



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

E. Falipou

► **To cite this version:**

E. Falipou. La digestion des boues de station d'épuration : état de l'art et paramètres clés. Sciences de l'environnement. 2019. hal-02609593

**HAL Id: hal-02609593**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02609593>**

Submitted on 16 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Eva FALIPOU

Filière EPEE (Electrochimie et Procédés pour l'Energie et l'Environnement)  
Année universitaire 2018/2019

Irstea, centre de Lyon-Villeurbanne  
5 Rue de la Doua, 69100 Villeurbanne

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

du 04/02/19 au 31/07/19

Confidentialité : non

Sous la supervision de :

- **Maître de stage : Jean-Marc PERRET, [jean-marc.perret@irstea.fr](mailto:jean-marc.perret@irstea.fr)**  
Présent à la soutenance : non
- **Tuteur école : Nadine COMMENGES-BERNOLE, [Nadine.Commenges@grenoble-inp.fr](mailto:Nadine.Commenges@grenoble-inp.fr)**

Ecole nationale  
supérieure de physique,  
électronique, matériaux

**Phelma**  
Bât. Grenoble INP – Minatec  
3 Parvis Louis Néel - CS 50257  
F-38016 Grenoble Cedex 01

Tél +33 (0)4 56 52 91 00  
Fax +33 (0)4 56 52 91 03

<http://phelma.grenoble-inp.fr>

Institut national de recherche  
en sciences et technologies  
pour l'environnement et l'agriculture

**Irstea**  
5 rue de la Doua  
CS 20244  
69625 Villeurbanne cedex

Tel: +33 (0)4 72 20 87 87

<https://www.irstea.fr/fr/irstea/nos-centres/lyon-villeurbanne>



## Sommaire

Glossaire.....	4
Liste des figures .....	4
Liste des tableaux .....	5
Présentation de l'institut.....	6
Remerciements .....	6
Introduction .....	7
I. Règles de l'art.....	9
1. Présentation générale.....	9
2. Les intrants .....	9
2.1. La nature des intrants .....	9
2.2. Zoom sur le potentiel méthanogène .....	10
2.3. Les différents prétraitements.....	12
3. Fonctionnement du digesteur .....	14
3.1. Les étapes biochimiques de la digestion anaérobie .....	14
3.2. Les différents types de digestion.....	15
3.3. Les différents paramètres suivis en exploitation.....	16
4. Les produits de la digestion.....	16
4.1. Le biogaz.....	16
4.2. Le digestat .....	18
4.3. 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
3.1. Taux de charge des stations .....	23
3.2. Type de filière eau des stations .....	23
4. Paramètres de conception des digesteurs .....	23
4.1. Evolution du nombre de digesteurs construits .....	24
4.2. Eléments de dimensionnement.....	24
4.3. Types d'intrants acceptés dans les digesteurs .....	25
4.4. Préparation des intrants.....	26
4.5. Energie utilisée pour le chauffage.....	27
4.6. Agitation .....	28
5. Paramètres de fonctionnement .....	28
5.1. En entrée .....	28
5.2. Dans le digesteur.....	29
5.3. En sortie .....	30
6. Performances.....	30
6.1. Suivi de la production de biogaz.....	31
6.2. Influence du type de filière eau.....	32
7. Utilisation du biogaz produit.....	33
8. Qualité et devenir des boues.....	34
9. Qualité et devenir des concentrats .....	35
10. Retours d'expériences des exploitants.....	36
III. Synthèse de l'étude.....	38

Conclusion.....	40
Bibliographie.....	41

## Glossaire

ADEME :	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AGV :	Acide gras volatil
BMP :	Biochemical Methane Potential
DBO5 :	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 sur différents types de boues d'épuration.....	11
Figure 2 : schéma général des réactions biochimiques de la méthanisation [23] .....	14
Figure 3 : les différentes géométries de digesteur existantes [9] .....	15
Figure 4 : carte des stations équipées de digesteurs en France métropolitaine .....	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 : l'évolution du nombre de stations ayant fait construire une unité de digestion au cours du temps.....	24
Figure 9 : types d'intrants acceptés par les stations .....	26
Figure 10 : type d'énergie utilisée pour le chauffage du digesteur suivant les stations.....	27
Figure 11 : comparaison entre les productions de biogaz observées et les tests de potentiels méthanogènes réalisés en laboratoire .....	31
Figure 12 : influence du type de filière eau sur la production de bio-méthane.....	32
Figure 13 : devenir des boues déshydratées .....	35

## 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 .....	28
Tableau 3 : données statistiques sur l'âge des boues des stations étudiées .....	29
Tableau 4 : réduction des teneurs en MES et MVS des boues par digestion (N=12) .....	30
Tableau 5 : réductions des teneurs en MS et MS obtenues sur la digestion des boues mixtes [7] .....	30
Tableau 6 : proportions de stations par point de valorisation du biogaz produit .....	33
Tableau 7 : évolution de la proportion de biogaz réinjecté dans le réseau.....	34

## Présentation de l'institut

L'institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea) est un Etablissement public à caractère scientifique et technologique français. Il s'agit de l'ancien Cemagref devenu « Institut Carnot » en 2006 et rebaptisé Irstea en 2012. L'institut est placé sous la double tutelle des ministères de la recherche et de l'agriculture. Une fusion avec l'institut INRA est prévue pour le 1<sup>er</sup> janvier 2020, qui deviendra alors l'INRAE. [1], [2]

Les domaines de recherche de l'institut sont répartis en trois départements ayant pour thèmes l'eau, les écotecnologies et l'aménagement des territoires. Au total, 1202 salariés travaillent dans les 9 centres répartis sur le territoire. La direction générale se trouve au centre de recherche d'Anthony, les autres centres étant situés à Aix-en-Provence, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon-Villeurbanne, Montpellier, Nogent-sur-Vernisson et Rennes. [2]

Le stage présenté dans ce rapport s'est déroulé au sein du centre de Lyon-Villeurbanne hébergeant deux unités de recherche ; plus précisément dans l'unité de recherche REVERSAAL (Réduire, Réutiliser, Valoriser les ressources des eaux résiduaires – département écotecnologies) dirigée par Jean-Marc Choubert. Les activités de cette unité portent sur les différents procédés de valorisation et de traitements des effluents urbains tels que les boues d'épuration. L'objectif de l'UR est de mettre au point la station d'épuration du futur, en suivant trois axes de recherche : réduire les émissions, réutiliser les eaux, et enfin récupérer et valoriser les ressources. La digestion des boues et la production de biogaz étudiées dans ce rapport s'inscrivent dans ce troisième axe. L'effectif total de l'unité peut atteindre 35 personnes (dont 17 permanents et 5 doctorants) réalisant des projets de recherche ou des expertises pour des collectivités ou des agences. Pour ses travaux, l'unité dispose de plusieurs infrastructures telles que le hall expérimental de la Feyssine directement alimenté en eaux usées et en boues par la station d'épuration voisine, ou le site de Craponne équipé de filtres plantés de roseaux en grandeur réelle. Un groupe technique de 5 personnes y intervient régulièrement. [3]

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant rendu possible ce stage et m'ayant aidé à le mener à bien.

En premier lieu, M. Jean-Marc Perret, mon maître de stage, qui a toujours trouvé le temps pour répondre à mes questions et partager son expérience avec moi. Merci pour tous tes conseils et ta bienveillance.

Je remercie également Mme Sylvie Gillot et M. Jean-Pierre Canler d'Irstea ainsi que Mme Céline Lagarrigue de l'agence de l'eau RMC pour leurs conseils et leurs remarques qui ont permis d'améliorer grandement ce travail.

Je remercie enfin toute l'unité de recherche REVERSAAL pour son accueil et sa bonne ambiance au quotidien.

## Introduction

La digestion anaérobie aussi appelée méthanisation est un procédé transformant la matière organique en biogaz. Ce biogaz est constitué majoritairement de méthane et de gaz carbonique, ce qui en fait une source d'énergie intéressante [4].

En France, le procédé est utilisé depuis les années 1940 dans le domaine de l'agriculture pour traiter les fumiers, 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 maintenant les résidus agricoles, les déchets et les boues d'épuration [4]. Avec les enjeux climatiques actuels et l'objectif fixé par l'Union Européenne de porter à 20% la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique [5], ce secteur tend à susciter de plus en plus d'intérêt avec un nombre important de digesteurs en projet. 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 eaux usées en plus de les traiter. C'est cet aspect qui fera l'objet de l'étude présentée ici.

Récemment, la législation a évolué concernant la nature des intrants pouvant être utilisés lorsque le biogaz épuré en biométhane est ensuite réinjecté dans le réseau de gaz naturel. En effet, depuis le 27 juin 2014, les boues de stations d'épuration d'eaux usées font partie des intrants autorisés [6] ce qui ouvre de nouvelles opportunités aux stations d'épuration. Si la digestion était auparavant réalisée principalement pour réduire le volume des boues tout en fournissant une source d'énergie à la station, elle présente désormais l'avantage de pouvoir devenir une source de revenus propres. Afin d'étudier l'impact de cette modification et de dresser un état des lieux de la situation actuelle de la digestion des boues d'épuration en France, une enquête sur le sujet a été lancée en 2018 auprès des exploitants en France métropolitaine. Le questionnaire a été réalisé en collaboration avec des exploitants de la région, et les résultats permettront de réactualiser le document de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse de 2012 sur la méthanisation des boues d'épurations [7].

L'objectif principal de ce rapport est d'analyser les 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'agira également d'identifier les principaux problèmes rencontrés par les exploitants de digesteurs et d'apporter des solutions qui pourront être discutées ensuite par la profession. De nouvelles questions de recherche pourront enfin être identifiées. Pour ce faire, il a d'abord été nécessaire de relancer les exploitants n'ayant pas répondu afin d'obtenir le maximum de données possible, puis il a fallu traiter statistiquement ces données et synthétiser les retours d'expérience des stations.

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



# I. Règles de l'art

Pour pouvoir analyser les performances d'une unité de digestion, il est nécessaire de bien connaître son fonctionnement et de comprendre les liens entre les différents paramètres du procédé. Cette section va donc présenter une synthèse bibliographique en prenant de manière chronologique les différentes étapes du processus : d'abord au niveau des intrants et de leur préparation, puis au niveau de la digestion en elle-même, et enfin au niveau des différents produits 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, alors 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. 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 fumiers, les déchets agricoles ou encore les boues de station d'épuration. [4], [8]

Contrairement à la plupart des autres filières qui utilisent la digestion pour sa production de biogaz, la digestion des boues d'épuration a pour objectif premier 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 [9]. La digestion permet en effet de réduire la teneur en MS des boues jusqu'à 40% et la teneur en MV jusqu'à 50%. Le procédé a de plus l'avantage de produire un digestat stabilisé avec une forte diminution des risques d'odeurs, 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 [9]). 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 ou revendue. Enfin depuis l'évolution de la législation, le biométhane peut lui-même être revendu (en tant que gaz de ville ou GNV pour des flottes de bus).

Les performances de la digestion anaérobie en qualité et quantité de biogaz produit dépendent de plusieurs paramètres dont, dans un premier temps, de la nature des intrants.

## 2. Les intrants

### 2.1. La nature des intrants

Les intrants alimentant la digestion peuvent avoir 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 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. 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 (aussi appelées « boues d'aération prolongée »).

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

Ce dernier type de boues est du même type que les boues biologiques 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 plus minéralisées que les boues primaires et ont 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. Ces graisses présentant un fort pouvoir fermentescible, il est intéressant de les mélanger aux boues.

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 bon potentiel méthanogène [10] 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 [11], 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. Des complications réglementaires peuvent aussi survenir pour retracer une pollution due à un épandage de digestat. Ces textes sont actuellement en réécriture au ministère, avec un souhait de la profession d'assouplir la possibilité de mélanges de boues (plus d'autorisation préfectorale), mais en interdisant les intrants autres que ceux provenant des structures d'assainissement.

## 2.2. 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 peut s'exprimer en Nm<sup>3</sup> de méthane produit par kg de

matière volatile appliqué ( $\text{Nm}^3\text{CH}_4.\text{kg MV}^{-1}$ ) ou, pour les effluents, en  $\text{Nm}^3$  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 [12], 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, et par la mesure de la DCO pour un liquide. La production de biogaz est alors suivie 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.

De nombreuses recherches ont été menées sur l'évaluation du 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 [13]–[16].

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.

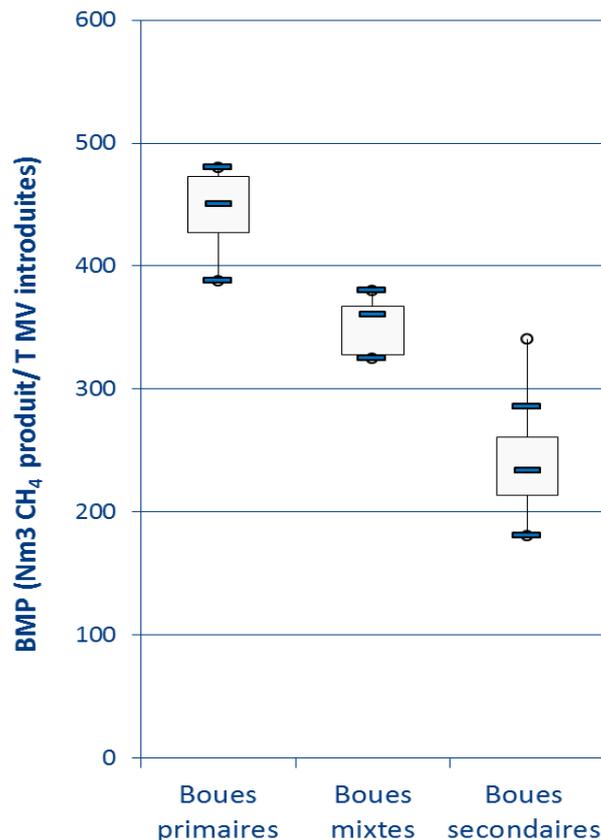


Figure 1 : représentation statistique de type « boîtes à moustaches » des résultats de tests BMP sur différents types de boues d'épuration

On retrouve sur ce graphique une répartition logique des potentiels méthanogènes en fonction du type de boues d'épuration. Les boues secondaires 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 bonnes conditions de laboratoire (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 ce qui est surtout utile pour des projets de co-digestion.

### 2.3. Les différents prétraitements

Avant d'alimenter le digesteur, les boues doivent au préalable subir un épaissement. Il existe pour cela différentes techniques : l'épaississement gravitaire, la flottation, un passage sur table d'égouttage, ou la centrifugation [9].

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

Outre cette préparation obligatoire des intrants, il existe plusieurs techniques pour désintégrer les boues avant alimentation du réacteur et améliorer ainsi l'efficacité de la digestion. 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. [4]

- 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 [17].

Sur les installations industrielles, l'élévation de température est généralement obtenue en injectant de la vapeur directement au cœur des boues [4].

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 de Digeslis Turbo® 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 groupe Suez 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% [18]. Aucune référence française n'existe actuellement.

### **Biothélys® et Exelys® (Véolia Waters)**

Le procédé Biothélys® fonctionne en batch (c'est-à-dire par série de taches 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 est mis en place sur les stations d'épuration de Saumur (60 000 EH), du Pertuiset (80 000 EH), de Château-Gonthier (38 000 EH) et de Tergnier (30 000 EH). [19]

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). [4], [20]

Les performances annoncées par le constructeur de ces procédés 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

Véolia 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. [19]

- **Ultrasonication**

Avec cette technique, l'éclatement des cellules est réalisé grâce au phénomène de cavitation (formation de bulles qui en implosant peuvent provoquer 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. [4], [17]

En France, ce procédé développé par Ultrawaves est commercialisé par le groupe SAUR sous le nom de Sonoflux®. Il équipe les stations de Tourlaville-Cherbourg (150 000 EH), Vence (28000 EH) et des Ecossiernes à Saint-Nazaire (100 000 EH). [4]

Le groupe VINCI a également équipé la station d'épuration Campo Dell'Oro à Ajaccio (40 000 EH extensibles à 65 000 EH) d'un système à ultrasons similaire pour optimiser la méthanisation. [21]

- Electrocinétique

Cette technique est utilisée en Allemagne où le système BioCrack de Vogelsang est très développé. Avec ce procédé, les boues circulent grâce à une pompe à travers 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. [22]

En France, la station d'épuration de Reventin Vaugris (125000 EH) est équipé de ce système mais ne l'a pas encore mis en fonctionnement.

Les différents intrants mélangés et épaissis, après avoir subi ou non un prétraitement spécifique, sont ensuite injectés dans le digesteur en continu ou par bâchées pour démarrer la réaction.

### 3. Fonctionnement du digesteur

#### 3.1. 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.

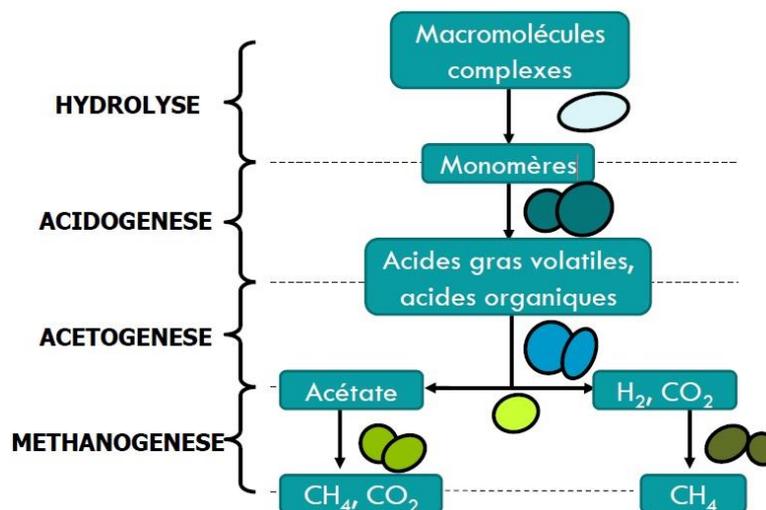


Figure 2 : schéma général des réactions biochimiques de la méthanisation [23]

Ce processus est composé de quatre grandes étapes biochimiques successives détaillées ci-dessous [4], [7], [9] :

- **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'acidogénèse**

Les monomères 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'acétogénèse**

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.

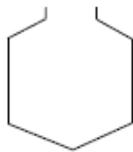
- **La méthanogénèse**

Dans cette dernière étape, le biogaz est formé à partir de l'acétate, de l'hydrogène et du gaz carbonique grâce à 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 CO<sub>2</sub>). Le reste provient de la transformation du dioxyde de carbone et de l'hydrogène en méthane et en eau.

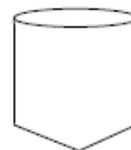
### 3.2. Les différents types de digestion

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.

Le type continental



Le type cylindrique



Le type ovoïde



Le type anglo-américain

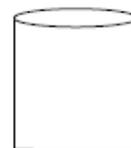


Figure 3 : les différentes géométries de digesteur existantes [9]

En France, les principaux constructeurs proposent 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 [4]. Il existe enfin une possibilité de combiner les deux configurations pour fonctionner en deux phases : une première étape thermophile suivie d'une étape mésophile.

Au cœur du digesteur, le brassage est un élément essentiel pour le bon fonctionnement du procédé car 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 passer dans un échangeur de chaleur avant de retourner dans le réacteur afin de maintenir la température dans l'ouvrage. Ce système contribue lui aussi en partie au brassage.

### 3.3. 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 l'apparition de problèmes. Cependant la fréquence et le type d'analyse à réaliser sont laissés au choix 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.) [4].

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

- 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 qui est un bon indicateur de la stabilité de la réaction (ils sont produits lors de l'hydrolyse)
- Le ratio AGV/TAC
- La caractérisation des substrats à traiter (MS, MV, DCO, N-NH<sub>4</sub>,...)

À la sortie du digesteur, trois types de produits issus de la réaction sont récupérés : 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

### 4.1. 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 ( $H_2S$ ). Il est donc corrosif et doit passer par une étape de condensation de l'eau généralement combinée à une étape de désulfuration. Il existe de plus des limites concernant les taux de  $H_2S$  admissibles en fonction du type de valorisation du gaz, car il se transforme en  $SO_2$  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  $H_2S$  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 une épuration encore plus importante pour se rapprocher du gaz naturel. [4]

De manière générale, la première utilisation du biogaz est le chauffage du digesteur et l'excédent est brûlé en torchère. 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 sécheurs de boues déshydratées par exemple, ou bien pour des entreprises proches extérieures. On peut dans ce cas se contenter d'une élimination de l'humidité en surveillant la teneur en  $H_2S$  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 présente de faibles rendements). L'électricité produite peut être utilisée sur le site ou bien revendue au réseau. Il existe une obligation d'achat d'électricité produite à partir de biogaz dont les modalités sont définies dans l'arrêté du 19 mai 2011 [24]. Pour réaliser une cogénération, on peut utiliser 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 ou des camions de collecte des ordures ménagères. Les traitements nécessaires sont alors plus importants et comprennent des étapes de compression, désulfuration, décarbonation, déshydratation et déshalogénéation avant un stockage dans des bouteilles. Plusieurs techniques peuvent être utilisées : des techniques par absorption physique (comme le lavage à l'eau) ou chimique (l'absorption aux amines), des techniques par adsorption (le PSA, adsorption par variation de pression), la séparation membranaire ou l'épuration cryogénique. En France, la station de Marquette-lez-Lille utilise cette voie de valorisation pour alimenter huit bus. La Métropole de Grenoble utilise également du biogaz produit grâce à la station d'Aquapole pour sa flotte de bus.

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

L'injection du biogaz dans le réseau est la dernière voie de valorisation rendue possible par la législation pour les boues d'épuration en 2014. 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, il sera encore odorisé par GrDF pour la sécurité des usagers. [25]

#### 4.2. Le digestat

Après digestion, les boues extraites sont appelées digestat (ou boues digérées). Ce digestat est tout d'abord déshydraté ce qui permet de réduire le volume de boues à évacuer, puis il peut subir des traitements complémentaires en fonction de la façon dont il sera valorisé (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, ou en dernier recours la mise en décharge.

La digestion des boues offre plusieurs avantages par rapport à des boues classiques pour une utilisation 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 métaux lourds dans le digestat qui peut dépasser le maximum autorisé et empêcher alors une valorisation agronomique.

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 grosses stations. Il est néanmoins nécessaire de connaître parfaitement leur composition pour maîtriser les traitements des gaz issus de leur combustion. [4], [9]

#### 4.3. 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 retraitée 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 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 struvites (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 les procédés Sharon et Anamox qui court-circuitent l'étape naturelle de nitrification et permettent d'éliminer l'ammonium (shunt des nitrates). [26] Le stripping de l'ammoniaque (traitement permettant de le séparer de la phase liquide) peut également être envisagé.

Cette section a présenté les résultats de recherches bibliographiques dans le but de se familiariser avec les différents aspects du procédé de digestion des boues d'épuration. La suite de ce rapport va consister à analyser concrètement les pratiques des stations d'épuration françaises possédant une installation de digestion.

## 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 meilleures configurations et les différents problèmes existants pour développer au mieux cette filière. Cette section s'attache donc à établir un état des lieux et des pratiques des stations 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, la première étape a été de recenser les stations d'épuration équipées d'un digesteur en France métropolitaine. 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 aux exploitants par le biais du Graie à travers des envois groupés par mail. Devant le faible taux de réponse, une stratégie de relances individuelles a finalement été adoptée, d'abord par mail puis par courrier.

Le questionnaire a été réalisé conjointement entre Irstea, le Graie et certains exploitants de la région Rhône Alpes. Il est constitué de 12 sections couvrant tous les aspects de la station reliés à la filière digestion afin de pouvoir faire 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 de rapporter les différents problèmes rencontrés par les exploitants.

La présentation des résultats détaillée par la suite suivra la même logique que le questionnaire et l'interprétation se fera directement.

### 2. Représentativité des réponses

L'étape de recensement a permis d'identifier 97 stations d'épuration équipées d'une filière de digestion en fonctionnement en France, ainsi que 10 projets de digestion connus. Il est intéressant de noter que ces recherches ont permis d'aller au-delà des données centralisées par l'ADEME qui ne recense en 2019 que 73 installations de digestion en stations d'épuration dans l'outil SINOE<sup>®</sup> Déchets [27].

À la suite des différentes relances, 34 stations ont répondu au questionnaire ce qui correspond à un taux de réponse de 35%. Si on se concentre sur les territoires dépendants de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, ce taux de réponse monte à 49%. Ce bon résultat peut s'expliquer par un meilleur contact avec les exploitants qui avaient déjà été sollicités pour l'état des lieux réalisé en 2012 [7]. La carte ci-dessous (figure 4) montre la répartition des stations équipées sur le territoire en distinguant celles ayant répondu au questionnaire ainsi que les projets de digestion.

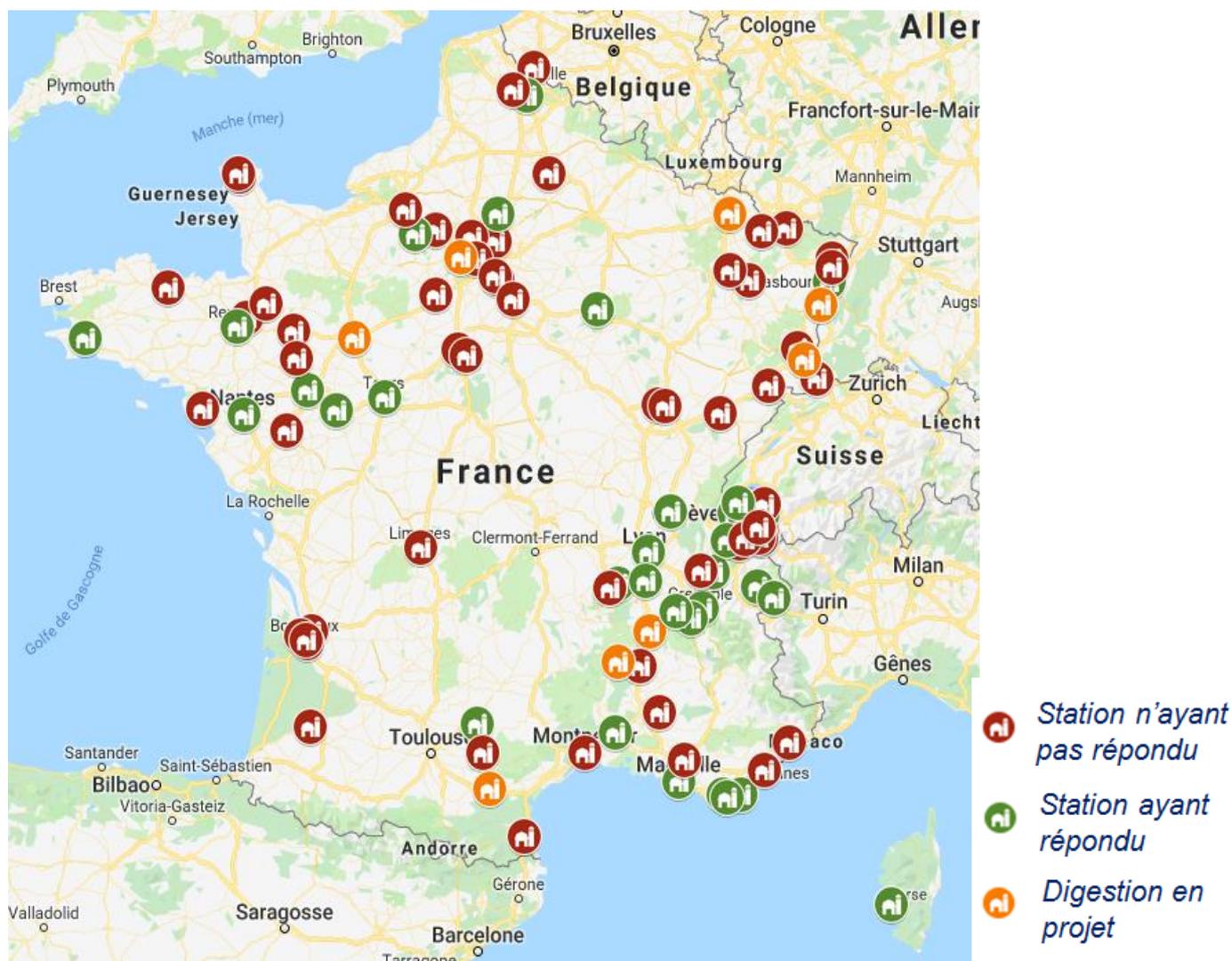


Figure 4 : carte des stations équipées de digesteurs en France métropolitaine

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. Au contraire, on observe une forte concentration de stations équipées en Haute-Savoie, ce qui avait déjà été relevé dans le rapport de 2012 [7]. 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.

Ce taux de réponse de 35% obtenu peut paraître faible et plusieurs explications peuvent être 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 toutes les données ce qui a pu décourager un certain nombre d'exploitants. Les envois groupés par mail utilisés pour le lancement de l'enquête ont peut-être également réduit l'impact, Irstea étant moins en avant, 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. 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 sont actuellement dans une période de transition entre

deux exploitants ou bien en train de lancer des appels d'offre pour l'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).

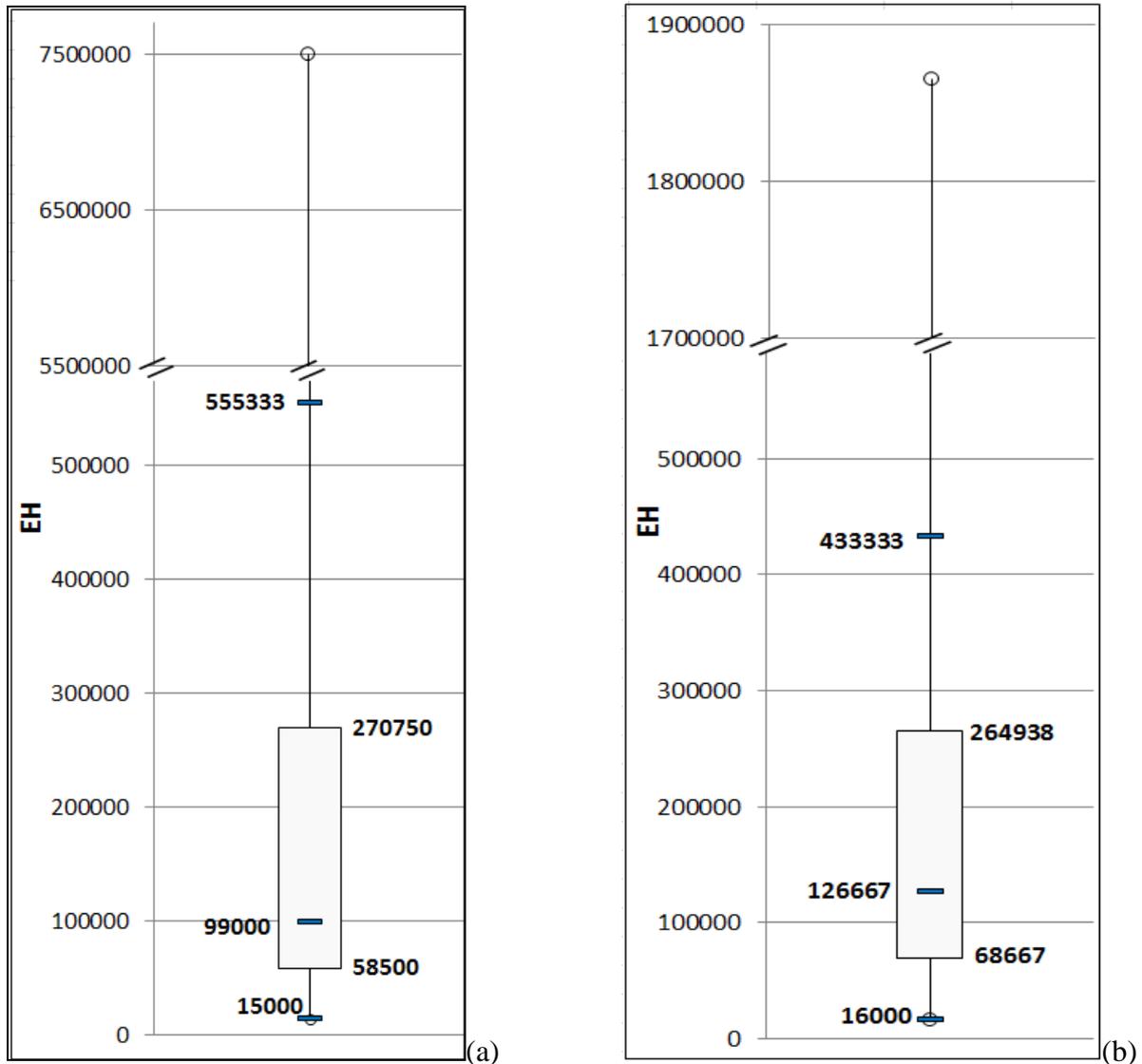


Figure 5 : capacités nominales des stations équipées de digesteurs pour toutes les stations recensées en France (a) et pour les stations ayant répondu au questionnaire (b)

On observe que les réponses obtenues ne couvrent pas les plus grosses stations françaises et en particulier celles situées en région parisienne et gérées par le SIAAP. Cependant ces stations représentent un cas particulier justement de par leur capacité bien supérieure à celles des autres collectivités. L'exploitant a annoncé un retour de l'enquête courant juillet. Leur absence actuelle de cet état des lieux n'aura donc pas d'impact majeur. Par ailleurs, l'échantillon de réponses obtenu contient tout de même les stations de Marseille et Strasbourg dépassant toutes deux le million d'équivalent habitant (EH).

Les extrêmes mis à part (étant statistiquement considérés comme des valeurs aberrantes), les deux représentations de la figure 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 sur la figure 6 ci-dessous en fonction de leur capacité nominale.

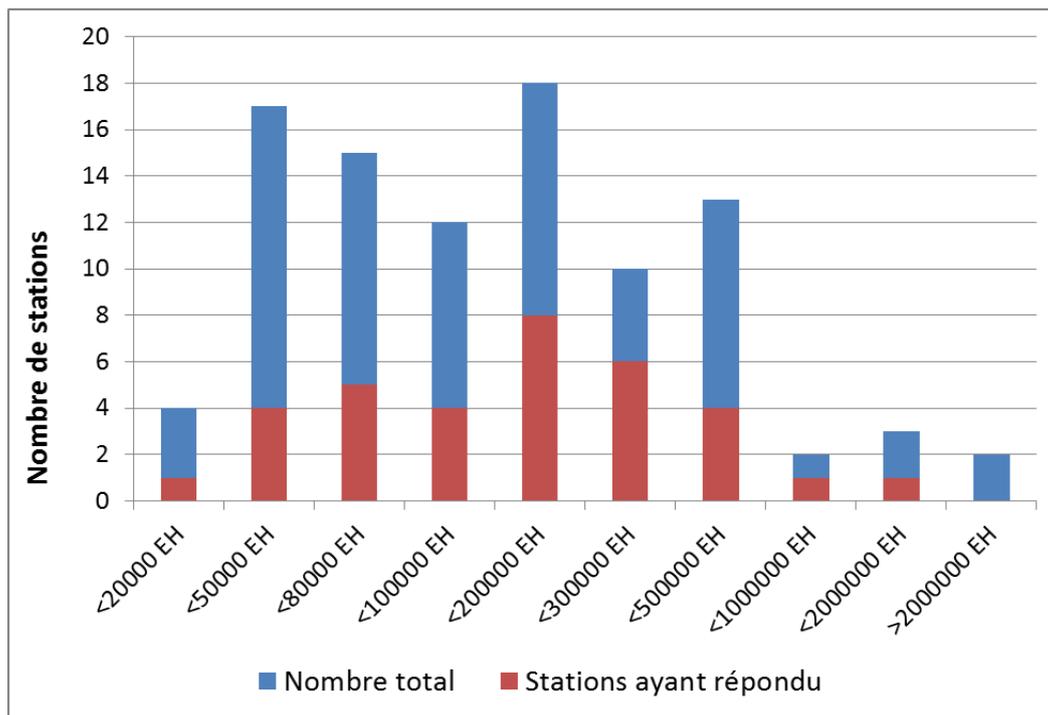


Figure 6 : répartition des stations équipées de digesteurs en fonction de leur capacité nominale

On s'aperçoit que toutes les classes de capacités nominales sont représentées dans les réponses au questionnaire, à l'exception comme expliqué plus haut des stations supérieures à 2 millions d'équivalents habitants situées en région Parisienne et faisant figure d'exception.

En considérant un taux de réponse de 35%, des représentations statistiques semblables et une bonne répartition des réponses par capacité nominale, on peut annoncer que les résultats de l'enquête sont assez représentatifs du parc national pour pouvoir être analysés de façon intéressante.

### 3. File eau

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

### 3.1. 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.

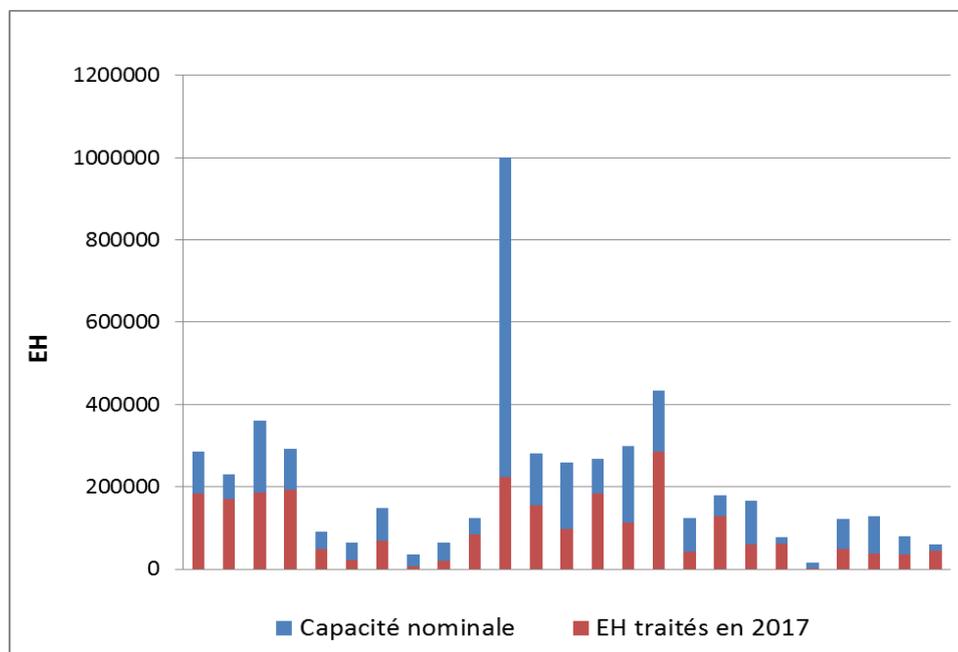


Figure 7 : représentation du taux de charge effectif par station

Comme illustré sur le graphique, le taux de charge effectif moyen annuel des stations ayant répondu vaut 49%. Cette valeur est bien représentative du parc français où les stations ne fonctionnent généralement qu'à la moitié de leur capacité. Ce faible taux de charge montre également que les digesteurs bénéficient d'un mode de fonctionnement éloigné de leur capacité maximale ce qui permet d'atteindre des temps de séjour des boues dans l'ouvrage plus longs et de réaliser une meilleure digestion.

### 3.2. Type de filière eau des stations

La file eau des stations peut également être étudiée pour identifier le type de technologie utilisée ce qui conditionnera la nature des boues envoyées en digestion. Sur les stations ayant répondu, 52% indiquent utiliser des boues activées, 39% la biofiltration et 9% un MBBR (procédé biologique à cultures fixées fluidisées). On voit ainsi qu'une station peut décider de mettre en place une filière digestion quel que soit son type de file eau, bien qu'il soit important de noter que ces traitements sont presque tous combinés à un traitement primaire avec une production de boues moins minéralisées. L'influence du type de file eau sera étudiée dans la partie analyse des performances.

## 4. Paramètres de conception des digesteurs

Intéressons-nous maintenant à la filière digestion en elle-même. Avant d'étudier son fonctionnement, de nombreuses informations ont été demandées aux exploitants à propos de la conception des digesteurs.

#### 4.1. Evolution du nombre de digesteurs construits

Compte-tenu de la problématique à la base de cette étude – 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 semblait intéressant d'utiliser les données récoltées dans le 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).

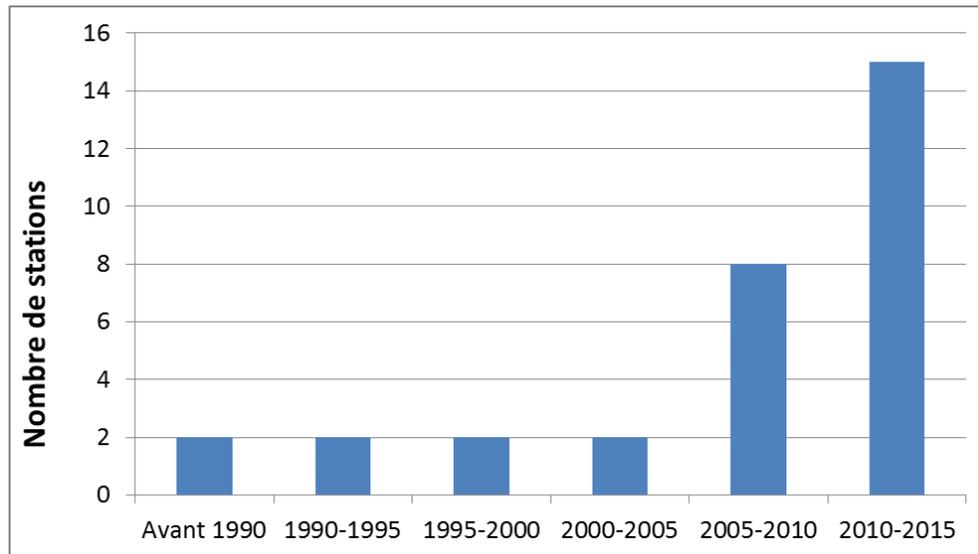


Figure 8 : l'évolution du nombre de stations ayant fait construire une unité de digestion au cours du temps

On peut effectivement observer sur ce graphe une augmentation importante du nombre de stations d'épuration décidant de digérer leurs boues à partir de 2005, et plus encore après 2010. On peut penser 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 l'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 affirmer y voir une influence.

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

#### 4.2. Eléments de dimensionnement

L'un des objectifs de cet état des lieux est de pouvoir fournir des informations aux exploitants désirant installer une filière digestion sur leur site. Une des questions qui se pose alors concerne le nombre de digesteurs à construire. Sur les données récoltées, 67% des stations sont équipées d'un unique digesteur, 27% en possèdent deux et 6% trois. On note également que dans le cas de digesteurs multiples, les constructeurs ont opté pour un fonctionnement en parallèle à l'exception d'une station.

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.

<b>Nombre de digesteurs</b>	<b>Capacité nominale (EH)</b>	<b>Volume digesteur (m<sup>3</sup>)</b>
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 pour les exploitants dans la conception de leur installation. 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 implique l'installation de plusieurs digesteurs. Le nombre de digesteurs et leur volume restent bien sûr à adapter suivant la place disponible sur le site et les contraintes de construction. Le volume choisi dépend également de l'ajout ou non d'intrants extérieurs à la station lors du projet de construction.

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 m<sup>3</sup> 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 à l'exception de celle de Marseille indiquent utiliser une digestion mésophile. Cela confirme bien les informations trouvées dans la bibliographie.

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

#### 4.3. Types d'intrants acceptés dans les digesteurs

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

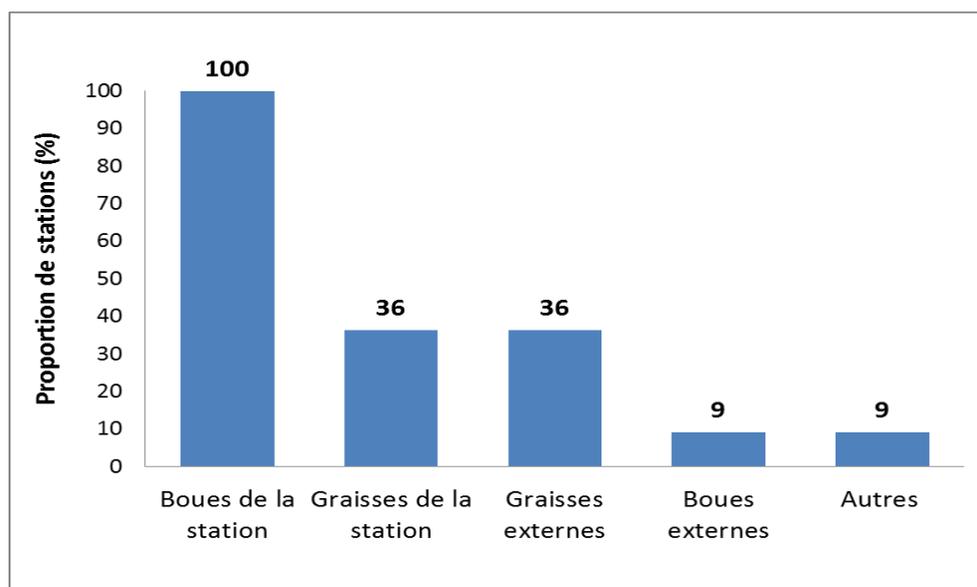


Figure 9 : types d'intrants acceptés par les stations

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 on remarque en analysant les données qu'il s'agit toujours d'un mélange de graisses internes et externes. Enfin, 9% des stations utilisent d'autres types d'intrants qui sont ici des matières fermentescibles d'origine agroalimentaire, des matières de vidange ou des boues de lavage d'un filtre tertiaire.

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

Une étude plus fine a été réalisée au niveau des boues pour les distinguer suivant leur nature. Sans considérer les intrants extérieurs, 76% des stations ayant répondu envoient des boues mixtes (soit un mélange de boues primaires et secondaires) en digestion. La bibliographie a en effet montré qu'il s'agissait du type de boues le plus utilisé puisque des boues secondaires seules sont moins adaptées au procédé et qu'une station équipée d'un traitement primaire seul n'est pas viable en France. Quatre stations indiquent utiliser des boues primaires seules, et quatre autres des boues secondaires seules. Cependant en considérant l'ajout d'autres intrants, on remarque que des graisses sont ajoutées pour une des stations avec des boues primaires et deux des stations avec des boues secondaires. Pour ces dernières en particulier, l'ajout de graisses permet de compenser le pouvoir fermentescible plus faible des boues secondaires.

Il reste tout de même deux stations utilisant uniquement des boues secondaires, mais la mise en évidence d'éventuels problèmes liés à ce type de digestion sera compliquée du fait d'un retour d'expérience très limité de la part de ces deux sites. Les trois stations digérant des boues primaires seules n'évoquent pas de problèmes particuliers.

#### 4.4. Préparation des intrants

Avant d'alimenter le digesteur, les intrants doivent passer par différentes étapes. 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.

La première étape est l'épaississement des boues qui peut être réalisé suivant différentes techniques. On retrouve dans les retours des stations des épaississements par table d'égouttage, par tambour rotatif, par centrifugeuse, ou encore par épaississement gravitaire hersé en fond de décantation lamellaire physico-chimique. La plupart des stations injectent de plus 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 bêche à boues agitée qui permet une bonne homogénéisation du mélange avant la digestion. Ce mélange peut s'effectuer avant l'épaississement, ou après si l'épaississement diffère en fonction du type de boues. Certaines stations préfèrent en effet utiliser un épaississement statique gravitaire pour leurs boues primaires tandis que leurs boues biologiques sont flottées.

Après l'épaississement, certaines stations utilisent des broyeurs ou un tamis dans le but d'éliminer les filasses des boues qui peuvent dégrader les équipements (en particuliers les agitateurs) ou causer des problèmes de bouchage. Sur les 16 stations concernées, on observe une répartition équitable entre les deux techniques. On notera cependant suite à une discussion avec des exploitants que le procédé de tamis fin sous pression (Strainpress®) souvent utilisé peut entraîner une perte en déshydratabilité des boues.

Concernant les différentes techniques de désintégration des boues présentées en première section et visant à améliorer leur digestion, une seule station ayant répondu à l'enquête utilise le procédé d'hydrolyse thermique (Saumur). Ce retour est insuffisant pour mettre en évidence les avantages annoncés de cette technique.

#### 4.5. Energie utilisée pour le chauffage

Comme il a déjà été dit plus haut, la quasi-totalité des digesteurs étudiés pour l'enquête fonctionnent en mode mésophile (entre 35 et 37°C en moyenne). Il a été demandé aux exploitants de renseigner le type d'énergie utilisée pour atteindre cette température (voir figure 10).

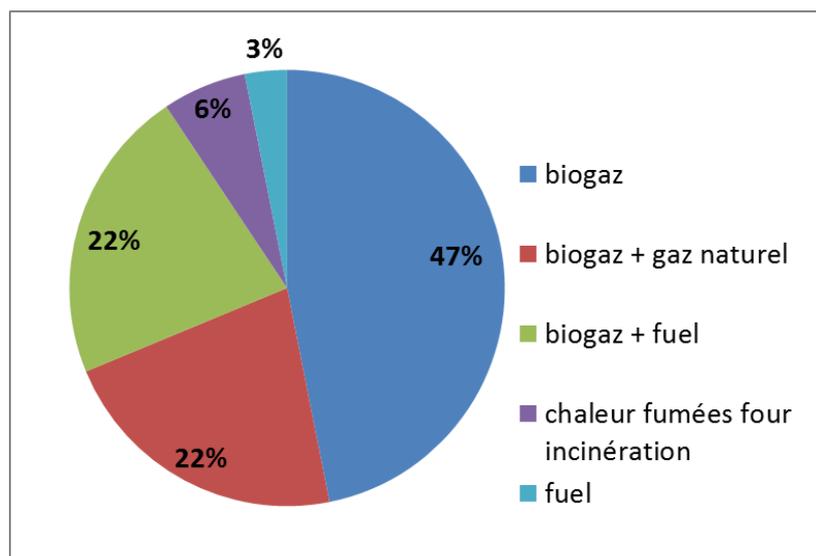


Figure 10 : type d'énergie utilisée pour le chauffage du digesteur suivant les stations

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 comme annoncé en bibliographie. Les trois stations qui utilisent d'autres sources d'énergie 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 sont présents en secours en cas de production insuffisante. Ces énergies complémentaires sont également nécessaires lors du démarrage du digesteur.

#### 4.6. Agitation

D'après les informations récoltées par l'enquête, les technologies utilisées pour le brassage du digesteur se répartissent équitablement entre les agitateurs mécaniques (de type axial, hélicoidal, pendulaire, ou encore à double pale) et une agitation au biogaz. Cependant, 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 Dégremont fait construire 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.

### 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, dans, et à la sortie du digesteur.

#### 5.1. 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 d'évaluer les rendements atteints en termes de réduction du volume des boues.

	<b>pH</b>	<b>MES (g/L)</b>	<b>MVS (%)</b>
<b>Min</b>	6,0	20,0	65
<b>Max</b>	7,8	64,0	84
<b>Moyenne</b>	6,8	43,5	76
<b>Nb réponses</b>	23	26	23

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 [4]. 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 [4] 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. Ces données seront surtout intéressantes à comparer aux résultats obtenus en sortie pour déterminer les taux de réduction en MES et MVS dans l'ouvrage.

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

## 5.2. 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 qui passent à travers un échangeur de chaleur. Vient ensuite le pH qui se situe en moyenne à 7.3 (N=25) ce qui correspond bien à la valeur recherchée. Cette mesure est généralement réalisée de manière hebdomadaire.

Les mesures des concentrations en AGV et TAC sont réalisées par 18 stations de manière hebdomadaires ou mensuelles. Les résultats obtenus sont très variables en fonction des stations 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 0.64 avec une moyenne de 0.13. D'après les données de l'ADEME, un rapport AGV/TAC inférieur à 0.3 est synonyme de conditions normales de fonctionnement. La seule station dépassant cette valeur est celle de Chambéry avec un résultat de 0.64. On observe en effet une concentration en AGV élevée sur cette station qui peut signaler une surcharge en matière organique. Les autres stations respectent toutes le critère.

Il avait également été demandé dans le questionnaire les résultats d'analyse de la concentration en N-NH<sub>4</sub> 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 de 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.

	<b>Temps de séjour (jours)</b>
<b>Min</b>	21
<b>Max</b>	57
<b>Moyenne</b>	32
<b>Optimal (R. Moletta)</b>	25

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

On remarque que le temps de séjour moyen des boues calculé sur l'année est supérieur à l'optimal recommandé pour une digestion anaérobie mésophile. Ces résultats sont cohérents avec les observations réalisées dans le paragraphe II.3.1 sur le taux de charge des stations. En effet, les stations étant loin de leur capacité nominale de traitement, la production de boue est inférieure au dimensionnement et le temps de séjour de celles-ci en digestion se retrouve donc supérieur. Ce calcul lisse les variations observées au niveau des saisons (été/hiver) sur certaines stations.

### 5.3. 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.

	<b>réduction MES (%)</b>	<b>réduction MVS (%)</b>
<b>Min</b>	21	29
<b>Max</b>	52	67
<b>Moyenne</b>	41	50

Tableau 4 : réduction des teneurs en MES et MVS des boues par digestion (N=12)

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 les réductions en MVS se situe bien dans l'intervalle visé, ce qui montre un bon fonctionnement général des stations 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.

	<b>Rendement MS (%)</b>	<b>Rendement MV (%)</b>
<b>Min</b>	22	31
<b>Max</b>	56	67
<b>Moyenne</b>	42	53

Tableau 5 : réductions des teneurs en MS et MS obtenues sur la digestion des boues mixtes [7]

## 6. Performances

On s'intéresse maintenant aux performances de la digestion en termes de production de biogaz. On tentera également de mettre en évidence des facteurs pouvant influencer cette production.

### 6.1. Suivi de la production de biogaz

Les nombreuses informations demandées aux exploitants dans le questionnaire ont permis d'évaluer de différentes manières les performances atteintes par les stations sur leur production de biogaz. En moyenne annuelle, les productions sont de  $831 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MVS}} \text{ éliminée}$  (N=10) et  $436 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MVS}} \text{ introduite}$  (N=14). Le faible nombre de données disponibles s'explique par le croisement de plusieurs jeux de résultats utilisés pour les calculs et ayant été complétés de manière inégale dans le questionnaire. Il est tout de même intéressant de comparer ces valeurs avec celles obtenues par l'agence de l'eau en 2012. Sur le bassin RMC, il avait été trouvé des productions de  $840 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MV}} \text{ éliminée}$  et  $460 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MV}} \text{ introduite}$ . La tendance ne semble donc pas avoir évolué depuis.

Les productions de méthane ont également été évaluées en termes de  $\text{Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{T}_{\text{MES}} \text{ introduites}$  et par  $\text{T}_{\text{MES}} \text{ éliminées}$ , ainsi que par  $\text{Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{T}_{\text{MVS}} \text{ introduites}$  et par  $\text{T}_{\text{MVS}} \text{ éliminées}$ . 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. La comparaison est représentée sur la figure 11 ci-dessous.

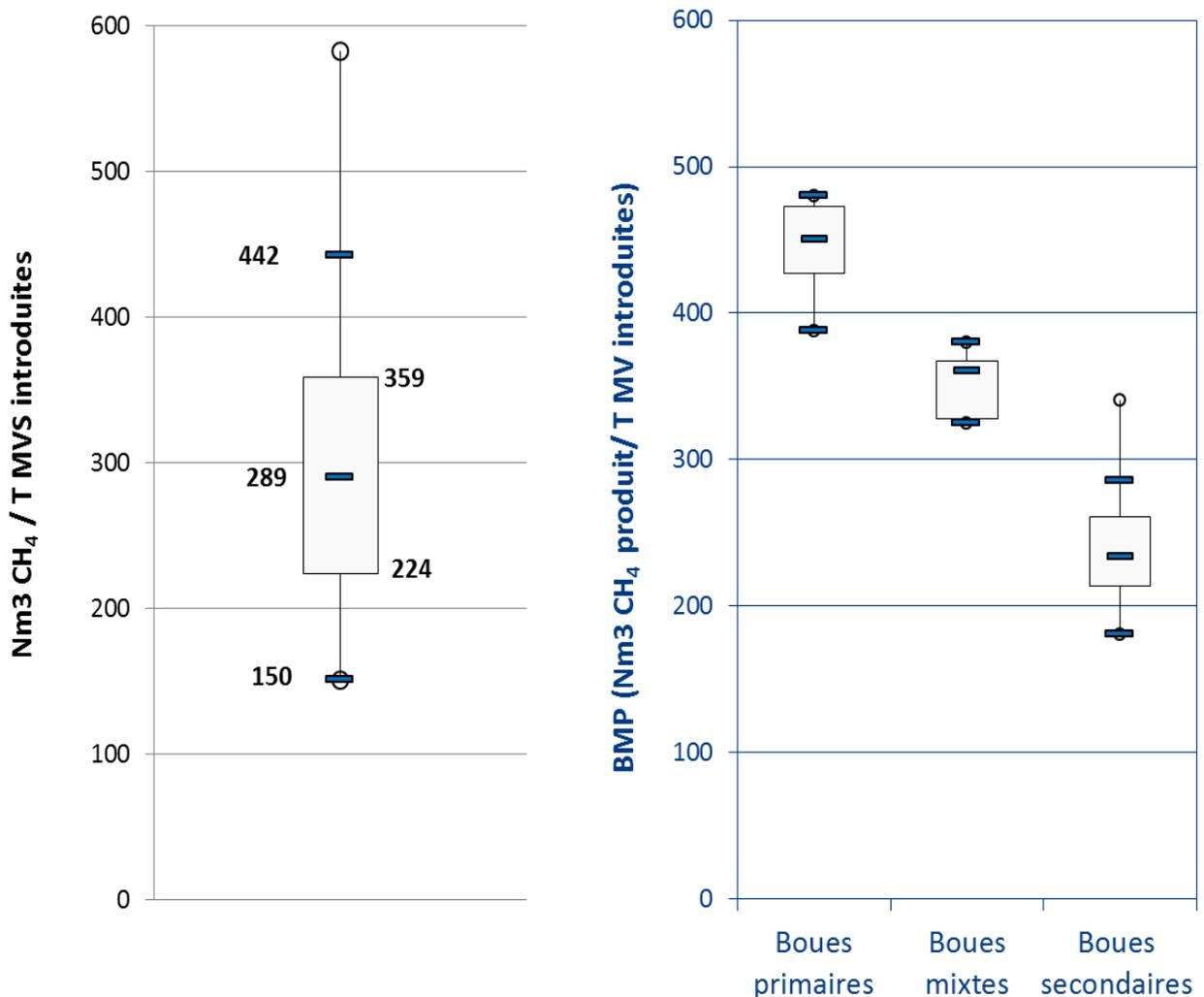


Figure 11 : comparaison entre les productions de biogaz observées et les tests de potentiels méthanogènes réalisés en laboratoire

Les résultats obtenus à partir des réponses des exploitants (figure de gauche) relèvent tous du traitement de boues mixtes. On remarque premièrement une dispersion bien plus importante que pour les tests BMP. Les conditions en stations 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. On note également que la médiane des résultats en station 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 un 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.

## 6.2. Influence du type de filière eau

Différents tests ont été menés à partir des productions de biogaz des stations pour tenter de les relier à certains paramètres ou modes de fonctionnement. Les seules relations ayant pu être mises en évidence concernent le type de filière eau utilisée par la station (voir figure 12).

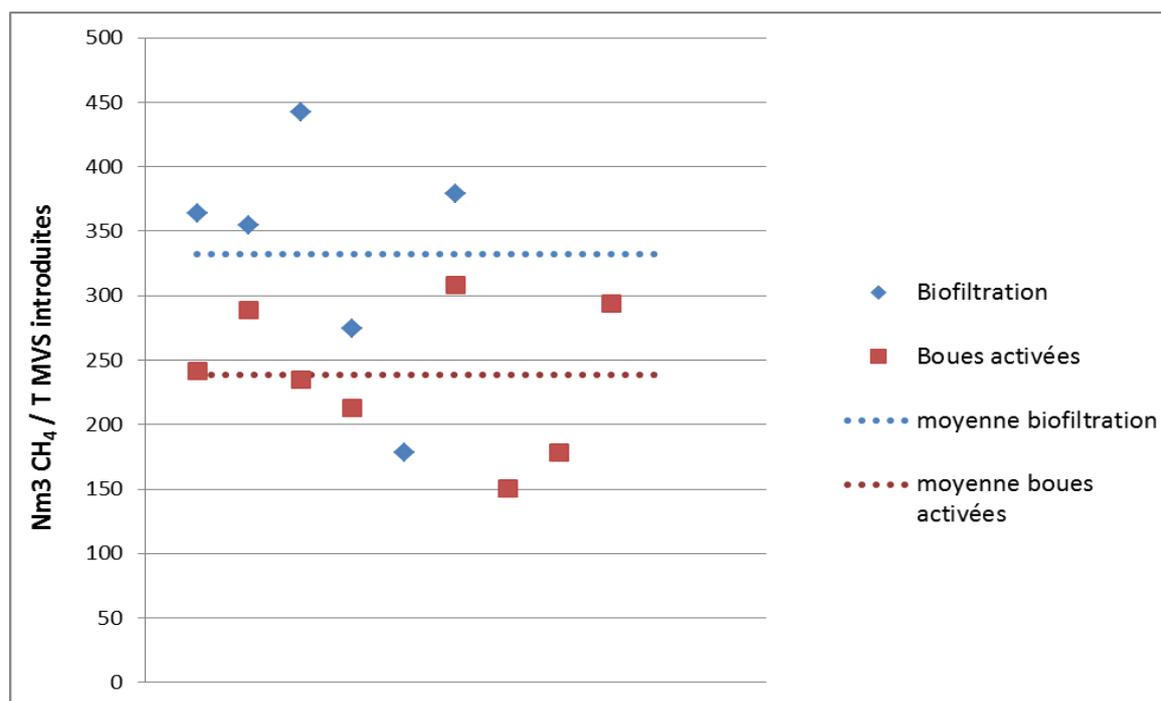


Figure 12 : influence du type de filière eau sur la production de bio-méthane

On observe sur ce graphe une nette différence entre les productions de biogaz des stations équipées de boues activées et celles équipées de biofiltres. Les boues issues de biofiltres ont des résultats supérieurs en moyenne à celles des filières boues activées. C'est un résultat logique puisque les boues de biofiltres sont plus organiques (il s'agit généralement de boues mixtes).

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.

## 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 évoluées concernant la valorisation du biogaz produit.

Sur les 26 stations ayant renseigné cette partie du questionnaire, 15 valorisent leur biogaz à travers la cogénération ou l'injection thermique et 6 utilisent uniquement une valorisation thermique. Contrairement aux conclusions du rapport de 2012 [7] qui déplorait un faible intérêt pour la valorisation énergétique du biogaz, les collectivités semblent aujourd'hui y accorder plus d'importance. Une tentative de mise en évidence de l'évolution de ces mentalités a été réalisée en distinguant les stations suivant l'année de construction de leur digesteur. Ces résultats, représentés dans le tableau 6, sont cependant à prendre avec précaution puisqu'ils ne permettent pas d'identifier les stations ayant modifié leurs pratiques après la construction de leur digesteur. Ils peuvent toutefois dégager une tendance générale.

Année de construction du digesteur	Thermique	Thermique + Cogénération	Thermique + injection réseau
Avant 2000	3/5	1/5	1/5 *
2000 – 2010	6/10	-	4/10 *
Après 2010	2/11	4/11	5/11

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

Tableau 6 : proportions de stations par point de valorisation du biogaz produit

Ce tableau montre que si les stations utilisant uniquement une valorisation thermique sont encore majoritaires dans le cas des digesteurs construits avant 2010, elles ne représentent plus que 18% des stations construites plus récemment. Les stations avec une filière digestion plus récente semblent donc privilégier des valorisations plus poussées, 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 10 sur notre échantillon à avoir opté pour cette valorisation aujourd'hui. Certains digesteurs ont pu être construits directement dans cet objectif mais on remarque également que des stations plus anciennes ont modifié leurs pratiques pour se lancer dans cette nouvelle voie de valorisation. D'après un rapport GrDF [28], 7 stations d'épuration injectaient leur biométhane sur le réseau français au 31 décembre 2017 et 6 nouveaux sites étaient attendus pour l'année 2018. Le rapport indique également l'existence de 35 dossiers d'injection de biométhane pour les stations d'épuration à un niveau d'étude détaillé. Le développement de cette pratique semble donc établi et de nombreux projets devraient voir le jour dans le futur.

L'analyse des différents résultats s'est également concentrée sur la proportion du gaz produit utilisé pour les différents types de valorisation. L'étude de ces données concernant l'injection en particulier donne des résultats intéressants présentés dans le tableau 7.

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

Tableau 7 : 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. Néanmoins, il apparaît que les stations plus récentes consacrent une proportion de biogaz plus importante à l'injection pouvant aller jusqu'à 93.5% du biogaz produit, le gaz non injecté étant utilisé pour chauffer le digesteur ou torché car non conforme aux exigences de GrDF. 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, l'épuration du biométhane avant injection est réalisée par un traitement par charbon actif permettant de supprimer l'humidité et l'H<sub>2</sub>S du biogaz suivi d'une séparation membranaire. Cette succession de techniques permet de passer d'un biogaz contenant en moyenne 60% de méthane à un gaz épuré en contenant plus de 97%.

## 8. Qualité et devenir des boues

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 envoyées dans différentes filières possibles présentées dans la bibliographie (I.4.2). Les résultats pour les stations étudiées sont représentés sur la figure 13.

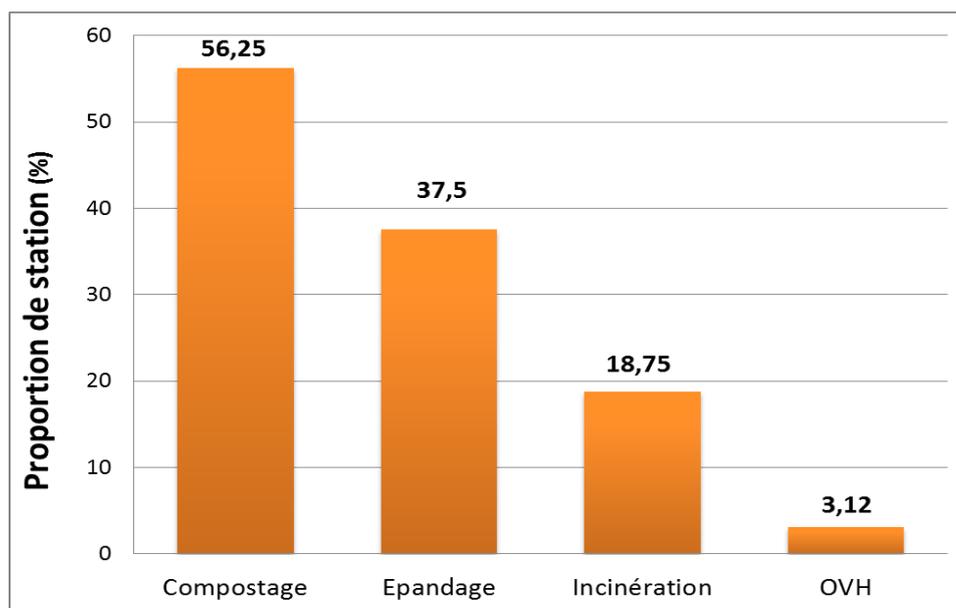


Figure 13 : devenir des boues déshydratées

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, 81% 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, 33% des stations concernées indiquent le réaliser au titre de la législation ICPE et 27% 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 centrats

La caractérisation des retours en tête de station des centrats de déshydratation des boues digérées est peu suivie 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 centrats généré est généralement inconnu, seules 7 stations ont pu le renseigner. Les résultats analytiques moyens des centrats sont également peu connus. Les paramètres les plus suivis sont les concentrations en MES (12 réponses), en  $N-NH_4^+$  (7 réponses) et en  $P-PO_4$  (6 réponses).

Au vu des résultats des analyses disponibles, de fortes concentrations en azote et en phosphore sont mesurées au niveau des centrats comme annoncé en bibliographie. Les exploitants sont nombreux à évoquer la forte charge en ammonium comme impactant le fonctionnement de leur station. Les retours des centrats 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 dans les centrats pour aider au traitement du phosphore. Malgré cela, deux stations observent un abattement insuffisant de l'azote et donc des dépassements des seuils de rejet sur le NTK (somme de l'azote organique et ammoniacal). Concernant les filières boues activées, deux 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. Enfin, deux stations relèvent des problèmes de précipitation de struvite bouchant les canalisations des retours en tête.

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 dès l'origine 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. De manière générale, les stations disposent actuellement d'une marge pour traiter des retours en tête chargés en azote et en phosphore puisque l'on a vu que leur taux de charge effectif se situait en moyenne à 50%.

## 10. Retours d'expériences des exploitants

Cette partie constitue une synthèse du retour d'expérience sous forme de commentaires libres renseignés par les exploitants 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 stations soulignent l'importance d'un suivi analytique pour prévenir les problèmes 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, % CH<sub>4</sub>, 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 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 bon suivi analytique 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, le problème le plus courant semble être le bouchage par des filasses rapporté par 5 stations. Cependant il est intéressant de noter que 3 de ces stations n'indiquent pas être équipées d'un broyeur ou tamis qui sont justement recommandés pour limiter ce phénomène. Une station indique également des problèmes de moussage en surface du réacteur.

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 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 volumétrique 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 et 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.

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 stations (détection visuelle ou mesure d'une montée en pression). Elles 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 AGV sont surveillés 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.

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

### III. Synthèse de l'étude

Ce document avait pour but de réaliser un panorama de la situation actuelle en France concernant la digestion anaérobie des boues de stations d'épuration. Cette dernière section va présenter une synthèse des différents résultats obtenus afin de mettre en lumière les pratiques majoritaires ainsi que les problèmes rencontrés.

Au total, 34 stations d'épuration auront participé par leurs retours à cette enquête nationale. Ces stations présentent des capacités nominales comprises entre 16 000 et 1 865 000 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 biofiltrations ainsi que quelques systèmes à culture fixée fluidisée. Il a été montré que les stations équipées de biofiltres arrivaient à de meilleures performances en termes de production de biométhane que les stations à boues activées du fait d'une production de boues plus organiques.

Les substrats injectés en digestion sont majoritairement composés de boues mixtes (mélange de boues primaires et secondaires) 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 secondaires 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 filasse. L'agitation du digesteur est réalisée soit par recirculation du biogaz (technique privilégiée par le constructeur Dégremont), soit par un brassage mécanique (privilégié par OTV).

La digestion permet d'atteindre en moyenne une réduction de 50% du taux de MVS ce qui correspond à l'objectif visé pour ce type de procédé, 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  $800 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MV éliminée}}$  et  $450 \text{ Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{T}_{\text{MV introduite}}$ ).

La valorisation du biogaz produit est réalisée en premier lieu pour le chauffage du digesteur mais on voit se développer de plus en plus les 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 si les stations n'ont pas été dimensionnées pour gérer cette surcharge et si elles sont soumises à des contraintes élevées concernant l'azote. Les caractéristiques de ces concentrats restent cependant peu suivies et la surcharge 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 concentrats. Certaines normes de qualité du gaz ou des boues 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

Ce rapport s'inscrit dans le cadre d'un regain d'intérêt pour la digestion des boues d'épuration. En effet, les valorisations possibles du biogaz produit sont de plus en plus encouragées dans la dynamique écologique actuelle. La dernière évolution importante a eu lieu en 2014, quand le biométhane produit à partir de boues d'épuration a été autorisé à être injecté dans le réseau. Il semblait donc intéressant de réaliser un état des lieux des pratiques existantes afin d'aider les collectivités désirant implanter une unité de digestion sur leur site.

La première partie a apporté des éléments bibliographiques sur tous les paramètres liés aux différentes étapes en entrée, en sortie et au cœur du procédé. 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 techniques aux exploitants de station d'épuration. Les pratiques majoritaires ont pu ainsi être mises en évidence et les principaux problèmes rencontrés ont été identifiés. La dernière section a enfin permis de synthétiser les principales observations réalisées.

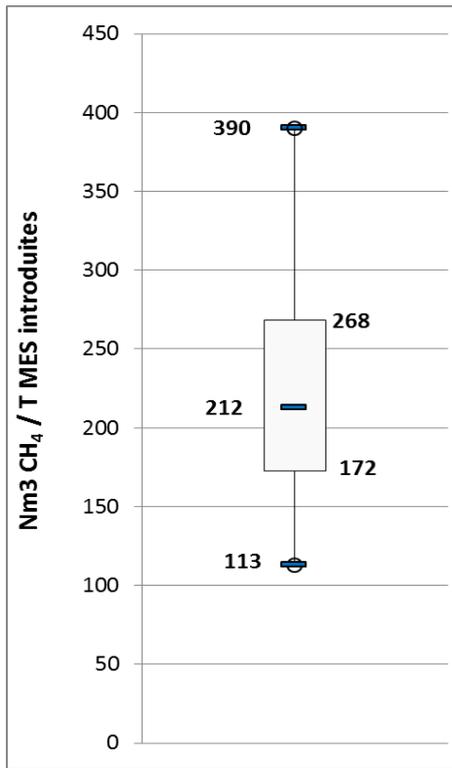
La digestion anaérobie des boues de station d'épuration tend effectivement à se développer avec un nombre croissant de digesteurs en projet. Les voies de valorisation du biogaz ne concernent désormais plus uniquement le thermique et se diversifient avec la cogénération et l'injection dans le réseau. Il est certain que cette technique occupe une place importante dans l'avenir des stations d'épurations qui seront bientôt conçues pour valoriser au maximum nos déchets en plus de les traiter.

## Bibliographie

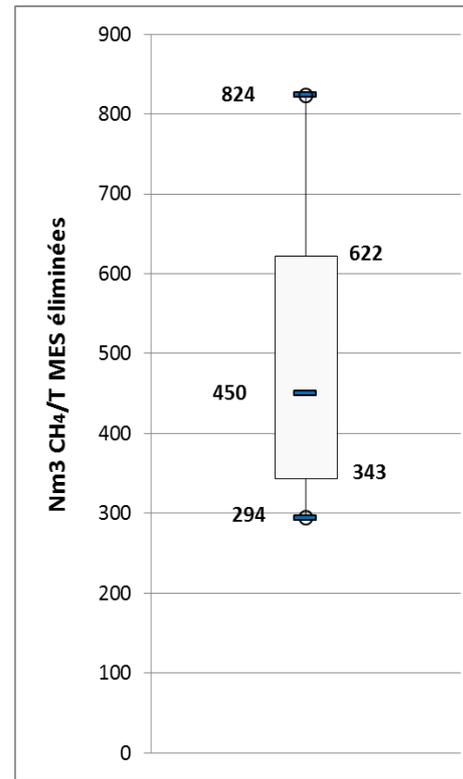
- [1] « IRSTEA », *Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation*. [En ligne]. Disponible sur: [//www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid49674/irstea.html](http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid49674/irstea.html). [Consulté le: 05-juin-2019].
- [2] « Présentation | Irstea ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.irstea.fr/fr/irstea/presentation>. [Consulté le: 05-juin-2019].
- [3] « REVERSAAL | Irstea ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.irstea.fr/fr/la-recherche/unites-de-recherche/valorisation-traitement-effluents-urbains>. [Consulté le: 05-juin-2019].
- [4] R. Moletta, *La Méthanisation*, 3e édition. Lavoisier, 2015.
- [5] 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](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr). [Consulté le: 07-juin-2019].
- [6] *Arrêté du 23 novembre 2011 fixant la nature des intrants dans la production de biométhane pour l'injection dans les réseaux de gaz naturel*. .
- [7] 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](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].
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] « 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].
- [12] « 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].
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] Thi Thanh Ha Pham, « Prétraitements des boues d'épuration pour accroître la biodégradabilité et éliminer simultanément les perturbateurs endocriniens », Université du Québec, 2010.
- [18] 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].
- [19] Véolia Water Technologies, « Les procédés d'hydrolyse thermique ». .
- [20] « Exelys<sup>TM</sup> », *Veolia*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.veoliawatertechnologies.com/fr/produits/exelys>. [Consulté le: 13-juin-2019].
- [21] 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.
- [22] « 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].
- [23] « Modélisation des processus biochimiques de la méthanisation | Energies Renouvelables et Environnement ». [En ligne]. Disponible sur: <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2015/modelisation-des-processus-biochimiques-de-la-methanisation>. [Consulté le: 13-juin-2019].
- [24] *Arrêté du 19 mai 2011 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz*. .
- [25] « Epuration et injection de biométhane | Injection Biométhane ». .
- [26] N. Jeanmaire et G. Chipier, « Traitement de l'azote : nouveaux procédés et retour d'expérience », *Environnement et Technique*, n° 308, juill. 2011.
- [27] « Carte des unités de méthanisation et de biogaz ». [En ligne]. Disponible sur: <https://carto.sinoe.org/carto/methanisation/flash/#>. [Consulté le: 06-juin-2019].
- [28] L. AUBEUT-CHOJNACKI, « Biométhane - Stations d'épuration, Retours d'expérience injection GRDF », déc. 2017.

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

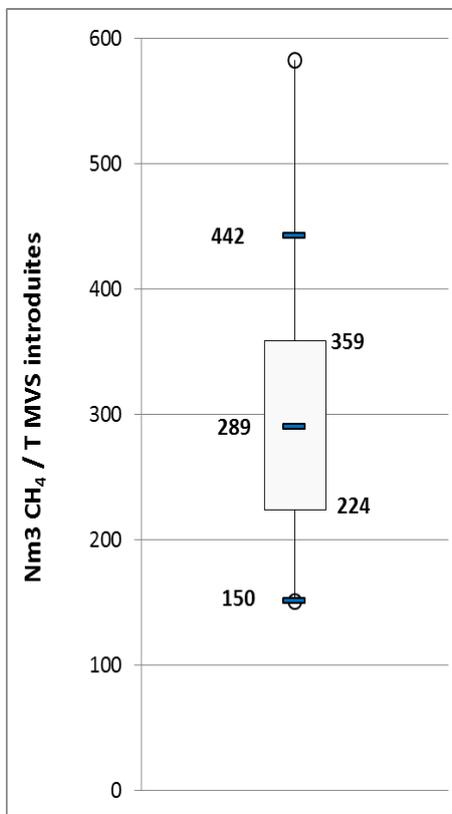


(a)

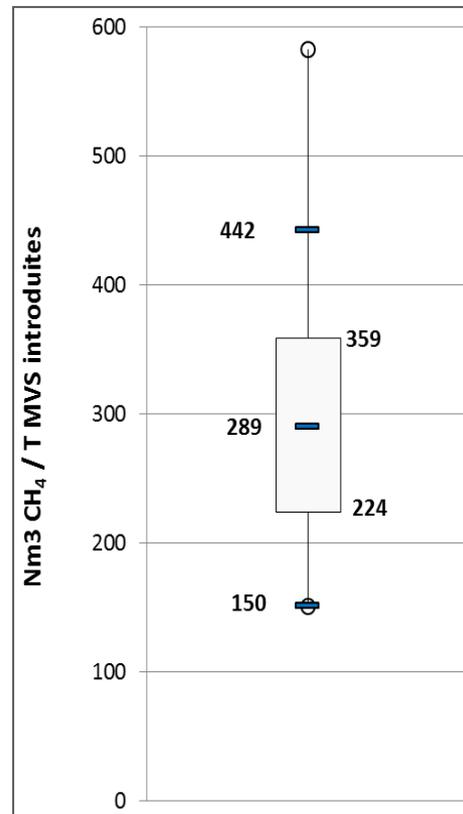


(b)

Production de CH<sub>4</sub> par tonnes de MES introduites (a) et par tonnes de MES éliminées (b)



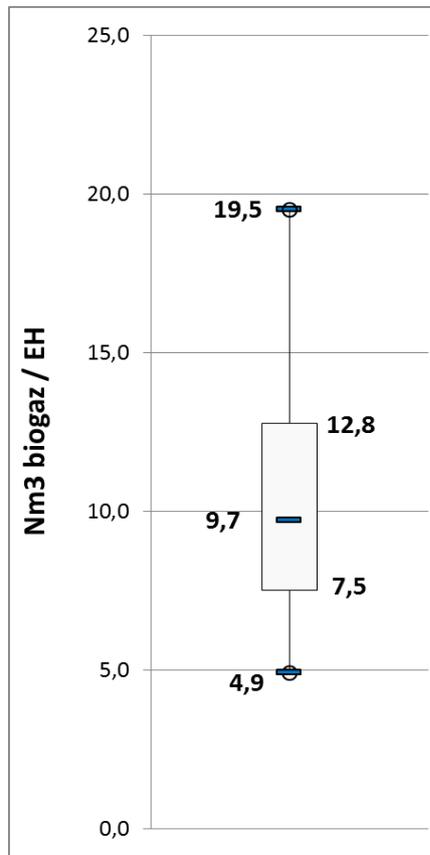
(c)



(d)

Production de CH<sub>4</sub> par tonnes de MVS introduites (c) et par tonnes de MVS éliminées (d)

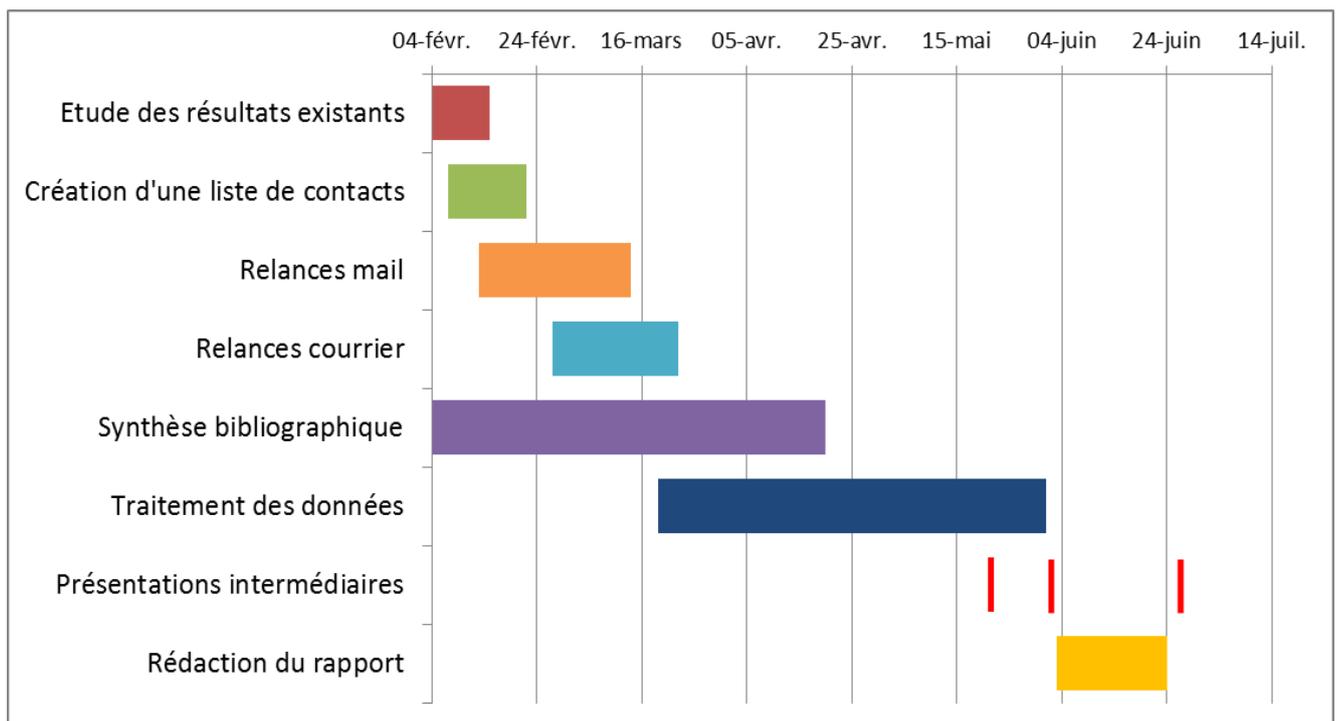
Annexe III : représentation statistique de type boîte à moustaches de la production de biogaz calculée en Nm<sup>3</sup>/EH



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

	MES (g/L)	MVS (%)
<b>Min</b>	23,8	54
<b>Max</b>	42,8	70
<b>Moyenne</b>	29,0	63
<b>Nb réponses</b>	14	11

Annexe V : planning réalisé



## 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. Ce biogaz 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 et doit permettre de réaliser un état des lieux des pratiques actuelles en France concernant la digestion des boues.

Une synthèse bibliographique a tout d'abord présenté 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.