



La digestion des boues de station d'épuration : état de l'art et paramètres clés.

Juin 2020

Eva Falipou, Sylvie Gillot, Jean-Marc Perret



Sommaire

Glossaire	4
Liste des figures	4
Liste des tableaux.....	5
Remerciements.....	6
Introduction.....	7
I. Règles de l’art	9
1. Présentation générale.....	9
2. Les intrants	9
La nature des intrants	9
Zoom sur le potentiel méthanogène	10
Les différents prétraitements	12
3. Fonctionnement du digesteur	14
Les étapes biochimiques de la digestion anaérobie.....	14
Les différents types de digesteurs	15
Les différents paramètres suivis en exploitation.....	16
4. Les produits de la digestion.....	16
Le biogaz	16
Le digestat	17
Les concentrats.....	18
II. Etat des lieux et des pratiques	19
1. Méthode de récolte de données	19
2. Représentativité des réponses.....	19
3. File eau	22
Taux de charge des stations.....	23
Type de filière eau des stations	23
4. Paramètres de conception des digesteurs	24
Evolution du nombre de digesteurs construits	24
Eléments de dimensionnement.....	24
Types d’intrants acceptés dans les digesteurs	25
Préparation des intrants	26
Energie utilisée pour le chauffage	28
Agitation.....	28
5. Paramètres de fonctionnement	29
En entrée.....	29
Dans le digesteur	30
En sortie.....	31
6. Performances	32
Suivi de la production de biogaz	32

Influence du type de filière eau	34
Influence de la température de digestion.....	34
7. Utilisation du biogaz produit.....	35
8. Qualité et devenir des boues digérées	36
9. Qualité et devenir des concentrés.....	37
10. Retours d'expériences des exploitants.....	38
III. Synthèse de l'étude.....	40
Conclusion	42
Bibliographie.....	43
Annexes.....	45

Glossaire

ADEME :	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AGV :	Acide gras volatil
BMP :	Biochemical Methane Potential
DBO ₅ :	Demande biochimique en oxygène à 5 jours
DCO :	Demande Chimique en Oxygène
EH :	Equivalent Habitant
GNV :	Gaz Naturel pour Véhicules
GrDF :	Gaz réseau Distribution France
ICPE :	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IOTA :	Installations, Ouvrages, Travaux et Activités
MES :	Matière En Suspension
MO :	Matière Organique
MS :	Matières Sèches
MVS :	Matières Volatiles en Suspension
RMC :	Rhône Méditerranée Corse
SIAAP :	Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
TAC :	Titre alcalimétrique complet

Liste des figures

Figure 1 : représentation statistique de type « boîtes à moustaches » des résultats de tests BMP réalisés en laboratoire [16]-[17] sur différents types de boues d'épuration (Boues primaires N=6 ; Boues mixtes N=9 ; Boues biologiques N=15).....	11
Figure 2 : schéma général des réactions biochimiques de la méthanisation [24]	14
Figure 3 : les différentes géométries de digesteur existantes [8]	15
Figure 4 : répartition géographique des stations d'épuration équipées de digesteur recensées en juin 2019.....	20
Figure 5 : capacités nominales des stations équipées de digesteurs pour toutes les stations recensées en France (a) et pour les stations ayant répondu au questionnaire (b).....	21
Figure 6 : répartition des stations équipées de digesteurs en fonction de leur capacité nominale	22

Figure 7 : représentation du taux de charge effectif par station	23
Figure 8 : évolution au cours du temps du nombre de stations ayant répondu équipées de digesteur	24
Figure 9 : types d'intrants acceptés par les stations	26
Figure 10: schéma des différents types de préparation des boues avant digestion	27
Figure 11 : type d'énergie utilisée pour le chauffage du digesteur suivant les stations	28
Figure 12 : schéma des différents points de mesures des paramètres suivis en exploitation du digesteur	29
Figure 13 : : (a) comparaison entre les tests de potentiels méthanogènes réalisés en laboratoire [16]-[17] (Boues primaires N=6 ; Boues mixtes N=9 ; Boues secondaires ou biologiques N=15) et (b) les productions de biogaz calculées lors de l'enquête (N=16)	33
Figure 14 : devenir des boues digérées déshydratées	37

Liste des tableaux

Tableau 1 : liens entre le nombre de digesteurs, la capacité nominale de la station et le volume du digesteur	25
Tableau 2 : caractéristiques des boues ou du mélange introduit dans le digesteur	30
Tableau 3 : données statistiques sur l'âge des boues des stations étudiées	31
Tableau 4 : réduction des teneurs en MES et MVS des boues par digestion	31
Tableau 5 : réductions des teneurs en MS et MV obtenues sur la digestion des boues mixtes [6]	32
Tableau 6 : productions moyennes de biogaz et de biométhane, nombre de données et valeur médiane	32
Tableau 7 : comparaison des performances des stations thermophiles avec les performances moyennes des stations mésophiles	34
Tableau 8 : proportions de stations par type de valorisation du biogaz produit en fonction de l'année de construction du digesteur	35
Tableau 9 : évolution de la proportion de biogaz réinjecté dans le réseau	36

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes ayant rendu possible cette enquête et la réalisation de ce document:

En premier lieu, Eva Falipou, qui a mené à bien cette étude, relancé les questionnaires, traité les données et rédigé une première version de cette synthèse.

Sylvain Faixo qui a démarré cette étude comme stagiaire en testant le traitement des premières données récoltées.

Nous remercions également le Graie, et plus particulièrement Laetitia Bacot, pour sa forte implication à la diffusion de l'enquête.

Ainsi que l'ensemble des exploitants et maitres d'ouvrage des stations d'épuration qui ont pris le temps de répondre à ce questionnaire, sans qui le travail réalisé n'aurait pas pu être mené.

Enfin, nos remerciements vont à l'agence de l'eau RMC pour le co-financement de cette étude, et plus spécialement Céline Lagarrigue, pour ses conseils, remarques et relecture qui ont permis d'améliorer grandement ce travail.

Introduction

La digestion anaérobie, aussi appelée méthanisation; est un procédé biologique permettant de transformer la matière organique en biogaz et en digestat. Ce biogaz est constitué majoritairement de méthane et de gaz carbonique et représente donc une source potentielle d'énergie intéressante [1] alors que le digestat est généralement valorisé en agriculture.

En France, le procédé de digestion anaérobie est utilisé depuis les années 1940 dans le domaine de l'agriculture pour traiter les effluents d'élevage, mais il s'est depuis largement développé avec une forte augmentation du nombre d'installations depuis 1970 et une diversification des sources de matière organique comprenant les résidus agricoles, les déchets ménagers, les effluents industriels et les boues d'épuration [1]. Plus récemment, le développement de la méthanisation a bénéficié d'un contexte réglementaire favorable avec les enjeux climatiques actuels, notamment l'objectif fixé par l'Union Européenne de porter à 20% la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique suite au protocole de Kyoto [2], le plan EMAA (Energie Méthanisation Autonomie Azote) lancé en 2014 avec l'objectif d'installation de 1000 méthaniseurs pour 2020, et la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. Ce secteur tend à susciter de plus en plus d'intérêt avec un nombre important de digesteurs en projet et 514 sites de méthanisation référencés en février 2017 [3]. Concernant les boues d'épuration en particulier, la production de biogaz s'inscrit parfaitement dans l'objectif du développement de la station d'épuration du futur qui valorisera les ressources des eaux usées en plus de les traiter.

Depuis le 19 mai 2011, les collectivités peuvent vendre sur le réseau public leur production électrique issue de biogaz valorisé en cogénération [4]. Plus récemment, la législation concernant la nature des intrants pouvant être utilisés lorsque le biogaz épuré en biométhane est ensuite réinjecté dans le réseau de gaz naturel a évolué. En effet, depuis le 27 juin 2014 et la modification de l'arrêté du 23 novembre 2011, les boues de stations d'épuration d'eaux usées font partie des intrants autorisés [5] ce qui ouvre de nouvelles opportunités aux collectivités. Si la digestion était auparavant réalisée principalement pour réduire le volume des boues tout en fournissant une source d'énergie annexe à la station, elle représente désormais une source potentielle de revenus. Afin de mesurer l'impact de cette modification et de dresser un état des lieux de la situation actuelle en terme de méthanisation des boues d'épuration en France, une enquête sur le sujet a été lancée en 2018 auprès de tous les exploitants de stations de traitement des eaux usées équipées de digesteur en France métropolitaine. Le questionnaire a été élaboré en collaboration avec des exploitants de la région Rhône Alpes (GRAIE) dans le but de réactualiser le document de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse de 2012 sur la méthanisation des boues d'épuration [6].

L'objectif principal de ce rapport est de présenter l'analyse des réponses obtenues suite à l'enquête afin de mieux comprendre les relations entre la production de biogaz, les paramètres de fonctionnement du digesteur et les caractéristiques des intrants. Il s'agit également d'identifier les bonnes pratiques recommandées par les exploitants de digesteurs ainsi que les éventuels problèmes rencontrés sur sites. Pour ce faire, il a été nécessaire de relancer les

exploitants n'ayant pas répondu afin d'obtenir le maximum de données possible, puis un traitement statistique de ces données a été réalisé ainsi qu'une synthèse des retours d'expérience des exploitants de stations équipées de digesteur.

Ce document est découpé en trois parties. Tout d'abord une synthèse bibliographique présente les principaux aspects liés à la digestion des boues en suivant les différentes étapes du procédé. Une deuxième partie expose les résultats et interprétations de l'analyse des réponses au questionnaire. La troisième est consacrée à une synthèse de cet état des lieux et des difficultés rencontrées.

I. Règles de l'art

Afin d'analyser les performances d'une unité de digestion, il est nécessaire de connaître son fonctionnement et de comprendre les liens entre les différents paramètres du procédé. Cette première partie va donc présenter une synthèse bibliographique en suivant les différentes étapes du processus au « fil du traitement » : d'abord au niveau des intrants et de leur préparation, puis au niveau de la digestion elle-même, et enfin au niveau des différents produits résultants du traitement.

1. Présentation générale

Si un milieu dépourvu d'oxygène réunit les conditions physico-chimiques propices au développement de la vie et contient de la matière organique, celle-ci pourra être dégradée par des bactéries suivant le processus de la digestion anaérobie. Cette transformation se produit naturellement dans des milieux comme les marais, le fond des lacs ou les intestins des animaux, mais elle est également utilisée par l'homme pour valoriser ses déchets organiques. En effet, la digestion anaérobie présente l'avantage de dégrader la matière organique en produisant à la fois un biogaz riche en méthane et un digestat stable pouvant servir de fertilisant. Elle est donc mise en œuvre pour traiter les résidus agricoles, les déchets ménagers, les effluents industriels et les boues d'épuration. [1], [7]

Contrairement à la plupart des autres filières qui utilisent la digestion pour sa production de biogaz, la digestion des boues d'épuration a pour premier objectif de réduire la quantité de matière sèche des boues avant leur exportation du site de la station. Il s'agit de la raison principale évoquée par 75% des exploitants de stations dans une étude réalisée par Irstea en 2011 [8]. La digestion permet en effet de réduire jusqu'à 40% la teneur en MS des boues et jusqu'à 50% la teneur en MV. Le procédé a de plus l'avantage de produire un digestat stabilisé avec une forte diminution des risques d'odeur, voire hygiénisé si la température est assez élevée. L'aspect énergétique présente tout de même de l'intérêt (la formation d'un gaz valorisable est mentionnée par 25% des exploitants de l'étude [8]). Historiquement, le biogaz était principalement valorisé sous forme d'énergie thermique pour chauffer le digesteur et les locaux de la station, puis la valorisation sous forme d'énergie électrique s'est développée avec la cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur), l'électricité pouvant être utilisée par la station d'épuration ou revendue. Enfin depuis l'évolution de la législation, le biométhane peut lui-même également être revendu (en tant que gaz de ville ou GNV pour des flottes de bus municipaux).

Les performances de la digestion anaérobie en qualité et quantité de biogaz produit dépendent de plusieurs paramètres, le premier étant la nature des intrants.

2. Les intrants

La nature des intrants

Les intrants alimentant la digestion ont des caractéristiques très différentes en fonction de leur origine. Les boues d'épuration en elles-mêmes peuvent être de trois types :

- **Des boues primaires et physico-chimiques**

Les boues primaires proviennent d'une simple décantation des MES contenues dans les effluents et sont donc très organiques, aucun traitement biologique n'ayant encore eu lieu. Les boues physico-chimiques, plus concentrées, contiennent en plus un additif coagulant utilisé dans le traitement par coagulation-floculation qui permet d'agglomérer les MES.

- **Des boues biologiques**

Ces boues sont issues des traitements utilisant des bactéries libres ou fixées tels que les boues activées ou les lits bactériens. Elles sont composées principalement de floccs bactériens et leur teneur en MVS est différente suivant la charge massique de la station. Ainsi les boues de traitement à forte charge seront plus organiques que des boues provenant de traitement biologique à faible charge.

- **Des boues tertiaires ou physico-chimiques**

Ce dernier type de boues est du même type que les boues biologiques précédentes mais avec une plus faible concentration en MES. Elles sont issues du dernier étage de traitements de la file « eau » qui cible par exemple l'élimination de l'azote ou du phosphore.

Les boues biologiques sont nettement plus minéralisées que les boues primaires et ont ainsi une capacité de digestion moins importante. Il est donc courant de les mélanger avec des boues primaires avant de les introduire dans le digesteur pour former ce que l'on appelle des boues mixtes.

En plus des boues, les stations d'épuration produisent des graisses, séparées des effluents lors des prétraitements au sein du dessableur-dégraisseur. Comme ces graisses présentent un fort pouvoir fermentescible, il est intéressant de les mélanger aux boues avant un traitement conjoint.

Pour améliorer la rentabilité et les performances du digesteur, il est aussi possible d'utiliser des boues ou graisses provenant d'autres stations d'épuration en mélange avec les boues du site. D'autres déchets fermentescibles tels que les déchets agricoles ou urbains (lisiers et graisses de cantines par exemple) sont également intéressants grâce à leur potentiel méthanogène élevé [9] et peuvent être ajoutés aux boues pour améliorer la production de biogaz, en particulier dans le cas de boues biologiques seules.

Ces pratiques sont cependant limitées en France par une législation très contraignante au niveau des mélanges entre les boues d'épuration et les autres déchets. Il existe en effet de nombreux textes encadrant les mélanges d'intrants [10], comme l'article 21 de l'arrêté du 10 novembre 2009 pour la rubrique ICPE 2781 : « *En cas de méthanisation de boues issues du traitement des eaux usées domestiques, le mélange de boues de différentes origines et le mélange de boues avec d'autres déchets sont soumis à l'autorisation préalable du préfet, qui peut autoriser ce mélange dès lors que l'opération tend à améliorer les caractéristiques agronomiques ou techniques de ces matières.* ». L'article 28 ter de l'arrêté du 12 août 2010 de cette même rubrique indique également plusieurs critères à respecter tant au niveau des boues que des autres intrants. Enfin, l'article 86 de la loi n°2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire interdit désormais le mélange de boues avec un autre biodéchet. Des complications réglementaires peuvent aussi survenir pour retracer une pollution due à un épandage de digestat.

Zoom sur le potentiel méthanogène

Le potentiel méthanogène ou BMP (Biochemical Methane Potential) est un test de laboratoire qui permet de mesurer la quantité maximale de biogaz et de méthane qu'un substrat est capable de produire. Il s'exprime en Nm^3 de méthane produit par kg de matière volatile appliqué ($\text{Nm}^3\text{CH}_4.\text{kg MV}^{-1}$) ou, pour les effluents, en Nm^3 de méthane produit par kg de DCO appliqué ($\text{Nm}^3\text{CH}_4.\text{kg DCO}^{-1}$).

La mesure du BMP d'un substrat se déroule en laboratoire dans des conditions contrôlées. Dans un protocole mis au point par l'INRA [11], le substrat est incubé durant 20 jours à l'aide d'un inoculum anaérobie dans des fioles sans air placées dans une étuve agitée et thermostatée à 35°C. Au préalable, le substrat est caractérisé par la mesure de ses taux de matière sèche (MS) et matière volatile (MV) pour un échantillon solide, ou par la mesure de la DCO pour un échantillon liquide. La production de biogaz est alors suivie dans le temps jusqu'à la fin de la réaction. La composition du biogaz est également suivie et analysée par chromatographie en phase gazeuse. On détermine le BMP par la quantité de méthane produit par kg de matière volatile appliqué, en $\text{Nm}^3\text{CH}_4_{\text{produit}}.\text{kg MV}^{-1}$.

De nombreuses recherches ont été menées pour évaluer le potentiel méthanogène de différents substrats. Ces résultats sont surtout utiles pour la méthanisation en milieu agricole où de nombreux déchets différents sont mélangés pour être digérés. De manière générale, il ressort de ces recherches que les boues d'épuration ont en moyenne un potentiel méthanogène moins élevé que les autres substrats organiques comme les restes de nourritures, les déchets végétaux ou les lisiers [12]–[15].

Concernant les boues d'épuration, un travail de synthèse a été réalisé à Irstea sur les données des différentes études disponibles. Les résultats sont présentés sous forme de boîtes à moustaches sur la Figure 1 ci-dessous.

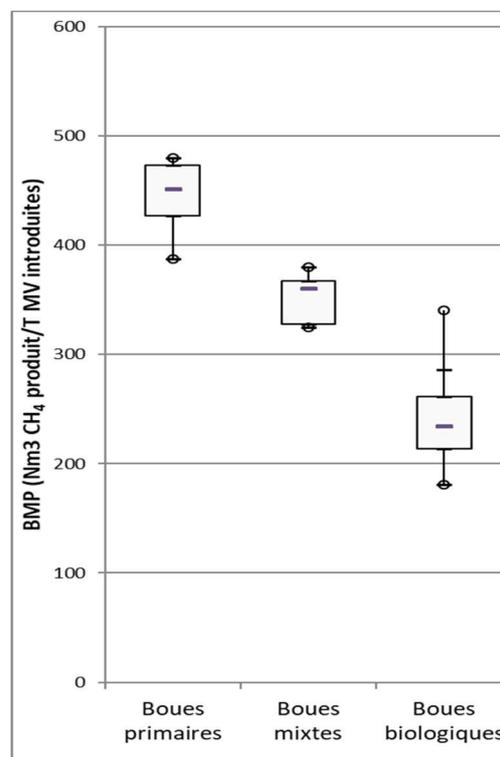


Figure 1 : représentation statistique de type « boîtes à moustaches » des résultats de tests BMP réalisés en laboratoire [16]-[17] sur différents types de boues d'épuration (Boues primaires N=6 ; Boues mixtes N=9 ; Boues biologiques N=15)

On retrouve sur ce graphique une répartition logique des potentiels méthanogènes en fonction du type de boues d'épuration. Les boues biologiques, plus minéralisées que les boues primaires, atteignent des valeurs de BMP bien moins élevées. L'ajout de boues primaires pour former des boues mixtes permet d'améliorer les résultats pour obtenir une valeur intermédiaire qui varie en fonction du taux de mélange réalisé.

Ces résultats permettent de fournir des ordres de grandeur pouvant être utilisés lors du dimensionnement d'un digesteur en station d'épuration. Cependant, ces tests pilotes fournissent des résultats supérieurs aux valeurs réelles du fait des conditions de laboratoire parfaitement contrôlées (agitation, homogénéisation élevée). Ils sont donc à prendre avec précaution. On retiendra que les BMP permettent surtout de classer les différents déchets en fonction de leur potentiel méthanogène, ce qui est surtout utile pour des projets de co-digestion.

Les différents prétraitements

Avant d'alimenter le digesteur, les boues doivent subir un épaissement. Pour cela différentes techniques sont utilisées : l'épaississement gravitaire, la flottation, un passage sur table d'égouttage ou la centrifugation [8].

Il est également fréquent de prétraiter les boues à travers un tamis ou un broyeur pour éviter la formation de filasses dans le digesteur par la suite.

Afin d'améliorer l'efficacité de la digestion, il existe en plus différentes techniques pour désintégrer les boues avant l'alimentation du réacteur. Les boues d'épuration ne sont en effet que lentement biodégradables en anaérobiose, mais il est possible d'améliorer cette biodégradabilité et ainsi de réduire le temps de rétention dans le digesteur tout en augmentant la production de biogaz. Ces techniques, regroupées sous le nom de désintégration des boues, sont basées sur la rupture de la paroi des cellules de bactéries constituant les boues, ce qui libère les matières intracellulaires qui deviennent plus accessibles aux bactéries anaérobies. Il existe différents types de traitements, thermiques, mécaniques ou biologiques, mais les plus utilisés au niveau industriel en France sont les ultrasons et l'hydrolyse thermique, l'électrocinétique faisant son apparition. [1] Les performances de ces différents prétraitements restent à évaluer.

- Hydrolyse thermique

Ce traitement s'effectue généralement entre 150°C et 200°C. Pour des températures supérieures à 200°C il faudra faire attention à la possible formation de composés réfractaires ou d'intermédiaires toxiques [18].

Sur les installations industrielles, l'élévation de température est généralement obtenue en injectant de la vapeur directement au cœur des boues [1].

Il existe actuellement deux procédés industriels d'hydrolyse thermique, commercialisés en France par les groupes Suez et Veolia Waters :

Digeslis Turbo® (Suez)

Ce procédé couple le procédé norvégien Cambi avec un digesteur anaérobie mésophile (basse température). Les boues sont d'abord maintenues dans un premier réacteur à une température d'environ 160°C pendant 30 min avant de subir une détente qui provoque la destruction des cellules. Elles alimentent ensuite le digesteur.

Les performances annoncées par le constructeur sont :

- Une production de biogaz augmentée de 50%, associée à une réduction de 50% de la quantité de matière organique

- Une réduction du volume des boues finales
- Un volume de digesteur divisé par deux et donc des installations plus compactes (ou de capacité doublée)
- Une amélioration de la siccité des boues digérées de 4 à 8%
- Des boues hygiénisées ne contenant plus de pathogènes grâce à la température de 160°C

Le constructeur prend pour exemple d'application de son procédé l'usine de Mapocho au Chili (2.5 millions d'équivalents habitants) où la mise en place de Digeslis Turbo® doit permettre une augmentation de la production d'électricité de 6% et une diminution de la production de boues de 27% [19]. Aucune référence française n'existe actuellement.

Biothélys® et Exelys® (Véolia Waters)

Le procédé Biothélys® fonctionne en batch (c'est-à-dire par bâchées et non pas en continu) et sa mise en œuvre est semblable à celle de Suez avec une digestion anaérobie mésophile précédée d'un premier réacteur avec 30 min de temps de séjour à 165°C sous 6 à 8 bars. En France, il équipe les stations d'épuration de Saumur (60 000 EH), du Pertuiset (80 000 EH), de Château-Gonthier (38 000 EH), de Tergnier (30 000 EH) et de Toulouse (950 000 EH). [20]

Le procédé Exelys® fonctionne lui en continu en assurant également un temps de séjour des boues de 30 min environ à 165°C et sous 6 à 8 bars. Il équipe les stations de Bonneuil-en-France (prototype industriel), Versailles (330 000 EH) et Marquette-lez-Lille (620 000 EH). [1], [21]

Les performances de ses procédés annoncées par le constructeur sont :

- Une production de biogaz augmentée de 30 à 50%
- Une réduction de la production de matières sèches de 25 à 35%
- Pas de nuisances olfactives
- Des boues hygiénisées et stabilisées, valorisables en agriculture

Le constructeur propose plusieurs configurations pour la mise en place de ses procédés dont une brevetée, annoncée comme optimale en terme d'énergie, constituée de deux digesteurs : les boues passent dans le premier digesteur avant de subir l'étape d'hydrolyse thermique puis sont refroidies et diluées avant de passer dans le second digesteur. Cette configuration produirait plus de gaz et d'électricité en consommant moins de vapeur et en réduisant au maximum le volume de boues digérées. [20]

- **Ultrasonication**

Avec cette technique, l'éclatement des cellules est réalisé grâce au phénomène de cavitation (formation de bulles qui en implosant provoquent une importante libération d'énergie avec des températures et pressions localement très élevées) induit par le passage des boues au travers d'ondes ultrasonores à basse fréquence (20-40 kHz). Les floes sont ainsi déstructurés et les membranes des cellules détruites, ce qui permet de solubiliser la matière organique. Différentes études ont montré que ce procédé permet d'augmenter les performances de la digestion anaérobie jusqu'à 40% en continu et 140% en batch. La production de biogaz est améliorée et le temps de séjour dans les digesteurs réduit. Ce prétraitement permet également d'éliminer les bactéries filamenteuses. Il présente de plus l'avantage de ne pas utiliser de produits chimiques et de ne pas former de sous-produit. Son inconvénient majeur reste le fort besoin en énergie. [1], [18]

En France, ce procédé développé par Ultrawaves est commercialisé par le groupe SAUR sous le nom de Sonoflux®. Il équipe les stations de Tournay-Cherbourg (150 000 EH) et des Ecosières à Saint-Nazaire (100 000 EH). [1]

Le groupe VINCI a également équipé la station d'épuration Campo Dell'Oro à Ajaccio (40 000 EH) d'un système à ultrasons similaire pour optimiser la méthanisation. [22]

- Electrocinétique

Cette technique est utilisée en Allemagne où le système BioCrack de Vogelsang est très développé. Avec ce procédé, les boues sont recirculées au travers d'une chambre de traitement où elles sont soumises à un champ haute tension. Les forces électriques vont alors broyer les amas de matière organique et de bactéries avec pour effet, comme pour les techniques précédentes, de rendre les nutriments plus disponibles pour les bactéries. [23]

En France, la station d'épuration de Reventin Vaugris (125 000 EH) est équipée de ce système.

Les différents intrants mélangés et épaissis, après avoir subi ou non un prétraitement spécifique, alimentent ensuite le digesteur en continu ou par bâchées.

3. Fonctionnement du digesteur

Les étapes biochimiques de la digestion anaérobie

Une fois les intrants, et donc la matière organique, introduits dans le digesteur, le processus de méthanisation illustré sur la figure 2 peut commencer jusqu'à la formation du biogaz.

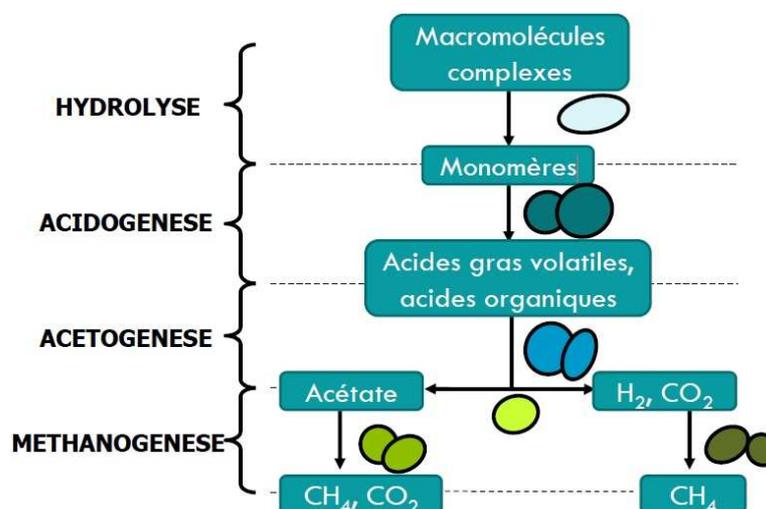


Figure 2 : schéma général des réactions biochimiques de la méthanisation [24]

Ce processus est composé de quatre grandes étapes biochimiques successives détaillées ci-dessous [1], [6], [8] :

- L'hydrolyse

Durant cette première étape, des bactéries hydrolytiques transforment les macromolécules organiques présentes dans les intrants (polysaccharides, lipides, protéines...) en monomères plus simples (acides aminés, acides gras, sucres simples...).

- **L'acidogenèse**
Les monomères formés sont ensuite transformés par des bactéries fermentaires en plusieurs composés tels que des acides gras volatils (AGV), des acides organiques, des alcools, de l'hydrogène et du gaz carbonique.
- **L'acétogenèse**
À ce stade, ce sont les bactéries acétogènes qui utilisent les composés simples formés précédemment pour produire de l'acétate, de l'hydrogène et du gaz carbonique qui sont les précurseurs du méthane.
- **La méthanogenèse**
Dans cette dernière étape, le biogaz est formé à partir de l'acétate, de l'hydrogène et du gaz carbonique par des bactéries acétoclastes et hydrogénotrophes suivant deux types de réaction. Environ 70% du méthane est produit par la dégradation des acétates (ce qui produit également du CO₂). Le reste provient de la transformation du dioxyde de carbone et de l'hydrogène en méthane et en eau.

Les différents types de digesteurs

Les digesteurs dits « à boues libres » utilisés en stations d'épuration peuvent être conçus suivant quatre géométries différentes représentées sur la figure 3 ci-dessous.

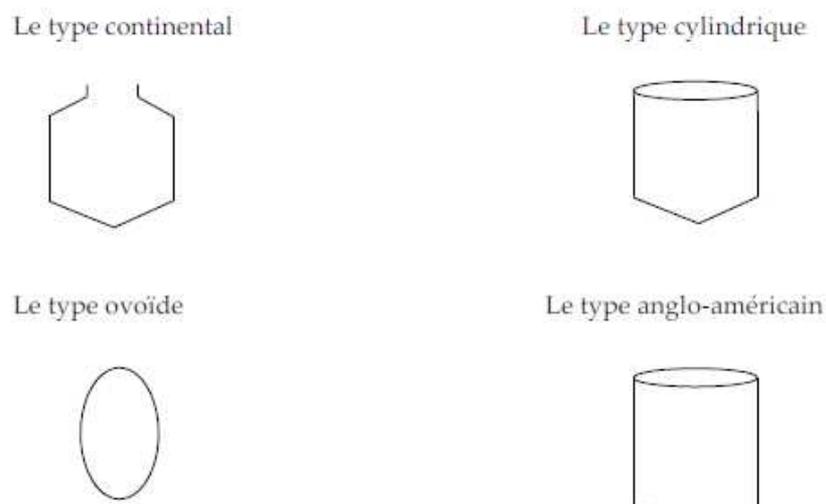


Figure 3 : les différentes géométries de digesteur existantes [8]

En France, les constructeurs proposent principalement des digesteurs de types continental ou cylindrique qui sont donc majoritaires. Les préférences varient suivant les pays mais la configuration la plus efficace est la forme ovoïde qui permet un meilleur brassage et réduit le risque de formation de mousses. On trouve ce type de digesteur principalement en Allemagne.

Outre la forme du digesteur, il existe plusieurs configurations en fonction de la température à laquelle est réalisée la digestion. Pour un fonctionnement entre 30 et 40 °C, on parlera de digestion mésophile. Il s'agit de la configuration la plus répandue au niveau industriel. Les digesteurs peuvent aussi fonctionner en mode thermophile (de 50 à 65 °C) ce qui permet d'améliorer la vitesse de l'hydrolyse, de construire des réacteurs de volume plus

faible et d'obtenir des boues plus hygiénisées qu'avec une digestion mésophile. Ce mode de fonctionnement nécessite cependant un apport d'énergie plus important et est réputé pour être moins stable [1]. Il existe enfin une possibilité de combiner les deux configurations pour fonctionner en deux phases (donc avec deux ouvrages en série) : une première étape thermophile suivie d'une seconde mésophile.

Au sein du digesteur, le brassage est un élément essentiel pour le bon fonctionnement du procédé puisqu'il permet à la fois de mettre en contact les intrants avec la biomasse active, d'homogénéiser le mélange et d'éviter les dépôts en fond de réacteur. Il existe différents systèmes globalement répartis entre les brassages mécaniques (systèmes de rotation de pâles) et le brassage par bullage du biogaz (le biogaz produit est comprimé et réinjecté au fond du digesteur d'où il remonte en entraînant les boues). Souvent, les digesteurs disposent également d'un système de recirculation des boues qui permet de les faire circuler vers un échangeur de chaleur avant de retourner dans le réacteur dans le but de maintenir une température stable dans l'ouvrage. Ce système contribue lui aussi en partie au brassage.

Les différents paramètres suivis en exploitation

De nombreux paramètres peuvent être mesurés dans une installation de digestion pour suivre le bon déroulement de la réaction et prévenir les dysfonctionnements. Cependant, la fréquence et le type d'analyses à réaliser dépendent de l'exploitant et varient en fonction des spécificités de l'installation telles que la nature du substrat, le type de procédé, ou encore les objectifs poursuivis (un suivi, une optimisation des performances, une réduction des consommations de réactifs, etc.) [1].

On peut néanmoins citer parmi les analyses minimales à effectuer les paramètres suivants :

- La température au sein de l'ouvrage
- Des mesures de débits pour surveiller le fonctionnement général, calculer les temps de séjour de la boue dans l'ouvrage et prévenir les problèmes de bouchages
- Une surveillance de la composition du biogaz produit
- La mesure du pH car la biomasse y est particulièrement sensible
- L'alcalinité (TAC) qui traduit le pouvoir tampon du milieu
- La concentration en AGV (produits lors de l'hydrolyse) qui est un indicateur de la stabilité de la réaction
- Le ratio AGV/TAC
- La caractérisation des substrats à traiter (MS, MV, DCO, N-NH₄)

En sortie du digesteur, trois types de produits issus de la réaction sont obtenus : le biogaz, la fraction solide du mélange restant appelé digestat et la fraction liquide appelée centrats. Ces différents éléments ont chacun un devenir spécifique.

4. Les produits de la digestion

Le biogaz

Le biogaz produit est tout d'abord récupéré et stocké, généralement dans un gazomètre qui peut être de type sphérique ou souple. Il existe également des cloches gazométriques ou des systèmes avec des couvertures de cuve étanches. En surface de digesteur, le gaz récupéré, bien que constitué majoritairement de méthane et de gaz carbonique inerte, est également saturé en eau et contient du sulfure d'hydrogène (H₂S). Il est donc corrosif et doit subir une étape de condensation de l'eau généralement combinée à une étape de désulfuration. Il existe de plus des

limites concernant les taux de H₂S admissibles en fonction du type de valorisation du gaz, car il se transforme en SO₂ lors de sa combustion et ce gaz est soumis à des normes d'émissions. Pour l'alimentation d'une chaudière biogaz, la teneur maximale admissible en H₂S est par exemple de 1 000 ppm. Dans le cas d'une valorisation poussée sous forme de biocarburant ou d'injection dans le réseau, le biogaz doit subir un traitement plus poussé pour se rapprocher du gaz naturel. [1]

De manière générale, la première utilisation du biogaz est le chauffage du digesteur. Mais il existe différentes voies de valorisation permettant de tirer parti de cette énergie.

- **La production de chaleur**

Le biogaz peut être utilisé en tant que valorisation thermique directement au sein de la station, pour des sècheurs de boues déshydratées par exemple, ou pour des entreprises extérieures proches. On peut dans ce cas se contenter d'une élimination de l'humidité en surveillant la teneur en H₂S pour rester dans les normes.

- **La production d'électricité**

Il s'agit généralement de cogénération, c'est-à-dire de production d'électricité couplée à une production de chaleur (la production d'électricité seule présentant de faibles rendements). L'électricité produite peut être utilisée sur le site ou bien revendue au réseau. Il existe une obligation d'achat de l'électricité produite à partir de biogaz dont les modalités sont définies dans l'arrêté du 19 mai 2011 [25]. Pour réaliser une cogénération, on utilise des moteurs à gaz ou des turbines à gaz. Une désulfuration et une élimination de l'humidité sont alors nécessaires pour éviter la dégradation des installations.

- **Les biocarburants**

Le biogaz peut également être utilisé sous la forme de carburant automobile (GNV) pour alimenter des flottes urbaines telles que des bus de transport scolaire ou des camions de collecte des ordures ménagères. Les traitements nécessaires sont alors plus poussés et comprennent des étapes de compression, désulfuration, décarbonation, déshydratation et déshalogénéation avant son stockage. Plusieurs techniques peuvent être utilisées : des techniques par absorption physique (comme le lavage à l'eau) ou chimique (comme l'absorption aux amines), des techniques par adsorption (le PSA, adsorption par variation de pression), la séparation membranaire ou l'épuration cryogénique. En France, les stations de Marquette-lez-Lille et de la Métropole de Grenoble utilisent cette voie de valorisation pour alimenter une flotte de bus.

- **L'injection dans les réseaux de ville**

Enfin, l'injection du biogaz dans le réseau est la dernière voie de valorisation rendue possible par la législation en 2014 pour les boues d'épuration. Pour y être autorisé, le biogaz doit être épuré jusqu'à devenir du biométhane le plus semblable possible au gaz naturel. Les traitements à suivre sont les mêmes que pour le GNV. À la fin, le biogaz doit contenir plus de 97% de méthane. Avant d'être injecté au réseau de distribution, il est contrôlé et odorisé par GrDF pour la sécurité des usagers. [26]

Le digestat

Après digestion, les boues extraites sont appelées digestat (ou boues digérées). Ce digestat est déshydraté afin de réduire le volume de boues à évacuer, puis il peut subir des traitements complémentaires en fonction de sa valorisation finale (chaulage ou séchage par

exemple). Les différentes voies de valorisation existantes aujourd'hui en France sont le retour à la terre sous forme d'épandage ou après compostage, l'incinération, et en dernier recours la mise en décharge.

La digestion des boues offre plusieurs avantages comparés à une filière de boues classique pour une valorisation des boues en épandage ou en compostage. Tout d'abord les boues digérées occupent un volume réduit ce qui diminue les coûts de déshydratation, de transport et de stockage. Elles contiennent également moins d'agents pathogènes et disposent d'une fraction d'azote ammoniacal (directement disponible pour les plantes) plus élevée. Ces voies sont le type de valorisation le plus utilisé. Il existe cependant un risque lié à une concentration des éléments métalliques dans le digestat qui peut dépasser le maximum autorisé et empêcher alors une valorisation agronomique des boues.

Concernant l'incinération, les boues digérées peuvent, après des étapes de déshydratation et de séchage, représenter une alternative intéressante pour les cimenteries ou les centrales thermiques utilisant en temps normal des combustibles fossiles. Sinon, les boues sont dirigées vers des incinérateurs dédiés, présents sur les stations d'épuration importantes. Il est néanmoins nécessaire de connaître parfaitement leur composition pour maîtriser les traitements des gaz issus de leur combustion. [1], [8]

Les centrats

La fraction liquide du digestat récupérée après l'étape de déshydratation est appelée centrat. Elle est généralement chargée en phosphore et en azote ammoniacal et est renvoyée en tête de station pour y être traitée sur la file « eau ». Ces retours en tête peuvent cependant être à l'origine de dysfonctionnements de la station. En effet, les concentrations en azote et en phosphore dans les centrats peuvent être jusqu'à 20 fois plus élevées que dans les effluents bruts à l'entrée des stations d'épuration, et celles-ci ne sont pas forcément dimensionnées pour traiter cette charge supplémentaire. De plus, il existe un risque de colmatage des conduites dû à la précipitation de struvite (cristaux composés d'ammonium, de phosphate et de magnésium).

Si nécessaire, il est possible de mettre en place des traitements biologiques spécifiques de ces retours en tête. L'azote peut être traité par des procédés biologiques comme Sharon et Anammox qui court-circuitent l'étape naturelle de nitrification et permettent d'éliminer l'ammonium (shunt des nitrates). [27] Le stripping de l'ammoniaque (traitement permettant de le séparer de la phase liquide) peut également être envisagé.

II. Etat des lieux et des pratiques

Alors que la législation et les pratiques liées à la digestion des boues de stations d'épuration évoluent, il existe peu de rapports récents rendant compte de la situation au niveau national. Avec l'augmentation de l'intérêt pour cette technologie, il est important de connaître les configurations actuellement en place et les différents problèmes existants pour développer au mieux cette filière. Cette seconde partie s'attache donc à établir un état des lieux et des pratiques des installations actuellement équipées d'une unité de digestion.

1. Méthode de récolte de données

Dans le but de réaliser un état des lieux le plus complet possible et de réactualiser le document de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse de 2012 [6] sur la méthanisation des boues d'épuration, la première étape a été de recenser les stations d'épuration de collectivités équipées d'un digesteur. Ce recensement a été effectué en utilisant les listes des agences de l'eau et de l'ADEME ainsi que les données disponibles à Irstea. Un questionnaire a ensuite été envoyé à tous les exploitants de stations de traitement des eaux usées équipées de digesteur en France métropolitaine par le biais du Graie à travers des envois groupés par mail. Devant le faible taux de réponse, une stratégie de relances individuelles a ensuite été adoptée, d'abord par mail puis par courrier.

Le questionnaire a été réalisé conjointement par certains exploitants de la région Rhône Alpes, le Graie et Irstea. Il est constitué de 12 sections couvrant tous les aspects de la station liés à la filière digestion afin de pouvoir identifier des liens entre les différentes observations (voir annexe I). Les questions portent à la fois sur la filière eau de la station, la filière boue, la conception et le fonctionnement des digesteurs, la réglementation et l'utilisation des différents produits issus de la digestion. La dernière section est un retour d'expérience plus ouvert permettant aux exploitants de rapporter les différents problèmes rencontrés.

2. Représentativité des réponses

L'étape de recensement a permis d'identifier 96 stations d'épuration équipées d'une filière de digestion en fonctionnement en France en 2019, ainsi que 9 projets de digestion connus. Ces recherches ont permis d'aller au-delà des données centralisées par l'ADEME qui recense en 2019 73 installations de digestion en stations d'épuration dans l'outil SINOE[®] Déchets [28].

À la suite des différentes relances, 36 stations ont répondu au questionnaire, ce qui correspond à un taux de réponse de 37%. Si on se concentre sur le territoire géographique dépendant de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, ce taux de réponse monte à 52%. Ce résultat peut s'expliquer par un meilleur contact avec les exploitants qui avaient déjà été sollicités pour l'état des lieux réalisé en 2012. La figure 4 ci-dessous montre la répartition des 96 stations équipées sur le territoire en distinguant celles ayant répondu au questionnaire ainsi que les projets de digestion.

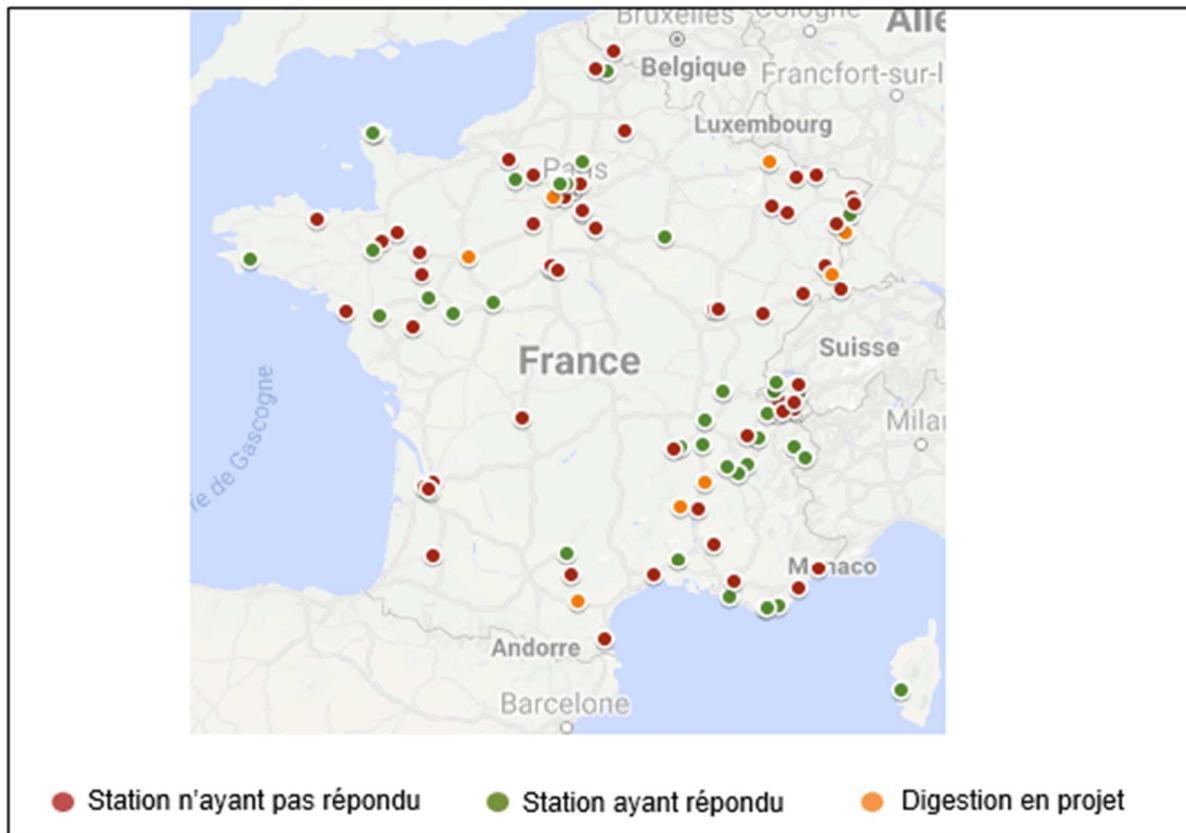


Figure 4 : répartition géographique des stations d'épuration équipées de digesteur recensées en juin 2019

Cette carte permet de souligner l'absence presque totale d'unités de digestion dans le centre et le sud-ouest de la France à l'exception de certaines grandes villes. Inversement, on observe une forte concentration de stations équipées en Haute-Savoie, ce qui avait déjà été relevé dans le rapport de 2012 [6]. Ces différences peuvent être dues à l'implication plus ou moins forte des départements dans le soutien à ces projets. Le département de Haute-Savoie a par exemple fait le choix de participer financièrement à la réalisation d'études de faisabilité nécessaires à la mise en œuvre des projets de digestion.

Le taux de réponse obtenu, de 37%, peut paraître faible et plusieurs explications sont apportées pour expliquer les difficultés rencontrées pour récolter les résultats. Tout d'abord le questionnaire envoyé était long et technique, il était nécessaire de prendre du temps pour récupérer les données demandées ce qui a pu décourager un certain nombre d'exploitants. Les envois groupés par mail utilisés pour le lancement de l'enquête ont sans doute également réduit l'impact, Irstea étant moins visible, et les stations se sentant moins concernées en étant diluées dans la masse. Un autre problème important était d'identifier la bonne personne à contacter pour obtenir une réponse au questionnaire. En effet, les relations entre le maître d'ouvrage et l'exploitant sont parfois tendues et peuvent bloquer la transmission de l'information. Enfin, certaines stations étaient dans une période de transition entre deux exploitants ou bien en train de lancer des appels d'offre pour leur future exploitation ce qui provoque également des difficultés pour accéder aux données.

Malgré cela, les réponses obtenues sont suffisantes pour évaluer la situation nationale si l'échantillon est représentatif du territoire entier. Pour évaluer cette représentativité, des représentations statistiques de types boîte à moustaches ont été réalisées (figures 5a et 5b).

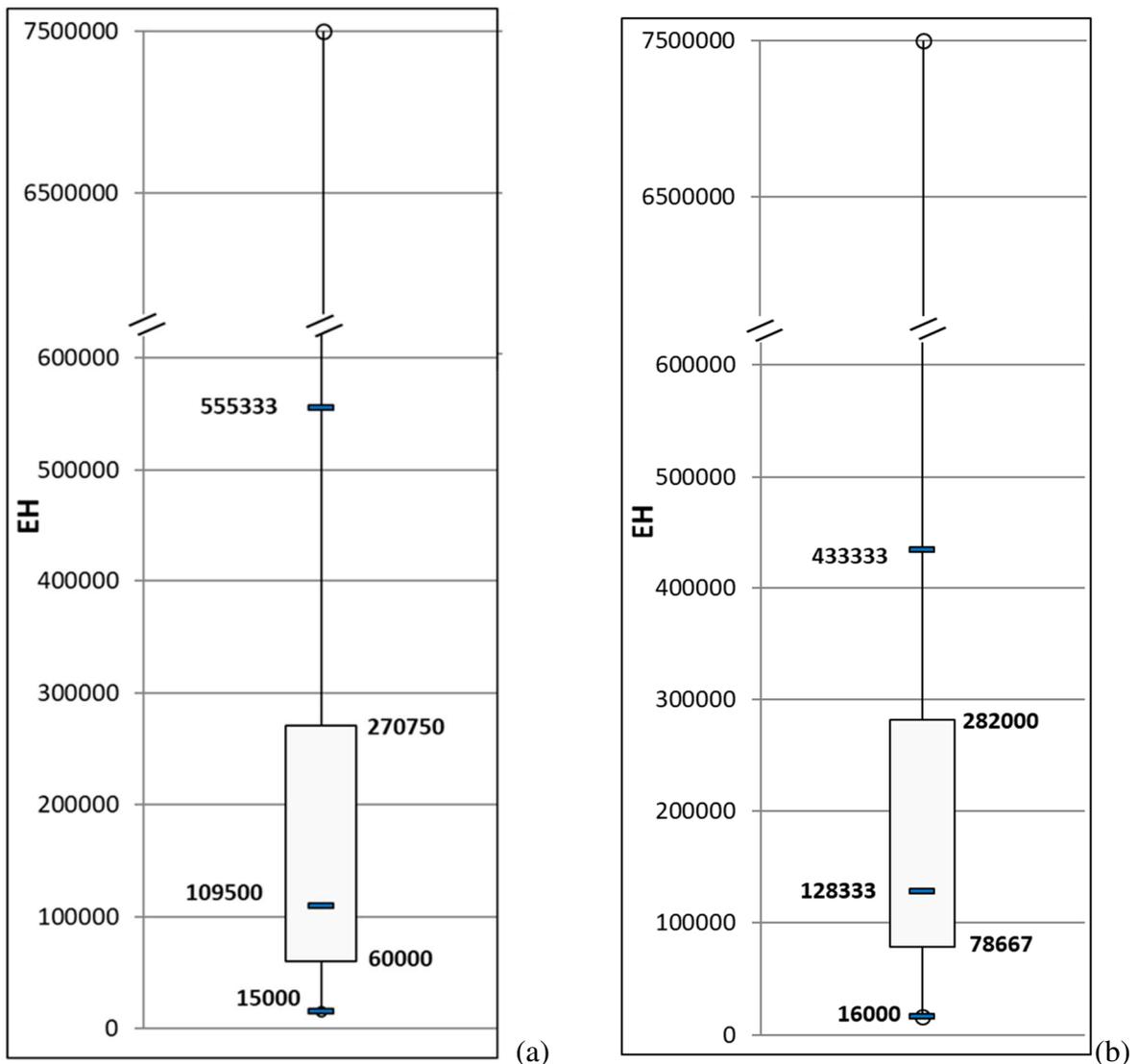


Figure 5 : capacités nominales des stations équipées de digesteurs pour toutes les stations recensées en France (a) et pour les stations ayant répondu au questionnaire (b)

On observe que les deux figures 5 présentent des caractéristiques statistiques assez semblables. Le centrage et la dispersion des données sont équivalents. La moitié centrale des données en particulier, représentée par la boîte de l'étendue interquartile, est pratiquement identique entre les deux jeux de données. Les données présentent de plus la même asymétrie avec des capacités nominales majoritairement inférieures à 300 000 EH. Les réponses obtenues sont plus réduites au niveau des stations à capacité nominale élevée, mais on peut tout de même dire que l'échantillon de réponses est représentatif.

Afin de mieux comparer la répartition des stations, leur nombre a également été représenté ci-dessous sur la figure 6 en fonction de leur capacité nominale.

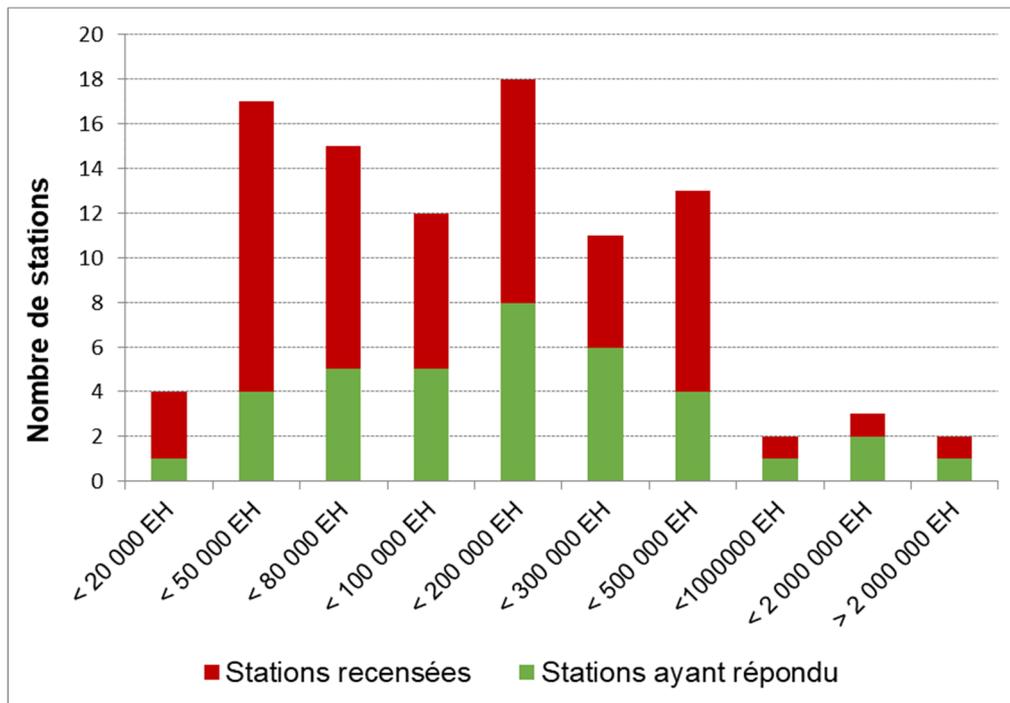


Figure 6 : répartition des stations équipées de digesteurs en fonction de leur capacité nominale

La capacité nominale des stations recensées varie entre 15 000 et 7,5 millions d'équivalents habitant (EH).

On s'aperçoit que toutes les classes de capacités nominales sont représentées dans les retours du questionnaire.

En considérant un taux de réponse de 37%, des représentations statistiques semblables et une bonne répartition des réponses par capacité nominale, on peut annoncer que les retours de l'enquête sont assez représentatifs du parc national pour pouvoir être analysés de façon intéressante.

Une étude similaire réalisée en 2011 [8] avait recensé 68 stations d'épuration de capacité supérieure à 30 000 EH équipées de digesteurs anaérobie en France. Avec cette nouvelle enquête, ce sont 88 stations de capacité supérieure à 30 000 EH qui sont aujourd'hui identifiées. Il existe quelques stations de plus faible capacité également équipées d'une installation de digestion mais elles restent marginales avec seulement 4 sites de capacité inférieure à 20 000 EH équipés. La méthanisation nécessite en effet un apport de matière organique suffisant pour être rentable et le seuil de faisabilité dépend étroitement des contraintes locales de gestion des boues.

Les résultats traités dans la suite de cette étude ne prennent pas en compte le cas particulier de la station d'épuration de Seine Aval équipée (7,5 millions d'EH) de 28 digesteurs sur le même site. Nous avons considéré ce site comme le cas particulier français, non représentatif du reste du parc national.

3. File eau

Le type de file eau, bien que non impliquée directement dans la filière digestion, fournit des informations précieuses sur le fonctionnement général de la station d'épuration et sur les caractéristiques des boues produites qui seront digérées.

Taux de charge des stations

Les informations fournies permettent dans un premier temps de calculer le taux de charge effectif des stations d'épuration. Les résultats pour l'année 2017 sont représentés sur la figure 7 ci-dessous.

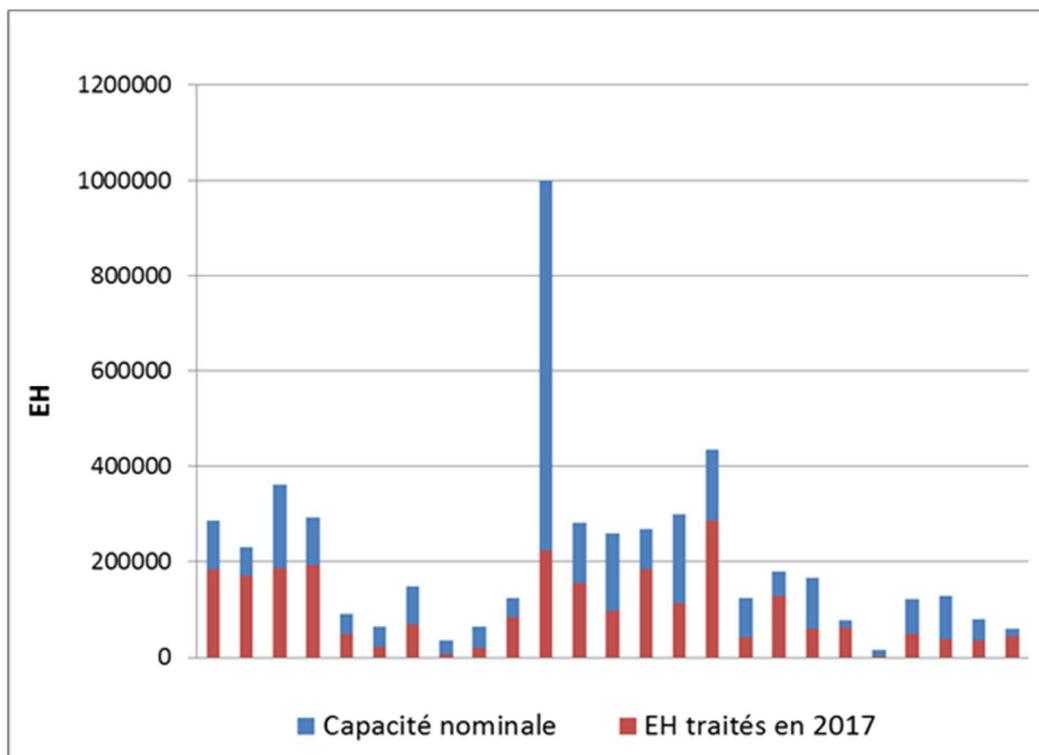


Figure 7 : représentation du taux de charge effectif par station

Le taux de charge effectif moyen annuel des stations ayant répondu est de 54%. Cette valeur est bien représentative du parc français dont les installations ne fonctionnent généralement qu'à la moitié de leur capacité.

Ce faible taux de charge moyen s'explique par l'approche retenue lors du dimensionnement des stations d'épuration basée sur la semaine la plus chargée ainsi que des perspectives d'évolution de volumes/charges entrants pour un avenir à 25-30 ans. Il a pour conséquence directe un fonctionnement des réacteurs avec des temps de séjour des boues élevés dans les digesteurs par rapport à leur dimensionnement.

Type de filière eau des stations

La file eau peut également être étudiée pour identifier le type de technologie utilisée, ce qui conditionnera la nature et les caractéristiques des boues (taux de MVS) envoyées en digestion. Sur les stations ayant répondu, 49% indiquent exploiter des boues activées, 40% de la biofiltration et 11% une technologie MBBR (procédé biologique à cultures fixées fluidisées). Ces traitements sont presque tous combinés à une décantation primaire permettant une production de boues plus organiques. Seuls sept sites indiquent n'injecter que des boues biologiques. Une station peut donc se munir d'une filière digestion alimentée uniquement par des boues biologiques bien que l'on sache que ce choix ne soit pas optimal pour la production de biogaz.

4. Paramètres de conception des digesteurs

Evolution du nombre de digesteurs construits

Compte-tenu de la modification de législation autorisant le biogaz produit en station d'épuration à être réinjecté et des informations trouvées dans la bibliographie sur l'augmentation générale de l'intérêt pour la digestion, il semble intéressant d'utiliser les données du questionnaire pour vérifier cette tendance. En effet, les exploitants devaient renseigner l'année de construction des digesteurs présents sur leur station, il est donc possible de représenter l'évolution dans le temps du nombre de stations ayant fait construire une unité de digestion (voir figure 8).

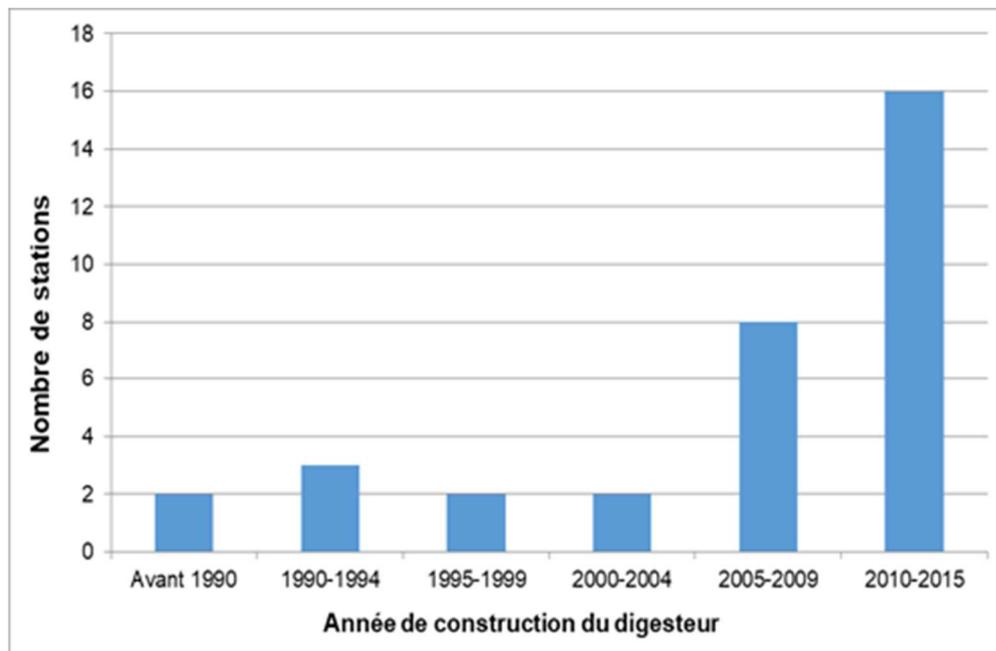


Figure 8 : évolution au cours du temps du nombre de stations ayant répondu équipées de digesteur

On observe une augmentation importante du nombre de stations d'épuration équipées d'un digesteur à partir de 2005, et plus encore après 2010. Il est certain que l'objectif fixé par l'Union Européenne en 2009 d'atteindre 20% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique européen a contribué à accroître cet intérêt pour la digestion. La modification de la législation sur la réinjection de biogaz n'a eu lieu par contre qu'en 2014 et il est encore trop tôt pour observer une influence.

Cette figure montre bien une tendance favorable au développement des unités de digestion, et le nombre important de projets identifiés lors du recensement va également dans ce sens.

Eléments de dimensionnement

Lors de cet état des lieux, une question concernait le nombre de digesteurs construits sur un même site. Parmi les réponses, la grande majorité des installations est équipée d'un unique digesteur, 9 en possèdent deux et 3 sites sont équipés de trois digesteurs. On note également que dans le cas de digesteurs multiples, les exploitants ont opté pour un fonctionnement en parallèle à l'exception d'une seule station qui les utilise en série.

Différents tests ont été menés pour tenter d'établir un lien entre le nombre de digesteurs et les caractéristiques de la station. Deux d'entre eux sont présentés dans le tableau 1 ci-dessous.

Nombre de digesteurs	Capacité nominale (EH)	Volume digesteur (m ³)
1	16 000 - 360 000	435 - 9 000
2	124 000 - 1 000 000	1 450 - 8 600
3	293 330 - 1 865 000	4 500 - 10 000

Tableau 1 : liens entre le nombre de digesteurs, la capacité nominale de la station et le volume du digesteur

Les différentes fourchettes établies en fonction du nombre de digesteurs se recoupent, ce qui empêche de définir des catégories claires aux maîtres d'ouvrages. On notera tout de même qu'un unique digesteur est installé pour les stations ayant de faibles capacités nominales, mais que passée une limite (360 000 EH pour notre échantillon de stations) le volume nécessaire de boues à traiter implique l'installation de plusieurs digesteurs. Le nombre de digesteurs et leur volume restent bien sûr adaptés à la place disponible sur le site et aux contraintes de construction, ce qui peut dans certains cas orienter le choix vers une digestion thermophile. Le volume choisi dépend également de l'ajout ou non d'intrants extérieurs à la station lors du projet de construction. De manière générale, les réponses montrent que le volume d'un digesteur ne dépasse pas 10 000 m³.

Dans le but de donner un ordre de grandeur, une équivalence a tout de même été calculée à partir des données disponibles entre la capacité nominale de la station et le volume du digesteur. On trouve que pour traiter les boues de 10 000 EH, un volume de 256 m³ de digesteur est nécessaire, mais ce chiffre est à prendre avec beaucoup de précautions.

Concernant le type de digestion mis en œuvre, toutes les stations ayant répondu indiquent utiliser une digestion mésophile à l'exception de deux sites ; Ce qui confirme les informations trouvées dans la bibliographie.

Au niveau des constructeurs des digesteurs, on retrouve principalement Degrémont et OTV sur l'échantillon de stations. Mais sont également mentionnés Stéreau, Vinci, Teba, Oswald Schulze et Lathuille frères.

Types d'intrants acceptés dans les digesteurs

Un élément clé conditionnant les performances de la digestion est la nature des intrants utilisés. Une première classification a été réalisée suivant l'origine des intrants acceptés en digestion par les stations (voir figure 9).

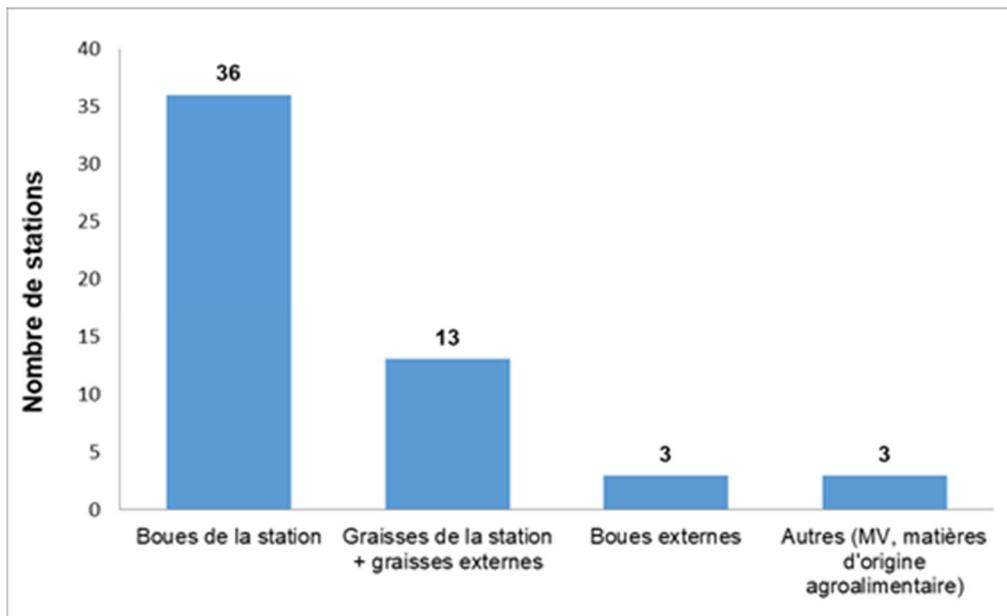


Figure 9 : types d'intrants acceptés par les stations

On observe que si toutes les stations injectent leurs propres boues dans leur installation, 9% traitent également des boues provenant de stations extérieures. Concernant les graisses, 36% des stations les acceptent en digestion et l'analyse des données montre qu'il s'agit toujours d'un mélange de graisses internes et de graisses externes. Enfin, 9% des stations utilisent d'autres types d'intrants qui sont ici des matières fermentescibles d'origine agroalimentaire, ou des matières de vidange.

Ces résultats illustrent bien la faible proportion d'installations de co-digestion, qui s'explique par les contraintes réglementaires comme souligné dans la synthèse bibliographique.

Les digesteurs sont principalement destinés aux boues primaires, mais ils traitent aussi les boues biologiques en provenance de la file eau des stations d'épuration. Un examen plus fin a été réalisé pour distinguer les boues suivant leur nature. Sans considérer les intrants extérieurs, 55% des stations ayant répondu digèrent des boues mixtes (soit un mélange de boues primaires et biologiques) et 22% un mélange de boues primaires, biologiques et tertiaires. Sept stations (20%) ne disposant pas de traitement primaire indiquent utiliser des boues biologiques seules, et un seul site (3%) alimentait son digesteur uniquement avec des boues primaires (mais depuis l'enquête, des travaux ont été réalisés pour traiter également les boues biologiques).

Préparation des intrants

Avant d'alimenter le digesteur, les intrants subissent différentes étapes de préparation. Après analyse du retour d'expérience des exploitants sur la conception de leur filière digestion, il est possible de mettre en évidence des pratiques communes.

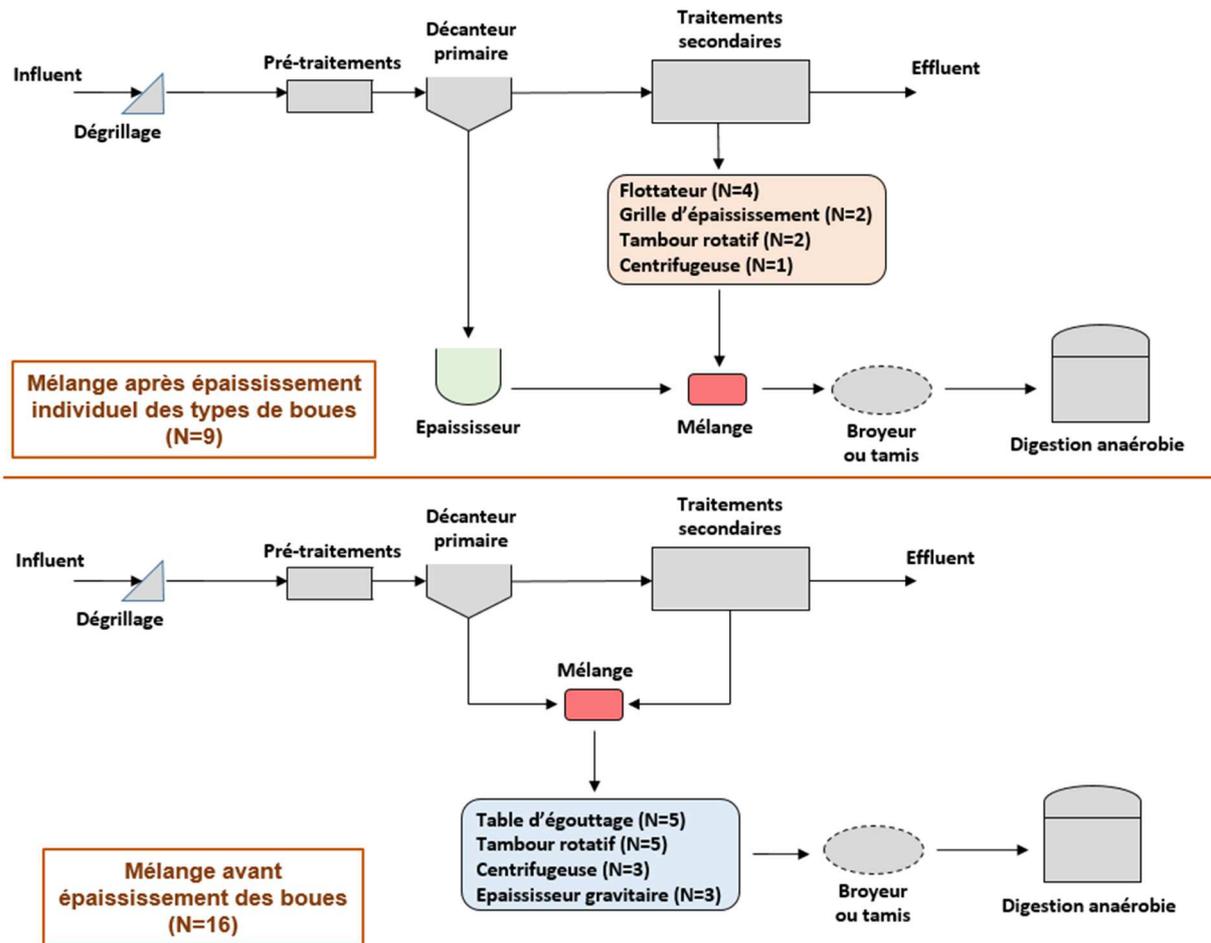


Figure 10: schéma des différents types de préparation des boues avant digestion

La première étape est l'épauissement des boues qui peut être réalisé suivant différentes techniques. On retrouve des épauissements par table d'égouttage, par tambour rotatif, par centrifugeuse, ou encore par épauissement gravitaire hersé en fond de décantation lamellaire physico-chimique. La plupart des stations injectent des polymères pour améliorer la décantation.

Dans le cas d'une injection de boues mixtes ou de plusieurs types d'intrants, il existe généralement une bache à boues agitée qui permet une bonne homogénéisation du mélange avant sa digestion. Ce mélange peut s'effectuer avant l'épauissement, ou après si l'épauissement diffère en fonction du type de boues. En effet, certaines stations utilisent un épauissement statique gravitaire pour leurs boues primaires tandis que leurs boues biologiques sont flottées ou épauissies par tambour rotatif.

Après épauissement des boues, 47% des stations utilisent des broyeurs ou des tamis dans le but d'éliminer les filasses qui peuvent dégrader les équipements (en particulier les agitateurs) ou causer des problèmes de bouchage. Sur les 16 stations concernées, on observe une répartition équitable entre les deux techniques. On notera qu'un exploitant indique que le procédé de tamis fin sous pression (Strainpress®) souvent utilisé peut entraîner une perte en déshydratabilité des boues digérées.

Concernant les différentes techniques de désintégration des boues visant à améliorer leur digestion, seulement deux stations ont apporté leur contribution à l'enquête ; une équipée

d'hydrolyse thermique et l'autre d'un système à ultrasons. Ces retours ne sont donc pas suffisants pour mettre en évidence l'intérêt de ces prétraitements, en particulier sur la fraction supplémentaire de MVS éliminée et donc sur la production plus élevée de biogaz.

Energie utilisée pour le chauffage

Comme déjà été énoncé plus haut, la quasi-totalité des digesteurs étudiés par l'enquête fonctionnent en mode mésophile avec des boues chauffées en moyenne à 37°C. Ce fonctionnement est privilégié car plus stable et moins gourmand en énergie que la digestion thermophile fonctionnant à 55°C. Celle-ci est tout de même utilisée par deux stations de notre échantillon, permettant un gain de place et une réduction du temps de séjour.

Il a été demandé aux exploitants de renseigner le type d'énergie utilisée pour atteindre cette température de fonctionnement (voir figure 11).

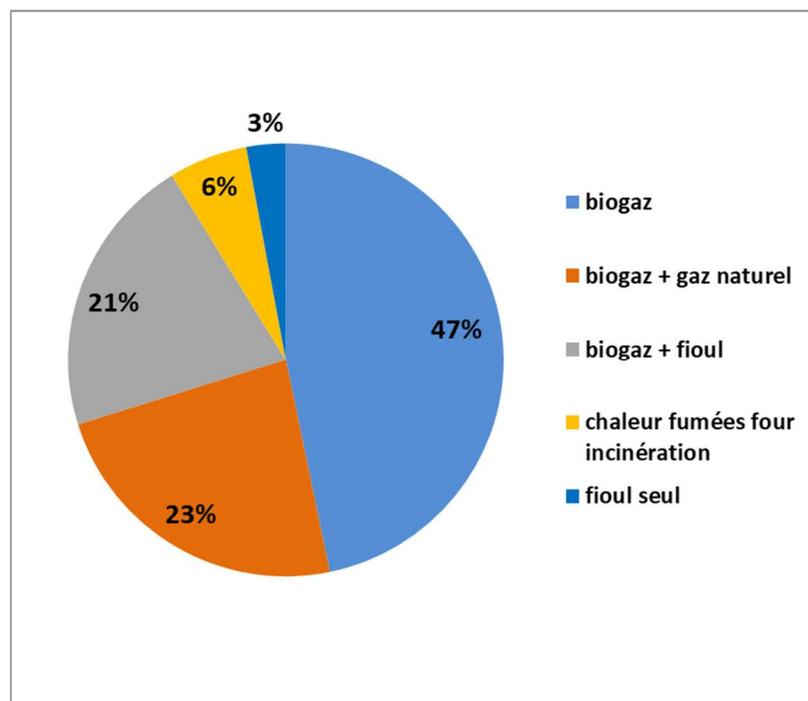


Figure 11 : type d'énergie utilisée pour le chauffage du digesteur suivant les stations

On observe que presque toutes les stations utilisent évidemment le biogaz produit pour chauffer leur digesteur. Il s'agit donc bien de la première voie de valorisation de ce produit. Les trois stations qui utilisent d'autres sources d'énergie (la chaleur des fumées issues du four d'incinération ou du fioul) font figure d'exception. Il est également à noter que même dans le cas d'un chauffage uniquement au biogaz, du fuel ou du gaz naturel doivent être présent en complément pour assurer le démarrage du digesteur ou en cas de production insuffisante de biogaz.

Agitation

Le brassage est un des éléments essentiels au bon fonctionnement du procédé puisqu'il permet à la fois de mettre en contact les intrants avec la biomasse active, d'homogénéiser le mélange, d'éviter les dépôts en fond de réacteur et de faciliter l'évacuation du gaz produit.

D'après les informations récoltées par l'enquête, les technologies utilisées pour le brassage du digesteur se répartissent équitablement entre une agitation mécanique (agitateur de type axial, hélicoïdal, pendulaire, ou encore à double pales) et une agitation au biogaz. Ainsi, une évolution est observée depuis 2012 où 80% des stations interrogées utilisaient une agitation au biogaz [8]. D'après le retour d'un exploitant, le brassage au biogaz tendrait à être progressivement abandonné à cause des contraintes d'exploitation et d'un coût énergétique important.

On remarquera une forte tendance des constructeurs à privilégier une technologie. Ainsi Degrémont construit principalement des digesteurs équipés d'un brassage au biogaz tandis qu'OTV préfère une agitation mécanique. Un lien entre le type de technologie utilisée et l'année de construction du digesteur n'a par contre pas pu être mis en évidence à partir de nos résultats.

En plus de ces systèmes, les digesteurs disposent souvent d'un système de recirculation des boues vers un échangeur de chaleur afin de maintenir la température dans l'ouvrage. Cette recirculation contribue aussi en partie au brassage.

5. Paramètres de fonctionnement

Après avoir étudié la conception de la filière digestion, il convient de s'intéresser de manière plus précise à son fonctionnement en étudiant les paramètres mesurés en entrée, à l'intérieur et à la sortie du digesteur.

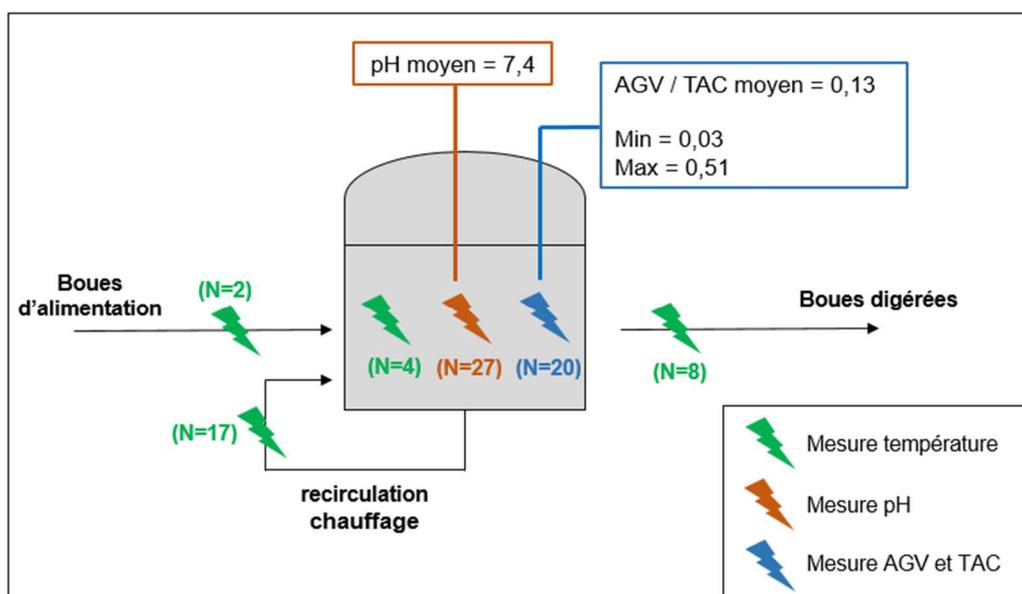


Figure 12 : schéma des différents points de mesures des paramètres suivis en exploitation du digesteur

En entrée

Les caractéristiques du mélange introduit dans le digesteur sont généralement bien suivies, la majorité des exploitants ayant pu renseigner les résultats demandés par l'enquête. Il a ainsi été possible d'évaluer statistiquement le pH des intrants ainsi que leurs concentrations en MES et MVS (voir tableau 2). Ces derniers résultats en particulier permettront par la suite d'évaluer les rendements atteints en termes de réduction du volume des boues.

	pH	MES (g/L)	MVS (%)
Min	6,0	27,0	65
Max	7,8	64,0	86
Moyenne	6,8	46	77
Nb réponses	25	31	29

Tableau 2 : caractéristiques des boues ou du mélange introduit dans le digesteur

Le pH est le premier paramètre important à surveiller puisqu'il conditionne le bon développement des bactéries réalisant la réaction. Les différents groupes de micro-organismes se développent chacun dans une gamme de pH optimale. Ainsi le pH optimum pour l'étape d'acidogénèse se situe entre 5.2 et 6.2 tandis que l'idéal pour l'étape de méthanisation est compris entre 6.5 et 7.6 [1]. De manière générale, il est conseillé de maintenir le digesteur à un pH voisin de 7.0, et il est précisé dans l'ouvrage de René Moletta [1] que cela peut nécessiter au début de la réaction un ajout de chaux. Cette information est confirmée ici puisque 5 stations relèvent des pH voisins de 6.0 en entrée. On observe tout de même que la moyenne obtenue sur les différentes stations est proche de la neutralité.

Concernant les teneurs en MES et MVS, on remarque que les valeurs moyennes témoignent bien d'un épaissement des boues avant la digestion malgré quelques stations présentant des concentrations relativement plus faibles.

Les résultats obtenus ne permettent pas de mettre en évidence une différence entre les stations utilisant des boues activées et celles disposant de biofiltration.

Dans le digesteur

Au niveau du digesteur, le paramètre le plus suivi par les exploitants est la température, mesurée le plus souvent au niveau de la boucle de recirculation des boues vers l'échangeur de chaleur. Vient ensuite le pH qui se situe en moyenne à 7.4 (N=27) ce qui correspond bien à la valeur recherchée. Cette mesure est généralement réalisée de manière hebdomadaire.

Les analyses des concentrations en AGV et TAC sont réalisées par 20 stations de manière hebdomadaires ou mensuelles. Les résultats obtenus sont très variables en fonction des sites car ils dépendent beaucoup de la nature des intrants. Les données récoltées ont permis de calculer le rapport AGV/TAC moyen qui est compris pour notre échantillon de stations entre 0.03 et 0.51 avec une moyenne de 0.13. D'après les travaux de l'ADEME, un rapport AGV/TAC inférieur à 0.3 est synonyme de conditions normales de fonctionnement. Une seule station de notre lot dépasse cette valeur avec un résultat élevé de 0,51 du fait d'une concentration importante en AGV.

Il avait également été demandé dans le questionnaire les résultats d'analyse de la concentration en N-NH₄ dans le digesteur, cependant il apparaît que ce paramètre est peu suivi par les exploitants (8/34 réponses) et les valeurs obtenues sont très variables.

Pour tous ces résultats d'analyse, aucune différence n'a pu être mise en évidence entre des boues issues d'une filière boues activées et celles provenant d'une filière biofiltration.

Le temps de séjour est également un paramètre essentiel pour le pilotage du procédé. Les résultats obtenus sur les stations étudiées sont présentés dans le tableau 3.

	Temps de séjour (jours)
Min	21
Max	57
Moyenne	31
Optimal (R. Moletta)	25

Tableau 3 : données statistiques sur l'âge des boues des stations étudiées

Le temps de séjour moyen des boues calculé sur l'année 2017 est de 31 jours, ce qui est supérieur à l'optimum de 25 jours recommandé pour une digestion anaérobie mésophile. Ces résultats sont cohérents avec les observations réalisées sur le taux de charge des stations. En effet, les stations étant loin de leur capacité nominale de traitement, la production de boue est également inférieure à celle prévue lors du dimensionnement et le temps de séjour de celles-ci en digestion se retrouve donc supérieur. Ce calcul sur l'année lisse les variations observées au niveau des saisons (été/hiver). Certaines stations touristiques de montagne n'ont pas été prises en compte dans le calcul des temps de séjour des boues du fait de caractéristiques particulières qui génèrent des temps de séjour extrêmes. Par ailleurs, une des stations thermophiles indique fonctionner avec un temps de séjour de seulement 9,4 jours ; et inversement, une station atteint un temps de séjour de 81 jours du fait d'une filière boue surdimensionnée qui devait à l'origine accueillir des boues extérieures au site.

En sortie

À partir des caractéristiques du digestat obtenu en sortie du procédé (flux annuels de MES et de MVS et volume annuel en sortie de digesteur), il est possible de calculer les teneurs en MES et de MVS des boues de sortie (voir annexe IV) et ainsi de déterminer leurs taux de réduction par rapport aux valeurs en entrée. Les résultats sont regroupés dans le tableau 4 ci-dessous.

	réduction MES (%)	réduction MVS (%)
Min	22	30
Max	54	63
Moyenne	40	49
Nb réponses	24	22

Tableau 4 : réduction des teneurs en MES et MVS des boues par digestion

D'après les données bibliographiques, l'objectif fixé dans le cas d'une digestion anaérobie mésophile pour la réduction de la teneur en MV dans les boues va de 40 à 50%. On assimilera par la suite les MES avec les MS et les MVS avec les MV, approximation acceptable pour des boues concentrées en négligeant l'influence des sels dissous. La moyenne des résultats obtenus

pour la réduction des MVS se situe bien dans l'intervalle visé, ce qui illustre un fonctionnement général des stations correct malgré certaines situations où les performances sont inférieures.

Si on compare ces résultats avec ceux obtenus par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse en 2012, on retrouve sensiblement les mêmes valeurs comme illustré avec le tableau 5.

	Rendement MS (%)	Rendement MV (%)
Min	22	31
Max	56	67
Moyenne	42	53

Tableau 5 : réductions des teneurs en MS et MV obtenues sur la digestion des boues mixtes [6]

6. Performances

On s'intéresse maintenant aux performances de la digestion en termes de production de biogaz.

Suivi de la production de biogaz

Les nombreuses informations demandées aux exploitants ont permis d'évaluer de différentes manières les performances atteintes par les stations sur le paramètre production de biogaz en moyenne annuelle.

Les performances obtenues en termes de production de biogaz et de biométhane sont regroupées dans le tableau 6.

On notera que le biogaz est composé en moyenne de 62% de CH₄ d'après les données récoltées, ces taux variant entre 57% et 69%.

Paramètre	Unité	Valeur moyenne	(N = Nombre de Valeur ; Valeur Médiane)
Production de biogaz	Nm ³ biogaz/t MVS introduite	447	N=20 ; 463
	Nm ³ biogaz/t MVS éliminée	924	N=19 ; 879
Production de biométhane	Nm ³ CH ₄ /t MVS introduite	279	N=20 ; 283
	Nm ³ CH ₄ /t MVS éliminée	580	N=19 ; 545

Tableau 6 : productions moyennes de biogaz et de biométhane, nombre de données et valeur médiane

La productions moyenne annuelle est de $924 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MVS}} \text{ éliminée}$ ou $447 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MVS}} \text{ introduite}$. Sur le bassin RMC, il avait été trouvé en 2012 une production de $840 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MV}} \text{ éliminée}$ ou $460 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MV}} \text{ introduite}$. La tendance ne semble donc pas avoir évolué depuis.

Des représentations statistiques de type boîte à moustaches de ces différents résultats sont disponibles en Annexe II.

En considérant toujours l'approximation qui assimile les MVS aux MV, il est possible de faire un parallèle entre ces résultats et les valeurs bibliographiques trouvées en I.2.2 avec les BMP de différentes boues biologiques (primaires ; mixtes ; biologiques) issues de caractérisation en laboratoires. La comparaison est représentée sur la figure 13 ci-dessous.

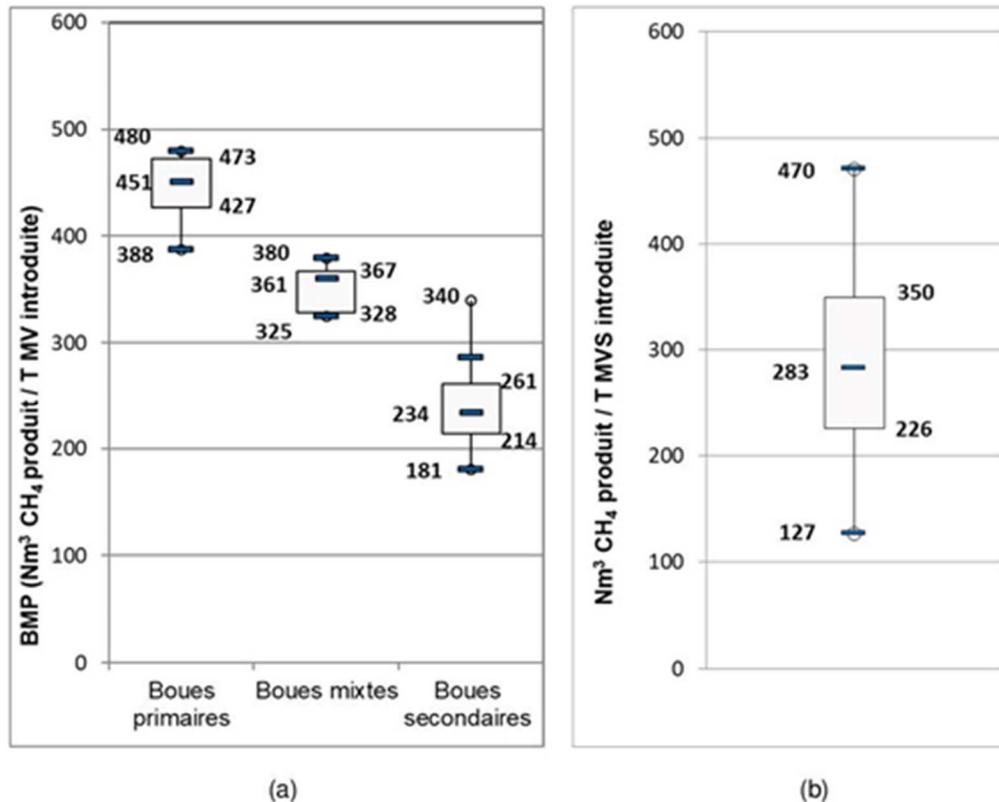


Figure 13 : (a) comparaison entre les tests de potentiels méthanogènes réalisés en laboratoire [16]-[17] (Boues primaires N=6 ; Boues mixtes N=9 ; Boues secondaires ou biologiques N=15) et (b) les productions de biogaz calculées lors de l'enquête (N=16)

Les résultats obtenus à partir des réponses des exploitants (figure de droite) relèvent tous du traitement de boues mixtes. On remarque premièrement une dispersion de la production de biogaz bien plus importante que pour tous les tests BMP réunis. Les conditions de fonctionnement du digesteur en stations sur une année sont en effet bien plus variables du fait de la nature des intrants qui ne peuvent être injectés de façon parfaitement homogène et régulière dans le temps, ainsi que des conditions à l'intérieur du digesteur (agitation, pH, température, ...). On note également que la médiane des résultats en stations est inférieure à celle des BMP pour les boues mixtes. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où les BMP sont réalisées dans des conditions de laboratoire contrôlées qui favorisent le bon déroulement de la réaction de méthanisation.

Les agences de l'eau utilisent généralement des données ramenées en volume de biogaz produit par EH traité. Ce type de représentation est présenté en annexe III.

Ainsi, la production moyenne annuelle de biométhane calculée pour 22 stations s'élève à 6 Nm³ CH₄/EH traité sur la file eau/an, avec un écart très important entre le minimum et le maximum (de 2 à 12).

Influence du type de filière eau

Différents tests ont été menés pour tenter de relier la production de biogaz des stations à certains paramètres ou modes de fonctionnement. Les seules relations ayant pu être mises en évidence concernent le type de filière eau de la station.

On observe une différence au niveau de la production de biométhane entre les stations équipées de boues activées et celles équipées de biofiltration. Pour une boue activée, la production moyenne annuelle de méthane est de 254 Nm³ par tonne de MVS introduite. Ce chiffre passe à 316 Nm³ CH₄/T MVS introduite avec de la biofiltration. Cette différence s'explique par le caractère plus organique des boues issues des biofiltres qui sont généralement des boues mixtes (retour des eaux de lavage des biofiltres en tête du décanteur primaire et absence de clarificateur secondaire) alors que les boues activées fonctionnent majoritairement en faible charge ou en aération prolongée.

Une analyse plus fine a été tentée au niveau des différentes combinaisons d'intrants introduits dans le digesteur (% de graisses) mais la trop grande disparité des résultats empêche de tirer des conclusions pertinentes.

Influence de la température de digestion

Concernant la température de fonctionnement des digesteurs, on remarquera que les deux stations thermophiles de l'échantillon atteignent des performances supérieures à la moyenne des autres stations en termes d'abattement en MVS et de production de biogaz (tableau 7). Cependant, au vu de la faiblesse de l'échantillon, (N=2) on ne peut pas tirer de conclusion sur une comparaison de performances entre mésophile et thermophile.

	Abattement en MES (%)	Abattement en MVS (%)	Nm ³ biogaz produit/T MVS introduite	Nm ³ biogaz produit/T MVS éliminée	Temps de séjour en jours
Moyenne stations thermophiles (N=2)	47	56	670	1193	16
Moyenne stations mésophiles (N=22)	40	49	422	893	31

Tableau 7 : comparaison des performances des stations thermophiles avec les performances moyennes des stations mésophiles

7. Utilisation du biogaz produit

Cette étude ayant été motivée par l'autorisation de l'injection de biométhane dans le réseau, il convient de vérifier si les pratiques des exploitants ont effectivement évolué concernant la valorisation du biogaz produit.

Sur les 27 stations ayant renseigné entièrement cette partie du questionnaire, 6 valorisent leur biogaz à travers la cogénération (1 en cogénération seule et 5 en mixte thermique / cogénération), 7 à travers l'injection dans le réseau de gaz de ville, 1 en mixte cogénération / injection au réseau et 13 utilisent uniquement une valorisation thermique. Contrairement aux conclusions du rapport de 2012 [6] qui déplorait un faible intérêt pour la valorisation énergétique du biogaz, les collectivités y accordent aujourd'hui plus d'importance. Une tentative de mise en évidence de cette évolution a été réalisée en distinguant les stations suivant l'année de construction de leur digesteur (tableau 8). Ces résultats sont cependant à considérer avec précaution puisqu'ils ne permettent pas d'identifier les stations ayant modifié leurs pratiques après la construction de leur digesteur.

Année de construction du digesteur	Type de valorisation du biogaz			
	Thermique	Thermique + Cogénération	Thermique + Injection réseau	Thermique + Cogénération + Injection
Avant 2000	4/6	1/6	1/6 *	-
2000 - 2010	6/10	-	4/10 *	-
2011 - 2018	3/11	5/11	2/11	1/11

**mise en place de l'injection dans un second temps, après autorisation*

Tableau 8 : proportions de stations par type de valorisation du biogaz produit en fonction de l'année de construction du digesteur

On observe que les stations utilisant uniquement une valorisation thermique sont majoritaires dans le cas des digesteurs construits avant 2010 et ne représentent plus que 27% des stations construites plus récemment. Les stations équipées d'une filière digestion plus récente (après 2010) privilégient les valorisations énergétiques productrices d'électricité ou de biométhane.

Bien que l'injection de biométhane dans le réseau n'ait été autorisée qu'en 2014 pour les stations d'épuration, elles sont déjà 8 sur notre échantillon à avoir opté pour cette valorisation à la fin 2018. Certains digesteurs ont pu être construits directement dans cet objectif mais on remarque également que des stations plus anciennes ont réhabilité leur installation pour se lancer dans cette nouvelle voie de valorisation.

D'après un rapport GrDF [29] 12 stations d'épuration injectent leur biométhane sur le réseau français en octobre 2019 avec en prévision 74 stations ayant opté pour l'injection d'ici à 2023. Le développement de cette pratique semble donc établi et d'autres projets vont ainsi rapidement voir le jour dans le futur.

L'analyse des différents résultats s'est également concentrée sur la proportion du gaz produit utilisée pour les différents types de valorisation. L'étude de ces données concernant l'injection en particulier donne des résultats intéressants présentés dans le tableau 9.

Année de construction du digesteur	Proportion de gaz réinjecté dans le réseau (%)
Avant 2000	40
2000 – 2010	60 à 87
Après 2010	67 à 93,5

Tableau 9 : évolution de la proportion de biogaz réinjecté dans le réseau

Du fait des raisons évoquées précédemment sur la répartition des stations en fonction de l'année de construction du digesteur, ces résultats sont toujours à considérer avec précaution.

Pour ces stations, en moyenne, 72% du biogaz produit est utilisé pour l'injection, le reste étant utilisé pour chauffer le digesteur ou torché car excédentaire (période d'indisponibilité de l'injection) ou non conforme aux exigences de GrDF.

Il apparaît que les stations plus récentes consacrent une proportion de biogaz plus importante à l'injection, proportion pouvant aller jusqu'à 93.5% du biogaz produit.

La confiance en cette technique semble donc avoir augmenté jusqu'à constituer pour les stations où cela est possible la principale voie de valorisation de leur biogaz.

Pour toutes les stations concernées, l'épuration du biométhane avant injection dans le réseau est réalisée par groupe frigorifique permettant de supprimer l'humidité puis par un traitement par charbon actif permettant de supprimer l'H₂S et les COV du biogaz suivi d'une séparation membranaire pour éliminer le CO₂. Cette succession de techniques permet de passer d'un biogaz contenant en moyenne 62% de méthane à un gaz épuré en contenant plus de 97%.

8. Qualité et devenir des boues digérées

L'autre produit valorisable de la digestion est le digestat constitué des boues résiduelles digérées. Ces boues sont d'abord déshydratées sur site avant d'être dirigées vers différentes filières présentées dans la bibliographie (I.4.2). Les résultats pour les stations étudiées sont représentés sur la figure 14.

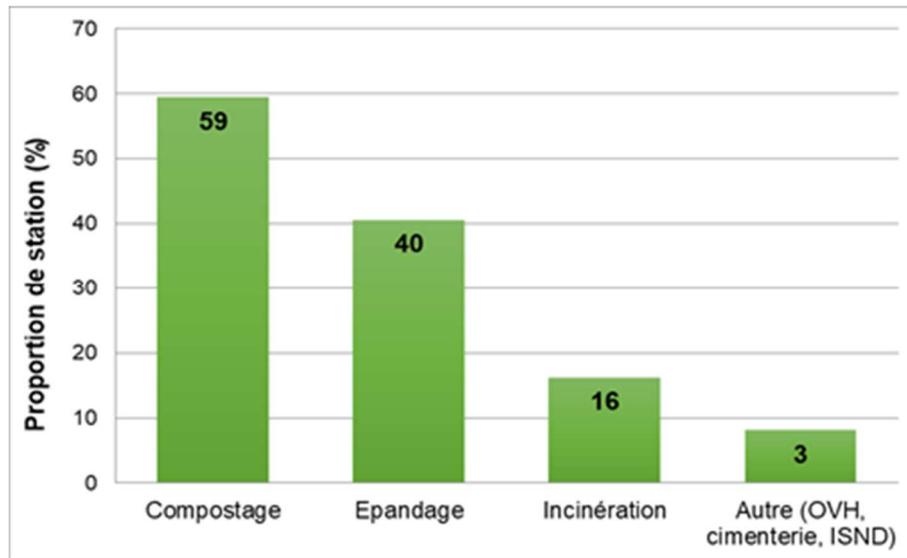


Figure 14 : devenir des boues digérées déshydratées

Comme attendu d'après les résultats trouvés dans la littérature, les principales voies de valorisation des boues digérées sont le retour à la terre via le compostage et l'épandage. Concernant le compostage, 84% des stations concernées indiquent être soumises à la norme NF U44-095 imposant des valeurs limites en concentrations en éléments trace métalliques (ETM) et en composés traces organiques (CTO) soit 7 PCB et 3 HAP. D'après le retour d'expérience des exploitants, il arrive que les boues dépassent ces taux, ce qui les rend non conformes et interdit leur compostage. Au niveau de l'épandage, 36% des stations concernées indiquent le réaliser au titre de la législation ICPE et 33% au titre de la législation IOTA (dont l'encadrement est semblable à celui des ICPE mais concerne plus particulièrement les activités ayant un impact sur les milieux aquatiques).

9. Qualité et devenir des concentrats

Les caractéristiques des retours en tête de station des concentrats de déshydratation des boues digérées sont peu suivies par les exploitants. Une seule des stations ayant répondu à l'enquête indique en effet réaliser des prélèvements en continu. Les autres réalisent uniquement des prélèvements ponctuels ou mixtes. Le volume de concentrats généré est généralement inconnu ou non renseigné pour 80% des exploitants ayant répondu. Les résultats analytiques moyens des concentrats sont également peu connus. Les paramètres les plus suivis sont les concentrations en MES (15 réponses), en N-NH₄ (9 réponses) et en P-PO₄ (7 réponses).

Au vu des résultats des analyses disponibles, des concentrations élevées en ammonium et en phosphate du fait de la lyse bactérienne sont mesurées au niveau des concentrats comme annoncé en bibliographie. Les exploitants sont plusieurs à évoquer la forte charge en ammonium de ces retours en tête comme impactant le fonctionnement de leur station. Les retours des concentrats sont généralement lissés sur la journée grâce à une bêche tampon pour éviter les pics de charge qui peuvent entraîner des difficultés sur les traitements biologiques. Une station indique également injecter du chlorure ferrique au niveau de ces concentrats pour aider au traitement du phosphore. Malgré cela, deux sites observent un abattement insuffisant de l'azote et des dépassements des seuils de rejet sur le NTK. Concernant les filières boues activées, trois exploitants indiquent augmenter le temps d'aération journalier des boues pour traiter le surplus de pollution due aux

retours, augmentant ainsi en conséquence leur consommation énergétique. Il est évident que des conséquences plus importantes sur les filières eau soient atténuées par le faible taux de charge des stations actuelles, qui disposent ainsi d'une marge pour traiter la charge de leur retour en tête. Néanmoins la dénitrification peut être pénalisée

Il est tout de même intéressant de remarquer que 15 exploitants sur les 20 ayant répondu à la question indiquent que leur station d'épuration était dimensionnée pour traiter les centrats de digestion. Pour les 5 autres, la digestion a été mise en place au cours d'une réhabilitation de la station. Les stations dépassant les seuils de rejet font partie de celles pour lesquelles rien n'avait été prévu au dimensionnement.

10. Retours d'expériences des exploitants

Cette partie constitue une synthèse du retour d'expérience sous forme de commentaires libres renseignés en fin de questionnaire.

Les exploitants ont premièrement pu faire un retour concernant les bonnes pratiques à suivre sur le pilotage de l'étage digestion. Sur ce point, 9 sites soulignent l'importance d'un suivi analytique régulier pour prévenir l'apparition de problèmes au niveau du digesteur ou des canalisations et maintenir les paramètres d'exploitation dans la gamme préconisée par le constructeur (température, âge des boues, charge d'alimentation, AGV et TAC, production biogaz, % CH₄, pH). Le fait d'alimenter le plus régulièrement possible et avec des boues homogènes est indiqué par 6 stations. Enfin, 3 stations mentionnent l'intérêt du curage régulier des conduites en amont et en aval du digesteur (tous les 2 mois) ou les vidanges décennales du digesteur.

Pour assurer ces bonnes pratiques, les stations peuvent jouer sur plusieurs leviers :

- Pour obtenir un suivi analytique rigoureux, les exploitants évoquent des indicateurs précis du suivi de l'âge des boues, une régulation fine de la température avec des vérifications sur 3 points de prélèvement différents ainsi qu'une automatisation fiable des mesures.
- Pour une alimentation continue et homogène, les stations utilisent des bâches de stockage amont et modifient les volumes journaliers d'injection des boues, ce qui permet de faire varier la charge d'alimentation.

Au niveau des difficultés rencontrées, les problèmes majoritairement cités par les exploitants sont le bouchage des canalisations liés aux filasses rapportés par 9 stations. Parmi celles-ci, 5 sont pourtant équipées d'un système de broyage ou de tamisage, ce qui montre que ces technologies ne permettent pas d'éliminer totalement le risque de colmatage des canalisations. Une station indique également des problèmes de moussage en surface du réacteur en hiver. Enfin, deux stations relèvent des problèmes de précipitation de struvite bouchant les canalisations des retours en tête dont une qui relève également un problème de présence importante de siloxanes dans son installation de cogénération. Il est probable que le phénomène de précipitation de struvite ait lieu en réalité sur un nombre de stations plus important, mais que les exploitants aient appris à le gérer et donc ne le considèrent plus comme un problème. Compte tenu de l'augmentation importante du nombre de digesteurs, les actions à entreprendre pour limiter le moussage et la formation de struvite seront deux sujets à étudier à l'avenir.

D'autres problèmes sont évoqués mais ils semblent liés à des situations particulières comme par exemple un manque de personnel expert de laboratoire pour le suivi analytique régulier ou des échangeurs de chaleur obsolètes. Sont aussi mentionnés des problèmes de fiabilité sur la

production de biogaz ainsi que l'impact des saisons (le maintien de la température du digesteur en hiver nécessite plus d'énergie, et de manière générale une production de boues plus faible en basse saison entraîne une production de biogaz moins importante).

En termes de suivi et d'exploitation courante, les contraintes mentionnées principalement par les exploitants sont les contrôles (le plus souvent hebdomadaires) et la maintenance des différents appareils (changement des lobes des pompes volumétriques tous les 6 mois, révision des compresseurs biogaz tous les 2 ans, nettoyage de l'échangeur de chaleur tous les 6 mois). Les dysfonctionnements rencontrés entraînent aussi des interventions supplémentaires telles que le débouchage des conduites d'alimentation ou la mesure du niveau des mousses 2 fois par jour pour la station concernée. Enfin, les interventions en zone ATEX nécessitent des précautions particulières par un personnel formé.

Les commentaires concernant les contraintes d'exploitation en termes de matériels sont très variés suivant les stations. Il s'agit principalement du nettoyage des différents appareils tels que les échangeurs boue/eau, les débitmètres, les couteaux du dilacérateur. Certains problèmes sont également mentionnés tels que la détérioration de la torchère, l'usure des pompes ou encore une panne fréquente du surpresseur biogaz en amont de la chaudière. Une station indique effectuer de la maintenance préventive ainsi que le stockage du matériel en double pour éviter les arrêts d'exploitation.

Un retour d'expérience met en avant des inconvénients à l'utilisation d'un brassage au biogaz qui entraîne un coût énergétique important ainsi que des contraintes d'exploitation élevées. Enfin, certains exploitants relèvent des problèmes liés à l'utilisation de débitmètres massiques pour la mesure des débits de gaz produits. Ces derniers, sensibles à l'humidité, sont remplacés dans la mesure du possible par des débitmètres à ultrasons.

Une partie du retour d'expérience a été consacrée aux indicateurs qui déclenchent la nécessité d'intervenir sur le digesteur. Les problèmes de bouchages du digesteur sont mentionnés par 3 exploitants (détection visuelle ou mesure d'une montée en pression). Ils sont 3 également à indiquer utiliser le traçage au lithium afin de déterminer le volume actif dans le digesteur et ainsi prévoir les opérations de nettoyage à mener en cas d'accumulation de résidus (sable, filasses) au fond de l'ouvrage. Une station indique suivre l'évolution des courbes de température ainsi que les débits recirculés pour prévenir ces problèmes de bouchages.

Les concentrations en AGV sont surveillées et en cas de trop forte augmentation il y a une mise à jeun du digesteur (dans le cas de 3 stations). Enfin en cas de pH inférieur à 7, une station injecte une base pour tamponner l'acidité.

Il est intéressant de remarquer que les problèmes de corrosion et de moussage ne sont pas ou peu mentionnés, alors qu'ils étaient rencontrés respectivement par 30% et 28% des exploitants en 2012 [8]. Ces problèmes particuliers semblent donc avoir été surmontés en exploitation.

De manière générale et malgré les problèmes et les contraintes cités, la majorité des exploitants ayant répondu à cette section de l'enquête semble satisfaite et ne connaît pas de dysfonctionnement majeur.

III. Synthèse de l'étude

Cette étude avait pour but de réaliser un panorama de la situation actuelle de la digestion anaérobie des boues de stations d'épuration en France.

Aujourd'hui, 96 stations sont équipées d'une unité de digestion fonctionnelle en France et de nombreux projets devraient encore voir le jour. Au total, 36 stations d'épuration auront participé par leurs retours à cette enquête nationale. Ces stations présentent des capacités nominales comprises entre 15 000 et 7 500 000 EH et il a été montré statistiquement que l'échantillon était bien représentatif du parc total.

Les données fournies par les exploitants concernant leur filière de traitement des eaux ont permis de montrer que les stations fonctionnaient en moyenne annuelle à la moitié de leur capacité totale, permettant ainsi un passage prolongé des boues dans le digesteur pouvant amener à de meilleures performances. Les filières de traitement des eaux classiques du parc français sont représentées avec une majorité de boues activées et de biofiltres ainsi que quelques systèmes à culture fixée fluidisée. Il a été montré que les stations équipées d'une biofiltration arrivaient à de meilleures performances en termes de production de biométhane que les stations à boues activées du fait d'une production de boues mixtes plus organiques.

Les substrats injectés en digestion sont majoritairement composés de boues mixtes (mélange de boues primaires et biologiques) issues de la station concernée. Certaines acceptent également des graisses internes et externes à la station, permettant ainsi d'améliorer le pouvoir fermentescible du mélange, en particulier dans le cas de boues biologiques seules, plus minéralisées que les boues primaires. Malgré quelques exceptions, très peu de stations optent pour la co-digestion avec ajout d'intrants extérieurs du fait des contraintes réglementaires. Il n'a pas pu être établi de lien net entre le type de mélange introduit dans le digesteur et les performances au niveau de la production de biogaz.

La représentation de l'évolution du nombre de digesteurs construits a permis de mettre en évidence une augmentation de l'intérêt des collectivités pour la digestion. La grande majorité des digesteurs sont conçus pour fonctionner en mode mésophile. Le chauffage du digesteur est réalisé à partir du biogaz produit associé à du gaz naturel ou du fuel. Au préalable, les intrants sont mélangés et épaissis et passent parfois à travers un broyeur ou un tamis pour prévenir les problèmes de filasses. L'agitation du digesteur est réalisée soit par recirculation du biogaz (technique privilégiée par le constructeur Degrémont), soit par un brassage mécanique (privilégié par le constructeur OTV).

La digestion permet d'atteindre en moyenne une réduction de 50% du taux de MVS ce qui correspond à l'objectif visé, témoignant ainsi d'un bon fonctionnement du procédé en termes de réduction des boues. La production de biogaz est variable au niveau des stations mais correspond en moyenne aux données relevées dans des études précédentes (autour de 925 Nm^3 biogaz / T_{MV} éliminée et 450 Nm^3 biogaz / T_{MV} introduite).

La valorisation du biogaz produit est réalisée en premier lieu pour le chauffage du digesteur mais on observe le développement des filières de cogénération et d'injection dans le réseau de gaz de ville. Pour cette dernière en particulier, de nombreux dossiers sont à l'étude suite à l'arrêté de 2014 intégrant les boues d'épuration dans les intrants autorisés. Les boues digérées sont majoritairement valorisées en compostage ou en épandage direct.

Les retours en tête (centrats), chargés en azote et en phosphore, peuvent représenter un problème pour le traitement des eaux usées si les stations n'ont pas été dimensionnées pour gérer cette surcharge et si elles sont soumises à des contraintes élevées concernant l'azote. La caractérisation de ces centrats est cependant peu réalisée et la surcharge organique qu'ils représentent est compensée actuellement par le faible taux de charge des stations.

Concernant les autres problèmes évoqués par les exploitants, on retrouve le bouchage de l'alimentation du digesteur ou de la recirculation des boues par des filasses qui peut être réduit par la mise en place d'un broyeur ou d'un tamis en entrée et le bouchage par de la struvite au niveau des centrats. Certaines normes de qualité du gaz ou des boues déshydratées ne sont parfois pas respectées et empêchent ainsi la réinjection du biométhane ou l'envoi des boues en compostage. Pour assurer un bon fonctionnement du procédé de digestion, on retiendra l'importance à accorder à une alimentation la plus régulière et homogène possible.

Conclusion

Cette étude s'inscrivait dans le cadre du regain d'intérêt pour la digestion des boues d'épuration. En effet, la valorisation énergétique du biogaz produit est de plus en plus encouragée dans la dynamique écologique actuelle. La dernière évolution importante a eu lieu en 2014, quand l'injection dans le réseau de gaz de ville de biométhane produit à partir de boues d'épuration a été autorisée. Cette décision a motivé la réalisation de cet état des lieux pouvant servir de référence aux collectivités désirant implanter une unité de digestion sur leur site.

La première partie a apporté des éléments bibliographiques sur les paramètres liés aux différentes étapes en entrée, en sortie et au sein du digesteur. Ces éléments ont permis de comprendre les résultats présentés dans la deuxième partie qui analysait les retours d'expérience obtenus après l'envoi d'un questionnaire technique aux exploitants de station d'épuration. Les pratiques majoritaires ont ainsi pu être mises en évidence et les principaux problèmes rencontrés par les exploitants ont été identifiés. La dernière section a enfin permis de synthétiser les observations réalisées.

La digestion anaérobie des boues de station d'épuration tend effectivement à se développer. Aujourd'hui, 96 stations sont équipées d'une unité de digestion fonctionnelle en France et de nombreux projets devraient encore voir le jour. Malgré certaines contraintes d'exploitation, les résultats témoignent toujours de performances intéressantes tant au niveau de la réduction du volume des boues que de la production de biogaz et les exploitants se montrent satisfaits du procédé.

Les voies de valorisation du biogaz ne concernent désormais plus uniquement le chauffage du digesteur et se diversifient avec la cogénération et surtout l'injection dans le réseau. Il est certain que la digestion va occuper une place importante dans l'avenir, puisque les stations d'épurations seront conçues pour valoriser au maximum nos déchets en plus de les traiter.

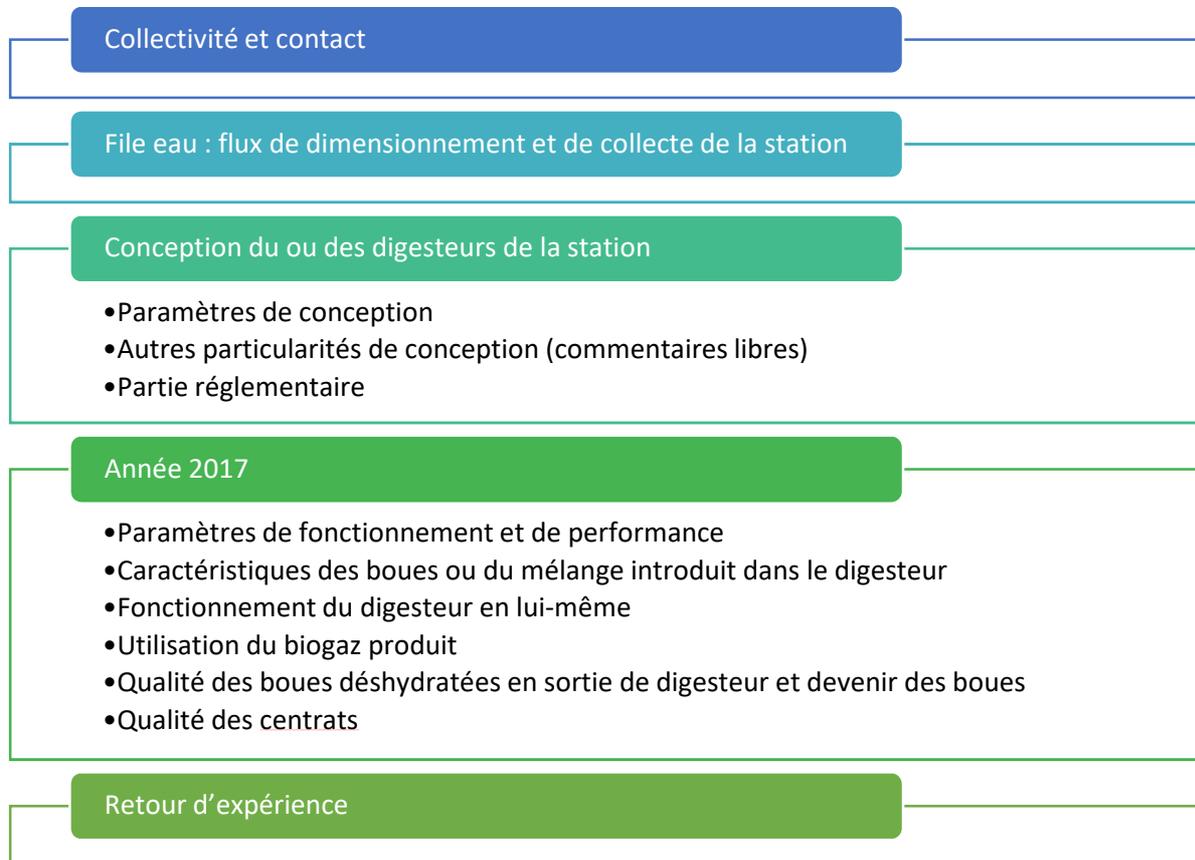
Bibliographie

- [1] R. Moletta, *La Méthanisation*, 3e édition. Lavoisier, 2015.
- [2] Anonymus, « Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020 », *Action pour le climat - European Commission*, 23-nov-2016. [En ligne]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr. [Consulté le: 07-juin-2019].
- [3] ADEME, « Méthanisation en France, un secteur en marche », ADEME & Vous : Le Mag, 102 : 12, 2017
- [4] MEDD (MINISTERE DE L'ECOLOGIE ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE) et MEFI (MINISTERE DE L'ECONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE) (2011) : Arrêté du 19 mai 2011 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz
- [5] Arrêté du 23 novembre 2011 fixant la nature des intrants dans la production de biométhane pour l'injection dans les réseaux de gaz naturel. .
- [6] Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, « Méthanisation des boues de stations : Règle de l'art et état des lieux sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse », déc-2012. [En ligne]. Disponible sur: https://www.eaurmc.fr/jcms/dma_40468/fr/methanisation-des-boues-de-stations-regle-de-l-art-et-etat-des-lieux-sur-les-bassins-rhone-mediterranee-et-corse. [Consulté le: 07-juin-2019].
- [7] GREENBIRDIE et CRIGEN, « Evaluation du potentiel de production de biométhane à partir des boues issues des stations d'épuration des eaux usées urbaines », Étude réalisée pour le compte de l'ADEME et de GrDF, sept. 2014.
- [8] A. Reverdy, J. C. Baudez, et E. Dieudé-Fauvel, « La digestion anaérobie des boues de stations d'épuration urbaines : état des lieux – état de l'art », janv. 2011.
- [9] F. Béline, R. Girault, F. Nauleau, et G. Bridoux, « La co-digestion anaérobie des boues d'épuration et de déchets organiques d'origine périurbaine », vol. Sciences Eaux & Territoires 2013/3, n° Numéro 12, p. pages 54 à 57.
- [10] « Mélanges d'intrants : biodéchets, boues et autres déchets | Atee - Association Technique Energie Environnement ». [En ligne]. Disponible sur: <http://atee.fr/biogaz/melanges-dintrants-biodechets-boues-et-autres-dechets>. [Consulté le: 12-juin-2019].
- [11] « Inra Transfert Environnement - Potentiel méthanogène ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www6.montpellier.inra.fr/it-e/Prestations/Analyses/Potentiel-methanogene>. [Consulté le: 12-juin-2019].
- [12] J. Zhang *et al.*, « Optimization and microbial community analysis of anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge based on microwave pretreatment », *Bioresour. Technol.*, vol. 200, p. 253-261, 2016.
- [13] W. Qiao, X. Yan, J. Ye, Y. Sun, W. Wang, et Z. Zhang, « Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment », *Renew. Energy*, vol. 36, n° 12, p. 3313-3318, 2011.
- [14] A. Grosser, « Determination of methane potential of mixtures composed of sewage sludge, organic fraction of municipal waste and grease trap sludge using biochemical methane potential assays. A comparison of BMP tests and semi-continuous trial results », *Energy*, vol. 143, p. 488-499, 2018.
- [15] V. Cabbai, M. Ballico, E. Aneggi, et D. Goi, « BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge », *Waste Manag.*, vol. 33, n° 7, p. 1626-1632, 2013.
- [16] GUERIN S., MOTTELET S., AZIMI S., BERNIER J., ANDRE L., RIBEIRO T., PAUSS A., et ROCHER V. (2017) : « Cartographie des boues de STEP et réduction du

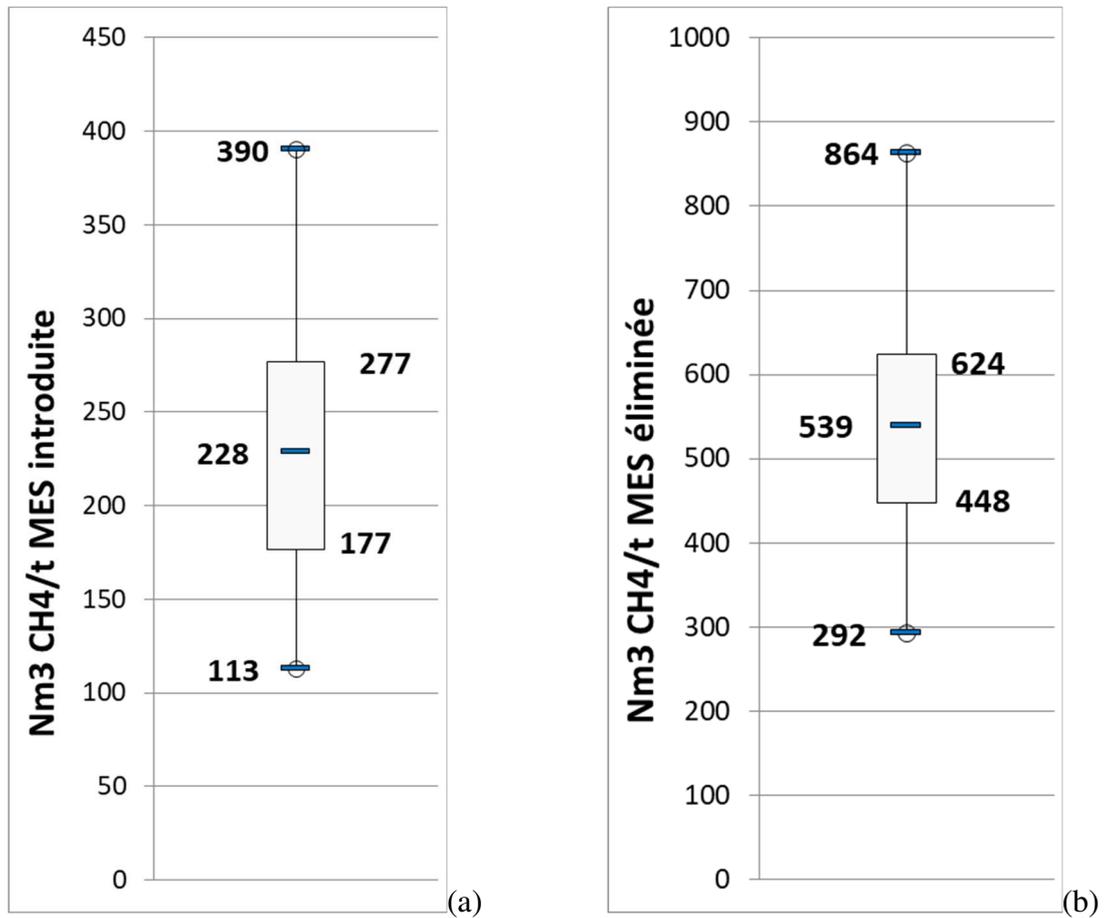
- temps de mesure du potentiel méthanogène par une approche « couplage expérimentation en réacteur et modélisation », Récents Progrès en Génie des Procédés, 110
- [17] FISGATIVA H., MARCILHAC C., GIRAULT R., DAUMER M.L., TREMIER A., DABERT P., et BELINE F. (2018) : « Physico-chemical, biochemical and nutritional characterisation of 42 organic wastes and residues from France », Data in Brief, 19 : 1953-1962
- [18] Thi Thanh Ha Pham, « Prétraitements des boues d'épuration pour accroître la biodégradabilité et éliminer simultanément les perturbateurs endocriniens », Université du Québec, 2010.
- [19] BeCloud.com, « La digestion anaérobie des boues ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/traitement-des-boues-liquides/stabilisation-des-boues-liquides/la-digestion-anerobie>. [Consulté le: 13-juin-2019].
- [20] Véolia Water Technologies, « Les procédés d'hydrolyse thermique ». .
- [21] « Exelys™ », Veolia. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.veoliawatertechnologies.com/fr/produits/exelys>. [Consulté le: 13-juin-2019].
- [22] Les fiches Syntau, « « La méthanisation des boues d'installations de traitement des eaux résiduaires urbaines ou industrielles » », vol. Eaux usées, n° n°6, nov. 2016.
- [23] « BioCrack - Comment la désintégration électrocinétique fonctionne-t-elle ? » [En ligne]. Disponible sur: <https://www2.vogelsang.info/fr/produits/desintegration/construction-et-modes-de-fonctionnement/mode-de-fonctionnement/>. [Consulté le: 24-juin-2019].
- [24] « Modélisation des processus biochimiques de la méthanisation | Energies Renouvelables et Environnement ». [En ligne]. Disponible sur: <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2015/modelisation-des-processus-biochimiques-de-la-methanisation>. [Consulté le: 13-juin-2019].
- [25] Arrêté du 19 mai 2011 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz.
- [26] « Epuration et injection de biométhane | Injection Biométhane ». .
- [27] N. Jeanmaire et G. Chipier, « Traitement de l'azote : nouveaux procédés et retour d'expérience », Environnement et Technique, n° 308, juill. 2011.
- [28] « Carte des unités de méthanisation et de biogaz ». [En ligne]. Disponible sur: <https://carto.sinoe.org/carto/methanisation/flash/#>. [Consulté le: 06-juin-2019].
- [29] L. AUBEUT " Les stations d'épuration urbaines qui injectent du biométhane - Retour d'expérience - Octobre 2019".

Annexes

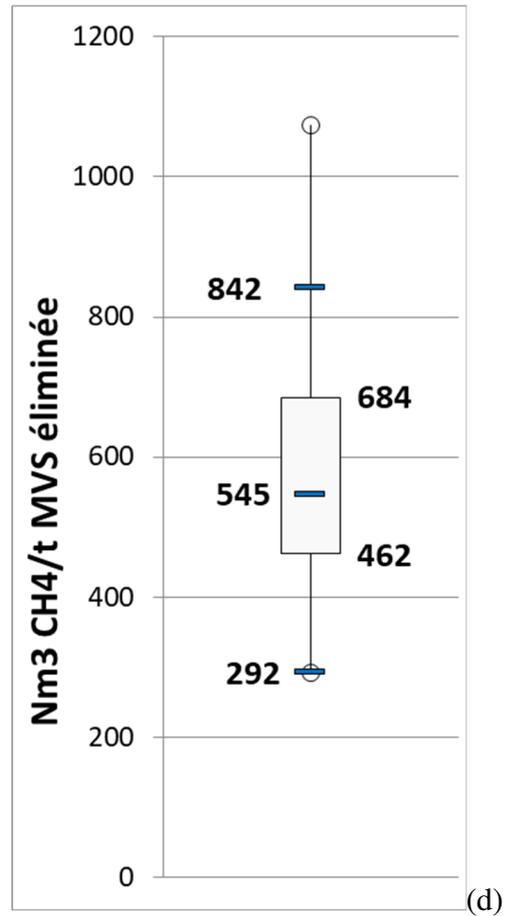
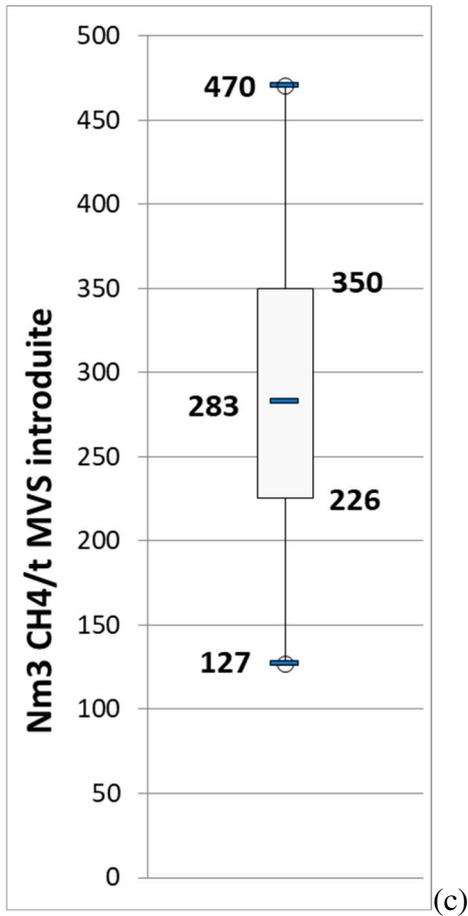
Annexe I : Structure du questionnaire



Annexe II : représentations statistiques de type boîte à moustaches des différents résultats concernant la production de biogaz

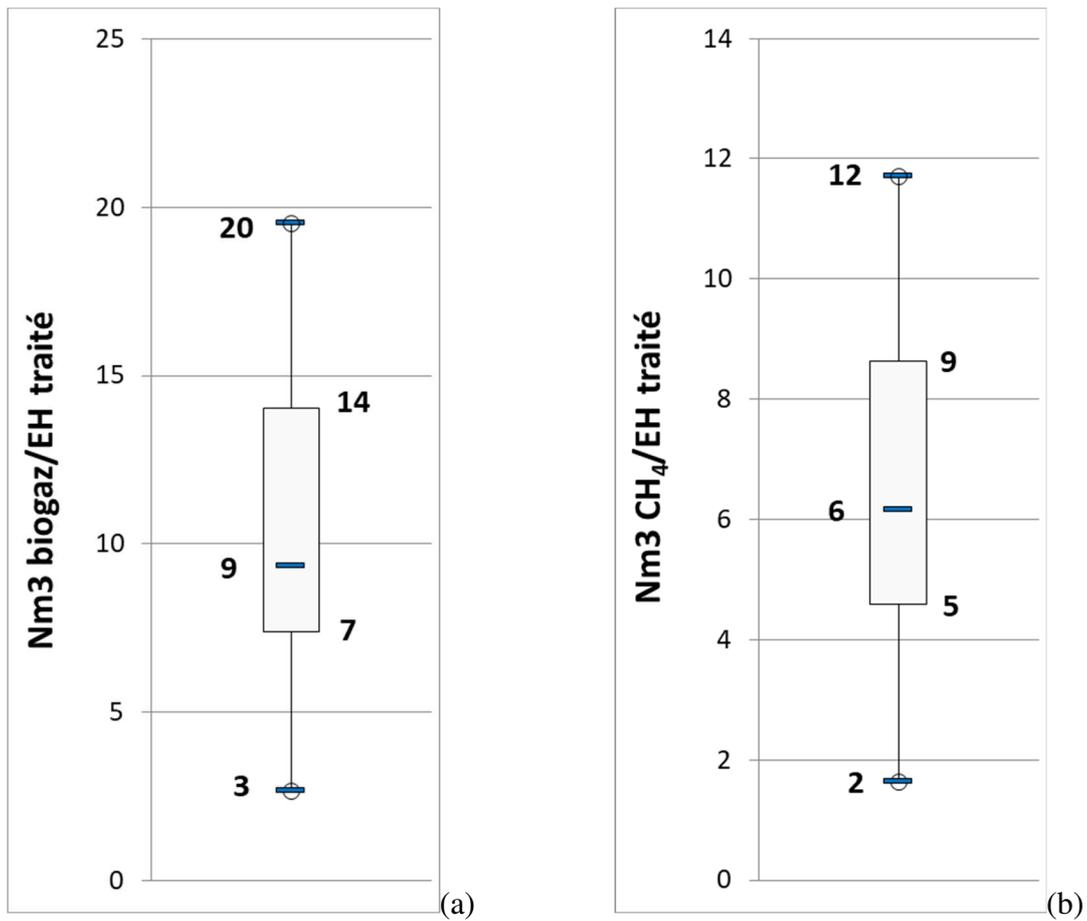


Production de CH₄ par tonnes de MES introduites (a) et par tonnes de MES éliminées (b)



Production de CH₄ par tonnes de MVS introduites (c) et par tonnes de MVS éliminées (d)

Annexe III : représentation statistique de type boîte à moustaches de la production de biogaz et de CH₄ calculée en Nm³/EH traité



Production de biogaz (a) et de CH₄ (b) par EH traité

Annexe IV : teneurs en MES et MVS des boues en sortie digestion

	MES (g/L)	MVS (%)
Min	16	54
Max	41	75
Moyenne	28	65
Nb réponses	24	23

Résumé

La digestion des boues de station d'épuration suscite de plus en plus d'intérêt auprès des collectivités. Cette technique permet en effet de réduire le volume des boues, de les stabiliser et de produire du biogaz. Celui-ci peut être valorisé sous forme d'énergie thermique et électrique, et peut également être injecté dans le réseau de gaz de ville depuis une modification de la législation en 2014. Ce rapport est motivé par cette évolution réglementaire. Il permet de réaliser un état des lieux des pratiques actuelles en France concernant la digestion des boues.

Une synthèse bibliographique présente les différentes étapes du procédé ainsi que les paramètres associés. À partir de ces connaissances, les résultats d'une enquête technique envoyée aux exploitants de stations d'épuration ont été analysés. Cela a permis d'identifier les pratiques majoritaires ainsi que les problèmes rencontrés par les exploitants. Malgré quelques difficultés liées au bouchage de canalisations par des filasses, à la gestion des retours en tête ou au respect des normes de qualité du biogaz et des boues, les exploitants semblent satisfaits et le nombre croissant de projets de digestion a pu être mis en évidence.

Abstract

There is a growing interest in the anaerobic digestion of sewage sludge. Indeed, this technology has the capacity to reduce sewage sludge quantity, to stabilize them and to produce biogas. The biogas can be utilized for heat production, converted into electricity or injected into the natural gas grid since the evolution of the legislation in 2014. This study is motivated by this regulatory development and should provide a state of play of the current practices in France regarding the digestion of sewage sludge.

First, a literature review presented the different process steps and the associated parameters. On the basis of this knowledge, the results of a technical survey sent to the wastewater treatment plant operators were analyzed. The most common practices and the problems encountered were identified. Despite some difficulties related to clogged pipes, the return the sludge liquor to the head of works, or the respect of gas and sludge quality standards, the operators seem to be satisfied and an increasing number of projects has been identified.



Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes
5 Rue de la Doua, CS 20244
69625 Villeurbanne Cedex

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>

Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement