **33**(3), 746-54.
- Binner, R., Menath, V., Huber, H., Thomm, M., Bischof, F., Schmack, D., Reuter, M. 2011. Comparative study of stability and half-life of enzymes and enzyme aggregates implemented in anaerobic biogas processes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **1**(1), 1-8.
- Biobang. 2021. BioBANG® annonce le démarrage d'une nouvelle unité en France.
- Biobang. 2018. CAPEX/OPEX – Applications cases. Document de la société THREE-ES S.r.l.
- Boeglin, J.-C. 1998. Traitements biologiques des eaux résiduaires. *Techniques de l'Ingénieur*, **J 3 942** – 1.
- Boey, J.Y., Mohamad, L., Khok, Y.S., Tay, G.S., Baidurah, S. 2021. A Review of the Applications and Biodegradation of Polyhydroxyalkanoates and Poly(lactic acid) and Its Composites. *Polymers (Basel)*, **13**(10).
- Boulenger, P., Gallouin, Y. 2009. Traitements biologiques anaérobies des effluents industriels *Techniques de l'Ingénieur*, **G1305 V1**.
- Brambilla, M. 2021. Biobang : applications et mise en oeuvre, (Ed.) P. C.

- Brémond, U., de Buyer, R., Steyer, J.-P., Bernet, N., Carrere, H. 2018. Biological pretreatments of biomass for improving biogas production: an overview from lab scale to full-scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **90**, 583-604.
- Carballa, M., Duran, C., Hospido, A. 2011. Should we pretreat solid waste prior to anaerobic digestion? An assessment of its environmental cost. *Environ Sci Technol*, **45**(24), 10306-14.
- Carlsson, M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F. 2012. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: a review. *Waste Manag*, **32**(9), 1634-50.
- Carrere, H., Antonopoulou, G., Affes, R., Passos, F., Battimelli, A., Lyberatos, G., Ferrer, I. 2016. Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application. *Bioresour Technol*, **199**, 386-397.
- Carrère, H., Monlau, F., Peu, P. 2021. Chapitre 11 : Prétraitements. in: *La méthanisation*, (Ed.) R. Moletta, En attente de publication.
- Carrere, H., Rafrafi, Y., Battimelli, A., Torrijos, M., Delgenes, J.P., Motte, C. 2012. Improving methane production during the codigestion of waste-activated sludge and fatty wastewater: Impact of thermo-alkaline pretreatment on batch and semi-continuous processes. *Chemical Engineering Journal*, **210**, 404-409.
- Chauzy, J., Cretenot, D., Bausseron, A., Deleris, S. 2008. Anaerobic digestion enhanced by thermal hydrolysis: first reference Biothelys(R) at Saumur, France. . *Water Pract. Technol.* (3), 2–9.
- Chen, H., Yi, H., Li, H., Guo, X., Xiao, B. 2020. Effects of thermal and thermal-alkaline pretreatments on continuous anaerobic sludge digestion: Performance, energy balance and, enhancement mechanism. *Renewable Energy*, **147**, 2409-2416.
- Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresour Technol*, **99**(10), 4044-64.
- Chen, Y., Zhang, Y., Zhang, Z. 2021. Occurrence, effects, and biodegradation of plastic additives in sludge anaerobic digestion: A review. *Environ Pollut*, **287**, 117568.
- Code de l'environnement. 2021. Article L541-21-1. in: *vol. Livre V : Prévention des pollutions, des risques et nuisances (Articles L511-1 à L597-46)*.
- Commission européenne. 2020. Règlement (UE) n°142/2011. in: *Règlement (UE) n°142/2011 de la Commission du 25 février 2011 portant application du règlement (CE) n°1069/2009 du Parlement européen et du Conseil établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et portant application de la directive 97/78/CE du Conseil en ce qui concerne certains échantillons et articles exemptés des contrôles vétérinaires effectués aux frontières en vertu de cette directive Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE*.
- COOP de France, FNCUMA. 2011. Réussir un projet de méthanisation territoriale multipartenaire.
- Cordova, O., Chamy, R., Guerrero, L., Sanchez-Rodriguez, A. 2018. Assessing the Effect of Pretreatments on the Structure and Functionality of Microbial Communities for the Bioconversion of Microalgae to Biogas. *Front Microbiol*, **9**, 1388.
- Couturier, C., Galtier, L. 1998. Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sousproduits organiques. Solagro.
- Cuetos, M.J., Gomez, X., Otero, M., Moran, A. 2010. Anaerobic digestion and co-digestion of slaughterhouse waste (SHW): influence of heat and pressure pre-treatment in biogas yield. *Waste Manag*, **30**(10), 1780-9.
- DANETV. 2010. GFE - pretreatment/NIX Concept.
- De Moor, S., Velghe, F., Wierinck, I., Michels, E., Ryckaert, B., De Vocht, A., Verbeke, W., Meers, E. 2013. Feasibility of grass co-digestion in an agricultural digester, influence on process parameters and residue composition. *Bioresour Technol*, **150**, 187-94.
- Decoopman, B. 2006. Caractérisation de fertilisants organiques. .
- DelTorchio, K. 2013. An overview of Algae biofuel research methodology. *MATER METHODS* 2013;3:167 ed, (Ed.) M.a. Methods, Vol. 2018.
- Demarquilly, C. 1973. Principe de base de l'ensilage. *Fourrages*, **56**, 15-26.

- Devlin, D.C., Esteves, S.R., Dinsdale, R.M., Guwy, A.J. 2011. The effect of acid pretreatment on the anaerobic digestion and dewatering of waste activated sludge. *Bioresour Technol*, **102**(5), 4076-82.
- Devos, P., Haddad, M., Carrère, H. 2020. Thermal Hydrolysis of Municipal sludge: Finding the Temperature Sweet Spot: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, **12**(5), 2187-2205.
- Dolci, G., Catenacci, A., Malpei, F., Grosso, M. 2021. Effect of Paper vs. Bioplastic Bags on Food Waste Collection and Processing. *Waste and Biomass Valorization*, **12**(11), 6293-6307.
- Douard, F. 2007. Avec l'explosion vapeur, Biogas Systems extrait l'énergie des biomasses difficiles. in: *Bioenergies-promotion*, Vol. 47.
- DSM. 2014. Biogas plant EnviTec. *Case Report MethaPlus®*.
- DSM. 2021. Reliable products & services.
- DSM. 2013. SARL G3 Environnement, France. in: *Case Report MethaPlus®*, (Ed.) DSM.
- Duedal, A.-L. 2021. Procédé Boost, (Ed.) P. C., Evalor.
- Dutremée, S. 2021. Président de Biogaz ingénierie, (Ed.) P. C.
- Eberlein, J.C. 2021. VOGELSANG France, (Ed.) P. C.
- Eichhorst, C. 2021. Managing Director. in: *Biopush de Weber Entec GmbH & Co. KG* (Ed.) P. C.
- Ek, A.E.W., Hallin, S., Vallin, L., Schnürer, A., Karlsson, M. 2011. Slaughterhouse waste co-digestion - Experiences from 15 years of full-scale operation. *World Renewable Energy Congress*, Suède.
- Elalami, D., Carrere, H., Monlau, F., Abdelouahdi, K., Oukarroum, A., Barakat, A. 2019. Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **114**, 109287.
- Elalami, D., Monlau, F., Carrere, H., Abdelouahdi, K., Oukarroum, A., Zeroual, Y., Barakat, A. 2020. Effect of coupling alkaline pretreatment and sewage sludge co-digestion on methane production and fertilizer potential of digestate. *Sci Total Environ*, **743**, 140670.
- Erden, G., Filibeli, A. 2010. Improving anaerobic biodegradability of biological sludges by Fenton pre-treatment: Effects on single stage and two-stage anaerobic digestion. *Desalination*, **251**(1-3), 58-63.
- Escudero, A., Lacalle, A., Blanco, F., Pinto, M., Díaz, I., Domínguez, A. 2014. Semi-continuous anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **2**(2), 819-825.
- Escudié, R., Cresson, R. 2017. Méthanisation de la biomasse. *Techniques de l'Ingénieur*, **BIO5100 V2**.
- Falipou, E., Gillot, S., Canler, J.-P., Perret, J.-M. 2020. Digestion anaérobie des boues en station d'épuration : état de l'art du parc français. *TSM* **9**.
- Fernandez-Güelfo, L.A., Álvarez-Gallego, C., Sales Márquez, D., Romero García, L.I. 2011. Biological pretreatment applied to industrial organic fraction of municipal solid wastes (OFMSW): Effect on anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*, **172**(1), 321-325.
- Ferrer, I., Ponsá, S., Vázquez, F., Font, X. 2008. Increasing biogas production by thermal (70°C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochemical Engineering Journal*, **42**(2), 186-192.
- Fink, J. 2019. Anaerobic digestion of challenging feedstock Chicken litter, straw based manure and the like. *UK AD and world biogas Expo 2019*, Birmingham.
- Fisgativa, H., Debled, M., Tremier, A. 2019. Performance of Coupling an Aerobic Pre-treatment Prior to a Solid-State Anaerobic Digestion of Food Waste. *Waste and Biomass Valorization*, **11**(2), 483-494.
- Fisgativa, H., Marcilhac, C., Girault, R., Daumers, M., Trémier, A., Dabert, P., Béline, F. 2018a. Physico-chemical, biochemical and nutritional characterisation of 42 organic wastes and residues from France. *Data in brief*, **19**, 1953-1962.
- Fisgativa, H., Tremier, A., Saoudi, M., Le Roux, S., Dabert, P. 2018b. Biochemical and microbial changes reveal how aerobic pre-treatment impacts anaerobic biodegradability of food waste. *Waste Manag*, **80**, 119-129.

- Florencio, L., Field, J.A., Lettinga G. 1994. Importance of cobalt for individual trophic groups in an anaerobic methanol-degrading consortium, Vol. 60, Applied and Environmental Microbiology.
- Forgács, G., Pourbafrani, M., Niklasson, C., Taherzadeh, M.J., Hováth, I.S. 2012. Methane production from citrus wastes: process development and cost estimation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **87**(2), 250-255.
- Fougerit, V. 2021 Responsible Conception / R&D. in: *Naskeo*, (Ed.) P. C.
- Franchetti, M. 2013. Economic and environmental analysis of four different configurations of anaerobic digestion for food waste to energy conversion using LCA for: a food service provider case study. *J Environ Manage*, **123**, 42-8.
- Frigon, J.-C., Matteau-Lebrun, F., Hamani Abdou, R., McGinn, P.J., O'Leary, S.J.B., Guiot, S.R. 2013. Screening microalgae strains for their productivity in methane following anaerobic digestion. *Applied Energy*, **108**, 100-107.
- Future Biogas Ltd. 2021. Andy Smith, Field Service Manager, (Ed.) P. C.
- Garcia-Bernet, D., Steyer, J.-P., Bernet, N. 2017. Traitement anaérobie des effluents industriels liquides. *Techniques de l'Ingénieur*, **J3943 V2**.
- Garuti, M., Langone, M., Fabbri, C., Piccinini, S. 2017. Monitoring of full-scale hydrodynamic cavitation pretreatment in agricultural biogas plant. *Bioresource Technology*.
- Gatreau, J., Becot, J. 2016. Système d'hygiénisation Biochop. in: *Journée ATEE méthanisation*. Paris, France.
- Geraats, B. 2014. LYSOTHERM® SLUDGE HYDROLYSIS Five year experience with a novel approach for operational savings. *19th European Biosolids & Organic Resources Conference & Exhibition*, Manchester, UK.
- Gerhardt, M., Pelenc, V., Bauml, M. 2007. Application of hydrolytic enzymes in the agricultural biogas production: results from practical applications in Germany. *Biotechnol J*, **2**(12), 1481-4.
- Gianico, A., Gallipoli, A., Gazzola, G., Pastore, C., Tonanzi, B., Braguglia, C.M. 2021. A novel cascade biorefinery approach to transform food waste into valuable chemicals and biogas through thermal pretreatment integration. *Bioresour Technol*, **338**, 125517.
- Gimžauskaitė, D., Šuopys, A., Tamošiūnas, A. 2020. A report on operating biogas facilities utilising anaerobic digestion of cast seaweed.
- Goel, R., Tokutomi, T., Yasui, H., Noike, T. 2003. Optimal process configuration for anaerobic digestion with ozonation. *Water Sci. Technol.* , **48**(4), 85-96.
- González-Fernández, C., Sialve, B., Bernet, N., Steyer, J.-P. 2012. Impact of microalgae characteristics on their conversion to biofuel. Part II: Focus on biomethane production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **6**(2), 205-218.
- Grim, J., Malmros, P., Schnürer, A., Nordberg, Å. 2015. Comparison of pasteurization and integrated thermophilic sanitation at a full-scale biogas plant – Heat demand and biogas production. *Energy*, **79**, 419-427.
- Grosser, A., Neczaj, E., Jasinska, A., Celary, P. 2020. The influence of grease trap sludge sterilization on the performance of anaerobic co-digestion of sewage sludge. *Renewable Energy*, **161**, 988-997.
- Hafner, S.D., Fruteau de Lacroix, H., Koch, K., Holliger, C. 2020. Improving Inter-Laboratory Reproducibility in Measurement of Biochemical Methane Potential (BMP). *Water*, **12**(6), 1752.
- Hashemi, B., Sarker, S., Lamb, J.J., Lien, K.M. 2021. Yield improvements in anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, **288**, 125447.
- He, H., Liu, Y., Wang, X., Huang, Z., Xu, C., Yang, T., Zhang, Z., Wang, L., Ma, J. 2018. Effects of newly prepared alkaline ferrate on sludge disintegration and methane production: Reaction mechanism and model simulation. *Chemical Engineering Journal*, **343**, 520-529.
- Herrero Garcia, N., Benedetti, M., Bolzonella, D. 2019. Effects of Enzymes Addition on Biogas Production From Anaerobic Digestion of Agricultural Biomasses. *Waste and Biomass Valorization*, **10**(12), 3711-3722.
- Hills, D. 1979. Effects of carbon: nitrogen ratio on anaerobic digestion of dairy manure. . *Agric Wastes* **1**(4), 267–78.

- Hindelang, X. 2021. Biotank, (Ed.) P. C.
- Hobbs, S.R., Parameswaran, P., Astmann, B., Devkota, J.P., Landis, A.E. 2019. Anaerobic Codigestion of Food Waste and Polylactic Acid: Effect of Pretreatment on Methane Yield and Solid Reduction. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2019**, 1-6.
- Hogan, F., Mormede, S., Clark, P., Crane, M. 2004. Ultrasonic sludge treatment for enhanced anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, **50**(9), 25-32.
- Hosseini Koupaie, E., Johnson, T., Eskicioglu, C. 2018. Comparison of Different Electricity-Based Thermal Pretreatment Methods for Enhanced Bioenergy Production from Municipal Sludge. *Molecules*, **23**(8).
- Hsu, T.A., Ladisch, M.R., Tsao, G.T., 1980. 1980. Alcohol from cellulose. in: *Chemical Technology 10*, pp. 315-319.
- HTS BIO. 2018. Fiche technique GLOBALFAC®, Vol. VFR03 - 15/03/2018.
- IEA Bioenergy. 2015. Solrød Biogas – Towards a circular economy, .
- IFIP. 2018. Base de données Methasim des potentiels méthanogènes et analyses chimiques (Co)-produits organiques. in: *Version 1.1 Septembre 2018*, (Ed.) T. Conçue par l'IFIP, AILE, l'Institut de l'Elevage, la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, l'ITAVI et SOLAGRO avec la collaboration technique et scientifique du Cemagref de Rennes et de l'ADEME
- INRAE Transfert Environnement. 2018. Essai en réacteur pilote. Etude expérimentale et optimisation du traitement biologique de macro-algues brunes (sargasse) par méthanisation.
- Jard, G., Marfaing, H., Carrère, H., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Dumas, C. 2013. French Brittany macroalgae screening: Composition and methane potential for potential alternative sources of energy and products. *Bioresource Technology*, **144**, 492-498.
- JORF. 2011. Arrêté du 12 juillet 2011 fixant les seuils définis à l'article R. 543-225 du code de l'environnement. in: *Dernière mise à jour des données de ce texte : 24 juillet 2011*, Vol. Version en vigueur au 31 mai 2021, JORF n°0169 du 23 juillet 2011.
- Kaiser, F. 2004. Untersuchung der Wirkung MethaPlus S100 auf die Vergärung Von Maissilage im Laborfermentor. *Bericht der Lfl Freising*.
- Kinnunen, V., Craggs, R., Rintala, J. 2014. Influence of temperature and pretreatments on the anaerobic digestion of wastewater grown microalgae in a laboratory-scale accumulating-volume reactor. *Water Res*, **57**, 247-57.
- Klassen, V., Blifernez-Klassen, O., Wibberg, D., Winkler, A., Kalinowski, J., Posten, C., Kruse, O. 2017. Highly efficient methane generation from untreated microalgae biomass. *Biotechnol Biofuels*, **10**, 186.
- Kor-Bicakci, G., Ubay-Cokgor, E., Eskicioglu, C. 2019. Effect of dewatered sludge microwave pretreatment temperature and duration on net energy generation and biosolids quality from anaerobic digestion. *Energy*, **168**, 782-795.
- Koyama, M., Watanabe, K., Kurosawa, N., Ishikawa, K., Ban, S., Toda, T. 2017. Effect of alkaline pretreatment on mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of a submerged macrophyte: Inhibition and recovery against dissolved lignin during semi-continuous operation. *Bioresource Technology*, **238**, 666-674.
- Kpogbemabou, D. 2011. *Procédé de fabrication de biocarburants à partir de biomasse lignocellulosique biologiquement déstructurée*. Thèse université de Poitiers.
- Landia. 2014. Système GasMix.
- Lausmann, A. 2021. Imengineering, (Ed.) P. C.
- Lavric, L., Cerar, A., Faneli, L., Lazar, B., Zitnik, M., Logar, R.M. 2017. Thermal pretreatment and bioaugmentation improve methane yield of microalgal mix produced in thermophilic anaerobic digestate. *Anaerobe*, **46**, 162-169.
- Leven, L., Nyberg, K., Korkea-Aho, L., Schnurer, A. 2006. Phenols in anaerobic digestion processes and inhibition of ammonia oxidising bacteria (AOB) in soil. *Sci Total Environ*, **364**(1-3), 229-38.
- Li, C., Champagne, P., Anderson, B.C. 2015. Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of municipal wastewater treatment sludge and fat, oil and grease (FOG) by a modified two-stage thermophilic digester system with selected thermo-chemical pre-treatment. *Renewable Energy*, **83**, 474-482.

- Li, H., Jin, C., Zhang, Z., O'Hara, I., Mundree, S. 2017. Environmental and economic life cycle assessment of energy recovery from sewage sludge through different anaerobic digestion pathways. *Energy* **126**, 649–57.
- Li, L., Geng, S., Li, Z., Song, K. 2020. Effect of microplastic on anaerobic digestion of wasted activated sludge. *Chemosphere*, **247**, 125874.
- Lissens, G., Thomsen, A.B., De Baere, L., Verstraete W, B., A. 2004. Thermal oxidation improves anaerobic biodegradability of raw and digested biowaste, . *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 3418-3424.
- Liu, J., Yang, M., Zhang, J., Zheng, J., Xu, H., Wang, Y., Wei, Y. 2018. A comprehensive insight into the effects of microwave-H₂O₂ pretreatment on concentrated sewage sludge anaerobic digestion based on semicontinuous operation. *Bioresource Technology* **256** 118–127.
- LMEngineering GmbH. Increased biogas yield and decreased stirring energy thanks to bioextrusion. in: *Plaquette*.
- Lopez, J.P., Devault, D., Menez, F., Péné-Annette, A., René-Trouillefou, M., Dolique, F., Lambourdière, J., Hervé, V. 2020. Note de synthèse du projet Ecologie Ecotoxicologie et Economie des Sargasses (Eco3Sar).
- Luning, J., Hol, L., Van Dijk, A., Man, D. 2014. Full scale experiences with TurboTec® continuous thermal hydrolysis at WWTP Venlo (NL) and Apeldoorn (NL) The TurboTec approach. . *19th European Biosolids & Organic Resources Conference & Exhibition* Manchester, UK.
- Luste, S., Heinonen-Tanski, H., Luostarinen, S. 2012. Co-digestion of dairy cattle slurry and industrial meat-processing by-products--effect of ultrasound and hygienization pre-treatments. *Bioresour Technol*, **104**, 195-201.
- Luste, S., Luostarinen, S. 2010. Anaerobic co-digestion of meat-processing by-products and sewage sludge - effect of hygienization and organic loading rate. *Bioresour Technol*, **101**(8), 2657-64.
- Mahdy, A., Ballesteros, M., Gonzalez-Fernandez, C. 2016. Enzymatic pretreatment of *Chlorella vulgaris* for biogas production: Influence of urban wastewater as a sole nutrient source on macromolecular profile and biocatalyst efficiency. *Bioresour Technol*, **199**, 319-325.
- Mahdy, A., Mendez, L., Ballesteros, M., González-Fernández, C. 2015. Protease pretreated *Chlorella vulgaris* biomass bioconversion to methane via semi-continuous anaerobic digestion. *Fuel*, **158**, 35-41.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., Ren, G. 2015. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **45**, 540-555.
- Marin, J., Kennedy, K.J., Eskicioglu, C. 2010. Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste. *Waste Manag*, **30**(10), 1772-9.
- Marques, A.d.L., Pinto, F.P., Araujo, O.Q.d.F., Cammarota, M.C. 2018. Assessment of Methods to Pretreat Microalgal Biomass for Enhanced Biogas Production. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, **6**(2), 394-404.
- Martin, R. 2021. INEVAL, (Ed.) P. C.
- Mata-Alvarez, J., Cecchi, F., Pavan, P., Bassetti, A. 1993. Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of fresh and pre-composted organic fraction of municipal solid waste (MSW): Digester performance. *Water Science and Technology*, **27**(2), 87-96.
- McCarty. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals. *Public Works* **95**, **9**, 107-112.
- Mendez, L., Mahdy, A., Ballesteros, M., González-Fernández, C. 2015. Biomethane production using fresh and thermally pretreated *Chlorella vulgaris* biomass: A comparison of batch and semi-continuous feeding mode. *Ecological Engineering*, **84**, 273-277.
- Micolucci, F., Gottardo, M., Cavinato, C., Pavan, P., Bolzonella, D. 2016. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of the liquid fraction of pressed biowaste for high energy yields recovery. *Waste Manag*, **48**, 227-235.
- Milledge, J., Nielsen, B., Maneein, S., Harvey, P. 2019. A Brief Review of Anaerobic Digestion of Algae for Bioenergy. *Energies*, **12**(6), 1166.
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 2018a. Arrêté du 9 avril 2018 fixant les dispositions techniques nationales relatives à l'utilisation de sous-produits animaux et de produits qui en

- sont dérivés, dans une usine de production de biogaz, une usine de compostage ou en « compostage de proximité », et à l'utilisation du lisier in: *AGRG1809743A*
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 2018b. Guide de classification des sous-produits animaux et de leurs devenir.
- Ministère de l'environnement, d.l.é.e.d.l.m., en charge des relations internationales sur le climat. . 2016. Décret n° 2016-929 du 7 juillet 2016 pris pour l'application de l'article L. 541-39 du code de l'environnement. in: *NOR : DEVR1617121D*.
- JORF n°0158 du 8 juillet 2016.
- Moletta, R. 2008. Méthanisation de la biomasse. *Techniques de l'Ingénieur*, **BIO5100 V1**.
- Moletta, R., Bernet, N., Buffière, P. 2008. *La méthanisation*.
- Mönch-Tegeder, M., Lemmer, A., Oechsner, H. 2014. Enhancement of methane production with horse manure supplement and pretreatment in a full-scale biogas process. *Energy*, **73**, 523-530.
- Monlau, F., Barakat, A., Trably, E., Dumas, C., Steyer, J.-P., Carrère, H. 2013. Lignocellulosic Materials Into Biohydrogen and Biomethane: Impact of Structural Features and Pretreatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **43**(3), 260-322.
- Monlau, F., Kaparaju, P., Trably, E., Steyer, J.P., Carrere, H. 2015. Alkaline pretreatment to enhance one-stage CH₄ and two-stage H₂/CH₄ production from sunflower stalks: Mass, energy and economical balances. *Chemical Engineering Journal*, **260**, 377-385.
- Monlau, F., Sambusiti, C., Barakat, A., Quemeneur, M., Trably, E., Steyer, J.P., Carrere, H. 2014. Do furanic and phenolic compounds of lignocellulosic and algae biomass hydrolyzate inhibit anaerobic mixed cultures? A comprehensive review. *Biotechnol Adv*, **32**(5), 934-51.
- Monteiro, F.J.B.M.B. 2009. Kinetic studies of biogas generation using enzymes for hydrolyze. in: *Institute of Food Technology and Bioprocess Engineering Technical University of Dresden* Vol. Master's Thesis, Technische Universität Dresden, pp. 87.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holzapple, M., Ladisch, M. 2005. Features of promising technologies for pre-treatment of lignocellulosic biomass. in: *Bioresource Technology* **96**, pp. 676-686.
- Neis, U., Nickel, K., Lunden, A. 2008. Improving anaerobic and aerobic degradation by ultrasonic disintegration of biomass. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, **43**(13), 1541-5.
- Nickel, K. 2021. Ultrawaves, (Ed.) P. C.
- Novarino, D., Zanetti, M.C. 2012. Anaerobic digestion of extruded OFMSW. *Bioresource Technology*, **104**, 44-50.
- Odnell, A., Recktenwald, M., Stensen, K., Jonsson, B.H., Karlsson, M. 2016. Activity, life time and effect of hydrolytic enzymes for enhanced biogas production from sludge anaerobic digestion. *Water Res*, **103**, 462-471.
- Ollivier, D. 2021. Conseiller en méthanisation, (Ed.) P. C.
- Onyeche, T. 2007. Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants. . *IWA specialist conferences moving forward wastewater biosolids sustainability*. , Moncton, New Brunswick, Canada. pp. 417- 422.
- Ormaechea, P., Castrillón, L., Marañón, E., Fernández-Nava, Y., Negral, L., Megido, L. 2016. Influence of the ultrasound pretreatment on anaerobic digestion of cattle manure, food waste and crude glycerine. *Environmental Technology*, **38**(6), 682-686.
- Ormaechea, P., Castrillón, L., Suárez-Peña, B., Megido, L., Fernández-Nava, Y., Negral, L., Marañón, E., Rodríguez-Iglesias, J. 2018. Enhancement of biogas production from cattle manure pretreated and/or co-digested at pilot-plant scale. Characterization by SEM. *Renewable Energy*, **126**, 897-904.
- Pacaud, S. 2021. Projet ANR SAVE, (Ed.) P. C.
- Panter, K., Kleiven, H. 2005. Ten years experience of full scale thermal hydrolysis projects. in: *10th european biosolids and biowastes conference*. Wakefield, United Kingdom.
- Parlement européen et conseil. 2009. Règlement (CE) No 1069/2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation

- humaine et abrogeant le règlement (CE) no 1774/2002 (règlement relatif aux sous-produits animaux).
- Parthiba Karthikeyan, O., Trably, E., Mehariya, S., Bernet, N., Wong, J.W.C., Carrere, H. 2018. Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: A review. *Bioresource Technology*, **249**, 1025-1039.
- Passos, F., Ferrer, I. 2015. Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production. *War. Res.*, **68**, 364-373.
- Passos, F., Ferrer, I. 2014. Microalgae conversion to biogas: thermal pretreatment contribution on net energy production. *Environ Sci Technol*, **48**(12), 7171-8.
- Passos, F., Hernandez-Marine, M., Garcia, J., Ferrer, I. 2014. Long-term anaerobic digestion of microalgae grown in HRAP for wastewater treatment. Effect of microwave pretreatment. *Water Res*, **49**, 351-9.
- Perez-Elvira, S., Fdz-Polanco, M., Plaza, F.I., Garralon, G., Fdz-Polanco, F. 2009. Ultrasound pretreatment for anaerobic digestion improvement. *Water Sci Technol*, **60**(6), 1525-32.
- Peu, P. 2011. La gestion des effluents d'élevage et la production d'hydrogène sulfuré, cas particulier de la méthanisation. in: *Chimie. Université Rennes 1*.
- Peyrelasse, C., Kaparaju, P., Lallement, A., Marques, M., Monlau, F. 2021. Reduction of the environmental footprint of thermo-alkali pretreatment by reusing black liquor during anaerobic digestion of lignocellulosic biomasses. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **15**(3), 657-670.
- Peyrelasse C., Lalanne M., Monlau F., Buffière P., Bayard R., F., T. 2017. Bonnes pratiques pour le stockage de matière.
- PlanET. Formation suivi biologique.
- PlanET. 2015. Rotacrex. *Biogaz Europe*.
- Ramos-Suarez, J.L., Gomez, D., Regueiro, L., Baeza, A., Hansen, F. 2017. Alkaline and oxidative pretreatments for the anaerobic digestion of cow manure and maize straw: Factors influencing the process and preliminary economic viability of an industrial application. *Bioresour Technol*, **241**, 10-20.
- RCE 1069/2009. 2009. Règlement (CE) No 1069/2009 Du parlement européen et du Conseil in: *Etablissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) no 1774/2002 (règlement relatif aux sous-produits animaux)*, (Ed.) P. européen. Journal officiel de l'Union européenne.
- Ribeiro, T., Cresson, R., Pommier, S., Preys, S., André, L., Béline, F., Bouchez, T., Bougrier, C., Buffière, P., Cacho, J., Camacho, P., Mazéas, L., Pauss, A., Pouech, P., Rouez, M., Torrijos, M. 2020. Measurement of Biochemical Methane Potential of Heterogeneous Solid Substrates: Results of a Two-Phase French Inter-Laboratory Study. *Water*, **12**(10), 2814.
- Rittmann, B.E., Lee, H.S., Zhang, H., Alder, J., Banaszak, J.E., Lopez, R. 2008. Full-scale application of focused-pulsed pre-treatment for improving biosolids digestion and conversion to methane. *Water Science and Technology*, **58**, 1895-1901.
- Rouches, E., Herpoël-Gimbert, I., Steyer, J.P., Carrere, H. 2016. Improvement of anaerobic degradation by white-rot fungi pretreatment of lignocellulosic biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **59**, 179-198.
- Rousseau, L. 2020. Préparation des intrants. in: *Journées Recherche et Innovation Biogaz et Méthanisation*. Toulouse.
- Ruan, D., Zhou, Z., Pang, H., Yao, J., Chen, G., Qiu, Z. 2019. Enhancing methane production of anaerobic sludge digestion by microaeration: Enzyme activity stimulation, semi-continuous reactor validation and microbial community analysis. *Bioresour Technol*, **289**, 121643.
- Ryan, C.A., Billington, S.L., Criddle, C.S. 2017. Assessment of models for anaerobic biodegradation of a model bioplastic: Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate). *Bioresour Technol*, **227**, 205-213.
- Salon des Gas renovable. 2021. Pretratamiento de la biomasa por cavitacion para optimizar la obtencion de biogas.

- Sambusiti, C., Ficara, E., Malpei, F., Steyer, J.P., Carrere, H. 2013. Benefit of sodium hydroxide pretreatment of ensiled sorghum forage on the anaerobic reactor stability and methane production. *Bioresour Technol*, **144**, 149-55.
- Sambusiti, C., Monlau, F., Ficara, E., Musatti, A., Rollini, M., Barakat, A., Malpei, F. 2015. Comparison of various post-treatments for recovering methane from agricultural digestate. *Fuel Processing Technology*, **137**, 359-365.
- Samson, R., Leduy, A. 1983. Influence of mechanical and thermochemical pretreatments on anaerobic digestion of spirulina maxima algal biomass. *Biotechnology Letters* **Vol 5** (10), 671-676.
- SAPOVAL. 2021. Saponification (Sapoval). in: *Trotoux, Erwan*, (Ed.) P. C.
- Schattauer, A., Abdoun, E., Weiland, P., Plöchl, M., Heiermann, M. 2011. Abundance of trace elements in demonstration biogas plants. *Biosystems Engineering*, **108**(1), 57-65.
- Schimpf, U., Junne, S., Renpenning, J. 2013. Improving the efficiency of large-scale biogas processes: pectinolytic enzymes accelerate the lignocellulose degradation. *Journal of Sustainable Energy & Environment* **4**, 4, 53-60.
- Schwede, S., Rehman, Z.-U., Gerber, M., Theiss, C., Span, R. 2013. Effects of thermal pretreatment on anaerobic digestion of Nannochloropsis salina biomass. *Bioresource Technology*, **143**, 505-511.
- Schwietzke, S., Kim, Y., Ximenes, E., Mosier, N., Ladisch, M. 2009. Ethanol Production from Maize. **63**, 347-364.
- Singh, K. 1996. Fermentation pattern and changes in cell wall constituents of straw-forage silages, straws and partners during storage. *Animal Feed Technology* **61**, 137-153.
- SOBAC. Bactériométhéa.
- SOBAC. 2018. L'amélioration de l'accessibilité de la matière organique et de la production d'énergie sur les installations de méthanisation grâce au Bactériométhéa®. *Journées recherche Innovation Biogaz et Méthanisation*, Rennes.
- Solagro. 1998. Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sous produits organiques: a review.
- Solagro. 2016. STOCKACTIF : prétraitement biologique (fongique) de la biomasse pour les bioénergies., pp. 2012-2016.
- Sole-Bundo, M., Cucina, M., Folch, M., Tapias, J., Gigliotti, G., Garfi, M.e.a. 2017. Assessing the agricultural reuse of the digestate from microalgae anaerobic digestion and co-digestion with sewage sludge. *Sci Total Environ*, **586**, 1-9.
- Sotiropoulos, A., Malamis, D., Loizidou, M. 2015. Dehydration of Domestic Food Waste at Source as an Alternative Approach for Food Waste Management. *Waste and Biomass Valorization*, **6**(2), 167-176.
- Souza, T.S.O., Carvajal, A., Donoso-Bravo, A., Pena, M., Fdz-Polanco, F. 2013. ADM1 calibration using BMP tests for modeling the effect of autohydrolysis pretreatment on the performance of continuous sludge digesters. *Water Research*, **47**(9), 3244-3254.
- Stephenson, R.J., Laliberte, S., Hoy, P.M., Britch, D. 2007. Full scale and laboratory scale results from the trial of microsludge at the joint water pollution control plant at Los Angeles County, in: *IWA Specialist Conferences. Moving Forward Wastewater Biosolids Sustainability*. Moncton, New Brunswick, Canada,.
- Teixeira Franco, R. 2018. Optimisation des pratiques de gestion des déchets agricoles en lien avec leur valorisation par méthanisation. in: *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole Doctorale de Chimie de Lyon*, pp. 261.
- Teixeira Franco, R., Buffiere, P., Bayard, R. 2016. Optimizing agricultural wastes storage before anaerobic digestion : impact of ensiling on methane potential of lignocellulosic biomass. in: *4th Int. Conf. Sustain. Solid Waste Manag.*, . Limassol, Cyprus.
- Thomas, H. 2019. Etude de l'impact des pré-traitements alcalins sur la digestion anaérobie du sorgho et du miscanthus. in: *Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE-INRA UR 0050)*, Montpellier Supagro, pp. 245.
- Thorkild, M. 2015. Pretreatment of lignocellulosic substrates for biogas production. *IBBA Workshop 2015*, Sweden.

- Tsapekos, P., Kougias, P.G., Frison, A., Raga, R., Angelidaki, I. 2016. Improving methane production from digested manure biofibers by mechanical and thermal alkaline pretreatment. *Bioresour Technol*, **216**, 545-52.
- UE. 2017. Décision d'exécution (UE) 2017/302 de la commission du 15 février 2017 établissant les conclusions sur les meilleures techniques disponibles (MTD), au titre de la directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil, pour l'élevage intensif de volailles ou de porcs. in: [notifiée sous le numéro C(2017) 688].
- Ultrawaves. BIOSONATOR compact (BGP).
- Valta, K., Sotiropoulos, A., Malamis, D., Kosanovic, T., Antonopoulou, G., Alexandropoulou, M., Jonuzay, S., Lyberatos, G., Loizidou, M. 2019. Assessment of the effect of drying temperature and composition on the biochemical methane potential of in-house dried household food waste. *Waste Manag Res*, **37**(5), 461-468.
- Vargas, L.F., Welt, B.A., Teixeira, A., Pullammanappallil, P., Balaban, M., Beatty, C. 2009. Biodegradation of Treated Polylactic Acid (PLA) under Anaerobic Conditions. . *Transactions of the ASABE*, **52**(1025–1030).
- Vintiloiu, A., Lemmer, A., Oechsner, H., Jungbluth, T. 2012. Mineral substances and macronutrients in the anaerobic conversion of biomass: An impact evaluation. *Engineering in Life Sciences*, **12**(3), 287-294.
- Vogelsang. Site internet Vogelsang.
- Wahid, R., Hjorth, M., Kristensen, S., Møller, H.B. 2015. Extrusion as Pretreatment for Boosting Methane Production: Effect of Screw Configurations. *Energy & Fuels*, **29**(7), 4030-4037.
- Wawrzynczyk, J. 2007. Enzymatic treatment of wastewater sludge: Solubilisation, improvement of anaerobic digestion and extraction of extracellular polymeric substances. . in: *Division of Pure and Applied Biochemistry*, , Lund University, Lund, Sweden.
- Wei, W., Wang, Q., Zhang, L., Laloo, A., Duan, H., Batstone, D.J., Yuan, Z. 2018. Free nitrous acid pre-treatment of waste activated sludge enhances volatile solids destruction and improves sludge dewaterability in continuous anaerobic digestion. *Water Res*, **130**, 13-19.
- Weiland, P. 2010. Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol*, **85**(4), 849-60.
- Wiley, P.E., Campbell, J.E., McKuin, B. 2011. Production of Biodiesel and Biogas from Algae: A Review of Process Train Options. *Water Environment Research*, **83**(4), 326-338.
- Williams, T.O., Burrowes, P. 2016. Thermal hydrolysis offerings and performances. *European Biosolids and Organic Resources Conference* Edinburgh, Scotland.
- Xie, R., Xing, Y., Ghani, Y.A., Ooi, K.-e., Ng, S.-w. 2007. Full-scale demonstration of an ultrasonic disintegration technology in enhancing anaerobic digestion of mixed primary and thickened secondary sewage sludge. *Journal of Environmental Engineering and Science*, **6**(5), 533-541.
- Yagi, H., Ninomiya, F., Funabashi, M., Kunioka, M. 2009. Anaerobic biodegradation tests of poly(lactic acid) and polycaprolactone using new evaluation system for methane fermentation in anaerobic sludge. *Polymer Degradation and Stability*, **94**(9), 1397-1404.
- Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., Qin, W. 2015. Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, **3**(4), 316-323.
- Yang, S., McDonald, J., Hai, F.I., Price, W.E., Khan, S.J., Nghiem, L.D. 2017. Effects of thermal pre-treatment and recuperative thickening on the fate of trace organic contaminants during anaerobic digestion of sewage sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **124**, 146-154.
- Zabed, H.M., Akter, S., Yun, J., Zhang, G., Zhang, Y., Qi, X. 2020. Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **117**, 109503.
- Zabranska, J., Dohanyos, M., Jenicek, P., Kutil, J. 2006a. Disintegration of excess activated sludge-- evaluation and experience of full-scale applications. *Water Sci Technol*, **53**(12), 229-36.
- Zabranska, J., Dohanyos, M., Jenicek, P., Kutil, J., Cejka, J. 2006b. Mechanical and rapid thermal disintegration methods of enhancement of biogas production- Full scale applications. . *IWA*

Specialized conference : Sustainable sludge management: state of the art, challenges and perspectives. , Moscow, Russia.

- Zdanevitch, I., Lencauchez, J., Duffo, L., Pineau, C., Andre, L., Ribeiro, T. 2018. CARactérisation des HAP et des métaux dans les herbages fauchés en bord de routes pour la METHANISATION.
- Zhang, D., Duan, N., Tian, H., Lin, C., Zhang, Y., Liu, Z. 2018a. Comparing two enhancing methods for improving kitchen waste anaerobic digestion: Bentonite addition and autoclaved de-oiling pretreatment. *Process Safety and Environmental Protection*, **115**, 116-124.
- Zhang, J., Li, N., Dai, X., Tao, W., Jenkinson, I., Li, Z. 2018b. Enhanced dewaterability of sludge during anaerobic digestion with thermal hydrolysis pretreatment: New insights through structure evolution. *Water Res*, **131**., 177–185.
- Zhang, L., Zhang, J., Loh, K.C. 2018c. Activated carbon enhanced anaerobic digestion of food waste - Laboratory-scale and Pilot-scale operation. *Waste Manag*, **75**, 270-279.
- Zhao, X., Chen, X., Chauzy, J., Elliott, M., Ji, M. 2015. Case study of Marquette-Lez-Lille WWTP: application of IFAS and THP for a city of the future. *Water Practice and Technology*, **10**(2), 259-268.
- Zhong, W., Zhang, Z., Luo, Y., Sun, S., Qiao, W., Xiao, M. 2011. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. *Bioresour Technol*, **102**(24), 11177-82.
- Zieliński, M., Dębowski, M., Kisielewska, M., Nowicka, A., Rokicka, M., Szwarc, K. 2019. Cavitation-based pretreatment strategies to enhance biogas production in a small-scale agricultural biogas plant. *Energy for Sustainable Development*, **49**, 21-26.