



Etude de l'impact de la digestion anaérobie sur les performances épurationnelles d'une STEU

Rapport final

Reverdy Anne-Laure (Irstea)

Baudez Jean-Christophe (Irstea)

Dieudé-Fauvel Emilie (Irstea)

Février 2013

- **AUTEURS**

Anne-Laure REVERDY, Ingénieur d'études (Irstea), anne-laure.reverdy@irstea.fr

Baudez Jean-Christophe, Chargé de recherche (Irstea), jean-christophe.baudez@irstea.fr

Dieudé-Fauvel Emilie, Ingénieur de recherche (Irstea), emilie.dieude-fauvel@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

Stéphane GARNAUD, Chargé de mission "Eau et assainissement", puis **Céline LACOUR**, Chargée de mission "l'Eau et les aménagements urbains", celine.lacour@onema.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : France

Niveau de lecture : professionnels, experts

- **RESUME**

L'étude de la qualité environnementale des stations de traitement des eaux usées (STEU) se limite bien trop souvent à la qualité de l'eau traitée et rejetée dans le milieu récepteur. Le but est alors d'obtenir une eau de la meilleure qualité possible en respectant les contraintes réglementaires, sans forcément se préoccuper de l'impact, en termes de qualité environnementale, du devenir des sous-produits, notamment des boues, qui peuvent également générer des pollutions et des coûts de gestion. Les stations de traitement des eaux usées ne peuvent plus être simplement définies grâce à leurs performances épuratoires. Elles doivent s'intéresser aussi bien aux eaux traitées qu'aux sous-produits formés, comme les boues, d'autant plus que traitement des eaux et traitement des boues sont intimement liés par des retours en tête.

Cette étude est constituée de plusieurs parties. La première partie a pour but de définir ce que sont les performances d'une station de traitement des eaux usées, en termes de performances épuratoires et de performances environnementales, et de définir les différents postes du traitement des boues (épaississement, déshydratation, stabilisation, séchage) qui peuvent avoir un impact sur ces performances (via les retours en tête, les consommations énergétiques, les consommations en polymères).

La seconde partie référence les impacts potentiels de ces retours en tête (impacts quantitatifs et impacts qualitatifs).

Enfin, la dernière partie de ce rapport porte plus précisément sur l'étude des impacts de la digestion anaérobie sur les performances de la station. Pour cela, une analyse détaillée des données de la littérature scientifique est réalisée. En ce qui concerne ses performances, la méthanisation permet d'abattre de 56% les matières volatiles contenues dans les boues pour une production moyenne de 550m³ de CH₄ / tMV dégradée et une production moyenne d'énergie de 5 470 kWh/tMV dégradée.

En parallèle, la méthanisation des boues influence trois paramètres principaux sur les traitements ultérieurs : la déshydratabilité des boues, les consommations en polymères et les flux d'azote et de phosphore. Cependant, les impacts de la digestion anaérobie référencés dans la bibliographie sont variables d'un auteur à l'autre.

C'est pourquoi nous proposons des bases de réflexion à la mise en place d'un protocole expérimental afin de pouvoir étudier de façon approfondie les impacts de la digestion anaérobie des boues sur les performances environnementales de la station, et plus précisément sur les retours en tête (et donc sur la filière eau) et sur les traitements ultérieurs (déshydratation).

- **MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)**

Station de traitement des eaux usées

Performances

Digestion anaérobie

Impacts

Retours en tête

STUDY OF ANAEROBIC DIGESTION IMPACTS ON PURIFICATION PERFORMANCE OF WWTP

- **ABSTRACT**

Environmental quality of wastewater treatment plant (WWTP) is often reduced to the quality of discharged treated water. The main objective is to discharge water with the highest quality in accordance with the legislation, without necessarily worrying about the by-products and their impact on the environmental quality. Indeed, sludge may also induce pollution and management costs. Treatment plants wastewater cannot be simply defined by their (water) treatment performance. They must take into account both treated water and by-products, especially as water treatment and sludge treatment are closely related through return flows.

The first part of this study aims at defining what are the performances of a wastewater treatment plant in terms of treatment ability and environmental management, and to define which sludge treatment (thickening, dewatering, stabilization, drying) really impact the general performances of WWTP (with return flows, energy consumption, polymers consumption).

The second part focuses on potential impacts of these return flows (quantitative and qualitative impacts).

The last part of this report analyses anaerobic digestion impacts on the overall plant performance. A detailed literature review is made. Regarding performance, anaerobic digestion can decrease 56% volatile matter contained in the sludge to an average production of $550\text{m}^3 \text{CH}_4$ / TMV degraded and an average output power of 5470 kWh / TMV degraded.

In parallel, anaerobic digestion influences three main parameters: sludge dewaterability, polymers consumptions and nitrogen and phosphorus flows. However, anaerobic digestion impacts which are referenced in the literature vary from one author to another.

This is why we propose the basis of an experimental protocol in order to analyze impacts of anaerobic digestion on WWTP environmental performance, and more specifically on return flows and subsequent treatments (dewatering).

- **KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)**

Wastewater treatment plant

Performance

Anaerobic digestion

Impact

Return flows

- **SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE**

L'étude de la qualité environnementale des stations de traitement des eaux usées (STEU) se limite encore aujourd'hui à la qualité de l'eau traitée rejetée dans le milieu récepteur. Le but est alors d'obtenir une eau de la meilleure qualité possible en respectant les contraintes réglementaires, sans forcément se préoccuper de l'impact, en termes de qualité environnementale, du devenir des sous-produits, notamment les boues, qui peuvent également générer des pollutions et des coûts de gestion. En effet, d'un point de vue réglementaire, les performances de traitement d'une station sont définies dans les articles 14 et 15 de l'arrêté du 22 juin 2007 relatif à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées. Les performances épuration d'une station de traitement des eaux usées sont fixées en concentrations maximales en sortie de STEU ou en rendement minimal calculé en faisant le rapport entre la pollution sortante et la pollution entrante dans la station. Elles sont également variables en fonction de la charge brute de pollution organique traitée par la station et de la sensibilité de la zone.

Cependant, les stations de traitement des eaux usées ne peuvent plus être simplement définies grâce à leurs performances épuration mais doivent tenir compte des performances environnementales (consommations énergétiques, consommations en polymères, impacts du traitement et de l'évacuation des boues, impacts des retours en tête de la filière boue vers la filière eau). Elles doivent s'intéresser aussi bien aux eaux traitées qu'aux sous-produits formés, comme les boues, d'autant plus que traitement des eaux et traitement des boues sont intimement liés par des retours en tête.

Cette étude, qui a débuté en 2012 et doit se poursuivre jusqu'en 2015, a pour objectif de s'intéresser aux performances environnementales des stations de traitement des eaux usées, notamment au travers :

- de l'étude de l'impact des retours en tête sur la filière eau,
- de l'étude des consommations énergétiques et en polymères sur la filière boue.

Le premier rapport de cette étude a pour objet :

- (i). de définir ce que sont les performances épuration et environnementales d'une STEU et d'identifier les différentes filières de traitement des boues qui peuvent avoir un impact sur ces performances environnementales.
- (ii). d'identifier les étapes du traitement des boues qui peuvent impacter la filière eau au travers des retours en tête
- (iii). d'étudier plus précisément les impacts de la digestion anaérobie sur les performances de la station, notamment sur les retours en tête et les consommations énergétiques et en polymères sur les traitements ultérieurs. Pour se faire, une première analyse des données existantes dans la littérature est réalisée ; puis dans un second temps, un projet de protocole de terrain est dressé afin de pouvoir étudier les performances environnementales réelles des stations de traitement des eaux usées équipées de méthaniseurs pour le traitement de leurs boues.

Différents postes de traitement et de valorisation des boues ont un impact sur la filière eau notamment au travers des retours en tête : procédés d'épaississement, de déshydratation, de stabilisation (digestion aérobie, anaérobie, chaulage compostage) ou encore de séchage des boues.

Après traitement, les boues suivent différentes voies d'élimination. Les voies majoritairement représentées en France sont l'épandage, l'incinération spécifique, la co-incinération et plus rarement la mise en décharge. Parmi ces 4 techniques, seule l'incinération spécifique peut présenter des impacts sur les performances épuration de la station en raison de retours en tête du lavage des fumées. Des procédés plus rarement utilisés comme l'oxydation par voie humide ou la pyrolyse peuvent également générer des impacts via les retours en tête.

Les retours en tête générés par les postes de traitement, de valorisation ou encore d'élimination des boues sont responsables d'impacts sur la filière eau : on distingue alors les impacts quantitatifs et qualitatifs. La caractérisation des impacts quantitatifs peut être réalisée de façon assez précise et une équation générale peut être établie jusqu'aux étapes de déshydratation.

$$E_f = E_0 \cdot [X_1 + X_2(1-X_1) + X_3(1-X_2)(1-X_1)] \cdot [1-X_E \cdot X_D - X_E X_{sta1} + X_E X_{sta1} \cdot X_D]$$

E_f	Charge de pollution dans les retours en tête (kg/j)
E_0	Charge de pollution dans les effluents (kg/j)
X_1	Rendement d'élimination du polluant dans le traitement primaire des eaux
X_2	Rendement d'élimination du polluant dans le traitement secondaire des eaux
X_3	Rendement d'élimination du polluant dans le traitement tertiaire des eaux
X_E	Rendement de capture du polluant en épaissement
X_D	Rendement de capture du polluant en déshydratation
X_{sta1}	Facteur de modification du polluant en stabilisation (digestion anaérobie et digestion aérobie)

Toutefois, l'application de cette équation nécessite de disposer de données sur les rendements d'élimination de la pollution à chaque étape et pour chaque paramètre de pollution.

La bibliographie est relativement pauvre en ce qui concerne les impacts qualitatifs des retours en tête sur la station de traitement des eaux usées. Quelques impacts ont cependant été identifiés. Toutefois, la caractérisation de ces impacts qualitatifs est beaucoup plus complexe à mettre en évidence. En effet, dès qu'un dysfonctionnement apparaîtra dans la station, les retours en tête constitueront un moyen privilégié de transmettre ce dysfonctionnement, de l'entretenir et de l'amplifier.

Le procédé de digestion anaérobie a été plus particulièrement étudié afin d'identifier si elle présente un réel avantage au sein d'une STEU en prenant en compte l'ensemble des impacts potentiels.

Est-ce que les gains énergétiques apportés par la valorisation du biogaz et la réduction des quantités de boues sont réellement significatif ? Est-ce que les boues digérées sont plus faciles à déshydrater et à chauler ? Est-ce que cela conduit à une surconsommation énergétique afin de traiter dans la filière eaux les flux de matières polluantes issus des retours en tête ?

Dans le cas des retours en tête issus d'une digestion anaérobie des boues, ceux-ci ne proviennent pas directement du digesteur en tant que tel mais du système « Digestion anaérobie / Déshydratation » car ce sont les effluents issus de la digestion qui vont être renvoyés en tête de station.

Données de la bibliographie

Performances de la méthanisation :

En ce qui concerne les performances de la méthanisation des boues, elle permet d'abattre 56% en moyenne des matières volatiles contenues dans les boues pour une production de CH_4 comprise entre 240 et 780 m^3 / tMV dégradée (en fonction des installations) avec une valeur moyenne à 550 m^3 de CH_4 / tMV dégradée. Ce CH_4 peut être valorisé en énergie thermique et/ou électrique. Cependant le bilan énergétique de la digestion anaérobie et les productions de chaleur et d'électricité sont directement dépendants de la production de CH_4 de la STEU et du rendement des appareils utilisés pour la production d'énergie. En moyenne, on peut tout de même dire que la digestion anaérobie est à l'origine de la production de 5 470 kWh/tMV dégradée.

Une partie de cette énergie valorisée sera consommée pour :

- le chauffage des digesteurs, soit entre 35 et 40kWh / tonne de boues entrée en digestion,
- le brassage, le pompage et la circulation des boues. Ces consommations électriques varient de 50 à 200 kWh/tMS en fonction de la puissance de brassage, la concentration des boues et le temps de séjour

Il est donc difficile de réaliser un bilan global généralisable à toutes les installations de méthanisation quant aux consommations énergétiques et aux productions énergétiques. On peut cependant définir

« des grandes lignes » dans le cas de conditions usuelles (abattement de 40% des MS), la digestion consomme 5% de l'énergie produite, ou encore 16% de l'électricité co-générée (Solagro, 2001).

Impacts de la digestion anaérobie

La méthanisation est également responsables d'impacts sur les traitements ultérieurs. De nombreuses données sont référencées dans la bibliographie (Solagro, 2001). Cependant ces données sont difficiles à confirmer avec de vraies données scientifiques de recherches expérimentales (de laboratoire et de terrain).

Déshydratabilité : représente la capacité d'une boue à libérer son eau. Les études portant sur l'impact de la digestion anaérobie sur cette déshydratabilité ont des conclusions variables d'un auteur à l'autre. Certains auteurs indiquent que la digestion anaérobie augmente la déshydratabilité des boues (Rudolfs W. and Heukelekian H., 1934; Lawler *et al.*, 1986; Solagro, 2001), alors que d'autres présentent une déshydratabilité diminuée (Pearson E.L. and Buswell A.M., 1931; Bruus *et al.*, 1993; Houghton *et al.*, 2000) liée à une augmentation du relargage des exopolymères

Consommations en polymères : comme pour la déshydratabilité des boues, les avis portant sur les consommations en polymères sont partagés. Ainsi, deux problématiques peuvent être mises en évidence :

- ▶ La digestion anaérobie avant la déshydratation des boues modifie-t-elle les consommations en polymères pour le conditionnement des boues par rapport à des boues classiques (Est-ce que les consommations en polymères par tonne de MS sont modifiées ? Est-ce qu'en prenant en considération le fait que les quantités de MS sont diminuées, cela diminue les consommations totales en polymères ?) ?
- ▶ Est-ce que les gains apportés par la digestion anaérobie (réduction des quantités de boues, production énergétiques) sont suffisamment importants pour contrebalancer les éventuelles pertes notamment liées aux sur-consommations en polymères, le cas échéant ?

Impacts sur les flux d'azote et de phosphore : après déshydratation des boues, deux types de produits vont se former : le centrat (filtrat) et le digestat. Le centrat constitue un retour en tête de station et sera renvoyé dans la filière eau. Cependant, ce retour en tête issu de la digestion anaérobie est plus chargé en azote et en phosphore ce qui entraîne une augmentation de ces paramètres dans les eaux à traiter, ce qui peut s'avérer problématique dans les STEU soumises à des normes de rejets plus contraignantes vis-à-vis de l'azote et du phosphore.

Intérêt de la digestion anaérobie des boues

De façon globale l'intérêt de la digestion anaérobie des boues dépend des économies qu'elle apporte sur les étapes de traitements ultérieurs (déshydratation, chaulage, séchage...) et sur l'évacuation des boues (épandage, enfouissement, incinération). Ces économies sont variables en fonction de l'installation et sont à calculer au cas par cas. On peut cependant émettre des conclusions générales dans le cas de conditions usuelles (abattement de 40% de MS et siccité après déshydratation de 25%) : les économies alors générées varient entre 50 et 150€ / tMS initiale.

La taille de l'installation a également un impact sur les coûts. Il semblerait que les coûts du procédé chutent quand la taille de l'installation augmente (Solagro, 2001). Cependant, à partir de 500 000 EH, les coûts ne sont plus influencés par la taille de l'installation.

Il est à noter que le seuil minimal de faisabilité de la digestion anaérobie se situant auparavant entre 30 000 et 200 000 EH selon les destinations finales des boues, est aujourd'hui descendu à 10 000 EH compte tenu de l'augmentation des contraintes sur la gestion des boues (Solagro, 2001).

Comment évaluer les impacts de la digestion anaérobie sur les performances environnementale de la station pour compléter les données bibliographiques ?

Les études déjà menées apportent des conclusions généralistes assez poussées sur les performances, les coûts et le réel intérêt de la méthanisation. Cependant l'analyse de la littérature a permis de mettre en évidence plusieurs points :

► Les données accessibles traitant des impacts de la digestion anaérobie des boues sont relativement rares,

► Beaucoup de données sont contradictoires, notamment sur la déshydratation des boues et sur le fait que les boues sont plus facilement déshydratables après digestion, et qu'elles consomment plus ou moins de polymères.

Pour compléter ces données, il serait donc intéressant de réaliser un suivi de station de traitement des eaux usées en étudiant 2 STEU (une avec digesteur, l'autre sans) d'une capacité équivalente et 4 autres stations équipées d'un digesteur et de capacités variables ; le choix des stations se faisant aussi bien sur des critères techniques (capacité, traitements des eaux, des boues...), que sur la localisation géographique. En effet, afin d'appareiller les stations et de récupérer les données, une proximité géographique faciliterait la collecte des données ainsi que les coûts.

Cependant, il reste important de noter que ces données ne seront pas généralisables, car chaque installation de méthanisation est à étudier au cas par cas, elles sont toutes différentes en fonction des effluents entrants, de la filière de traitement des eaux, de la filière de traitement des boues, des graisses éventuellement ajoutées aux boues pour la digestion anaérobie. Néanmoins, cela permettrait d'avoir des données fiables à étudier.

Réflexions sur la mise en place d'un protocole expérimental sur les STEU

Le protocole présenté dans ce rapport n'est qu'une ébauche, il sera ajusté en fonction des conditions de terrain et des réflexions à venir. Il a en partie été mis en place à partir du guide méthodologique mis en place par l'ADEME pour le suivi d'une installation de méthanisation (ADEME, 2009).

Les paramètres suivis sur chaque installation sont répertoriées dans le tableau suivant.

UNITE FONCTIONNELLE	PARAMETRE	UNITE	MOYEN D'OBTENTION DE LA VALEUR	FREQUENCE DE RELEVÉ
UF1 : Réception et transformation des boues	Quantité boues	m ³ et tonnes	Pesons, débitmètre, protocole adapté	
	Composition boues	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
	Potentiel méthanogène	Nm ³ CH ₄ / tMO	Echantillon et analyse laboratoire	
UF2 : Digesteur	Quantité mélange entrant	m ³ et/ou tonnes	Pesons, débitmètre, protocole adapté	2 fois par an
	Composition biochimique du mélange	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
	Température	°C	Sonde de type thermocouple	Minimum 1 fois par jour
	pH	Unité pH	pHmètre	1 à 5 fois / semaine
	AGV	g/L eq. acide acétique	Echantillon et analyse laboratoire	1 à 3 fois / semaine
	Alcalinité	g/L eq HCO ₃ ⁻	Echantillon et analyse laboratoire	
	MS résiduelle	%MB	Echantillon et analyse laboratoire	
	MO résiduelle	%MB	Echantillon et analyse laboratoire	
	Débit de biogaz	Nm ³ / h	Débitmètre étalonné	En continu
	Teneur CH ₄ et CO ₂	%	Analyseur IR, tubes colorimétriques	Quotidien
	Teneur H ₂ S	ppm	Analyseur dédié, tubes colorimétriques	1 à 3 fois / semaine

UNITE FONCTIONNELLE	PARAMETRE	UNITE	MOYEN D'OBTENTION LA VALEUR DE	FREQUENCE RELEVÉ DE
UF3 : Valorisation de l'énergie	Fonctionnement général de l'installation	Selon paramètre		1 fois / semaine
	Energie électrique	kWh	Compteur électrique normalisé	1 à 7 fois par semaine
	Energie thermique	kWh	Compteur thermique normalisé	
UF4 : Valorisation du digestat	Quantité boues	m ³ et tonnes	Pesons, débitmètre, protocole adapté	Minimum 2 fois par an
	Composition	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
	Consommation en polymères			
	Consommations énergétiques			
UF5 : Fonctionnement général	Données météorologiques	°C, mm	Thermomètre, pluviomètre	Quotidien
	Temps de travail pour chaque opération	minutes	Montre/chronomètre	A chaque opération

En plus de l'étude de ces paramètres, l'analyse des retours en tête seront étudiés grâce aux suivis en MES, COT, DBO₅, NTK, PT et des consommations énergétiques au niveau du bassin d'aération.

Une prochaine étape va donc consister à mettre en place avec les stations de traitement des eaux usées un groupe de travail pour étudier les impacts de la digestion anaérobie sur les performances environnementales des STEU.

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Les performances d'une STEU.....	11
2.1 Les performances épuratoires	11
2.1.1 Rendements épuratoires.....	11
2.1.2 Performances assurant le bon fonctionnement d'une STEU	12
2.2 Les postes de la filière boue et des voies de valorisation ayant un impact sur les performances de la filière eau	13
2.2.1 Les postes de traitement des boues	13
2.2.1.1 Epaississement	13
2.2.1.2 Déshydratation	13
2.2.1.3 Stabilisation	13
2.2.1.4 Séchage.....	14
2.2.2 Elimination des boues	14
3. Définition des impacts des retours en tête	14
3.1 Impacts quantitatifs	15
3.1.1 Bibliographie	15
3.1.2 Equation générale	15
3.2 Impacts qualitatifs	17
4. Etude des impacts de la digestion anaérobie sur les performances de la station.....	19
4.1 Données de la bibliographie	19
4.1.1 Effet de la composition des boues sur les performances de la digestion	19
4.1.2 Réduction des quantités de boues.....	19
4.1.3 La production de biogaz.....	20
4.1.4 Bilans énergétiques.....	21
4.1.4.1 Production énergétique.....	21
4.1.4.2 Chauffage consommé par les digesteurs.....	22
4.1.4.3 Electricité consommée pour le fonctionnement du digesteur.....	22
4.1.4.4 Bilan production énergétique / consommation énergétique pour le digesteur	22
4.1.4.5 Bilan énergétique avec les traitements avals	23
4.1.4.6 Bilan énergétique « Digestion anaérobie + Séchage thermique »	24
4.1.4.7 Bilan énergétique « Digestion anaérobie + Incinération »	24
4.1.5 Incidences sur les traitements ultérieurs	25
4.1.5.1 Déshydratation	25
4.1.5.1.1 Déshydratabilité des boues	25
4.1.5.1.2 Consommation en polymères pour le conditionnement.....	25
4.1.5.2 Compostage.....	26

4.1.5.3	Séchage thermique.....	26
4.1.5.4	Chaulage	26
4.1.6	Impacts sur les flux d'azote et de phosphore.....	27
4.1.7	Notions de coûts	28
4.1.8	Faisabilité de la digestion	29
4.1.9	Conclusions sur l'analyse bibliographique	31
4.2	Comment évaluer les impacts de la digestion anaérobie sur les performances environnementale de la station pour compléter les données bibliographiques ?	31
4.2.1	Choix des stations de traitement des eaux usées	32
4.2.2	Réflexions sur la mise en place d'un protocole expérimental sur les STEU	33
4.2.2.1	Eléments de suivi par UF	35
4.2.2.1.1	UF1 – Réception et transformation des matières premières	35
4.2.2.1.2	UF2 – Digesteur	35
4.2.2.1.3	UF3 – Valorisation énergétique	35
4.2.2.1.4	UF4 – Valorisation du digestat.....	35
4.2.2.1.5	UF5 – Fonctionnement général	36
4.2.2.2	Paramètres à mesurer	36
4.2.2.2.1	Fonctionnement général de l'installation de méthanisation.....	36
4.2.2.2.2	Impacts sur les flux d'azote.....	37
4.2.2.2.3	Représentation schématique des postes à étudier	38
4.2.2.3	Mise en place d'indicateurs de suivi.....	40
4.2.2.3.1	Indicateurs biologiques.....	40
4.2.2.3.2	Indicateurs techniques.....	42
4.2.2.3.3	Indicateurs énergétiques	43
5.	Conclusion	46
6.	Sigles et abréviations	47
7.	Bibliographie	49
8.	Table des tableaux.....	50
9.	Table des figures.....	50

1. Introduction

L'étude de la qualité environnementale des stations de traitement des eaux usées (STEU) se limite bien trop souvent à la qualité de l'eau traitée et rejetée dans le milieu récepteur. Le but est alors d'obtenir une eau de la meilleure qualité possible en respectant les contraintes réglementaires, sans forcément se préoccuper de l'impact, en termes de qualité environnementale, du devenir des sous-produits, notamment les boues, qui peuvent également générer des pollutions et des coûts de gestion. Les stations de traitement des eaux usées ne peuvent plus être simplement définies grâce à leurs performances épuratoires. Elles doivent s'intéresser aussi bien aux eaux traitées qu'aux sous-produits formés, comme les boues, d'autant plus que traitement des eaux et traitement des boues sont intimement liés par des retours en tête.

Les boues, avant d'être évacuées de la STEU, subissent plusieurs traitements qui consomment de l'énergie, des substances chimiques et qui engendrent des retours en tête. Ces retours en tête sont constitués de l'eau et des substances polluantes dissoutes qui sont récupérées à la suite des opérations de séparation liquide-solide ou de nettoyage. Ces retours en tête sont ensuite envoyés dans la filière eau, où ils seront traités en même temps que les eaux usées provenant du réseau d'assainissement.

Ainsi, lors de l'étude d'une STEU, il est important de ne plus considérer uniquement les « performances épuratoires » liées uniquement au traitement des eaux usées, mais de s'intéresser de façon globale aux « performances environnementales » en prenant en considération le traitement des boues et ces retours en tête. Ceci permettra alors d'avoir une vision la plus large possible du fonctionnement de la STEU et un impact le plus faible possible sur l'environnement.

L'objectif de cette étude vise à identifier dans un premier temps les différents types d'impacts sur le fonctionnement de la STEU. Puis, dans une deuxième partie, les différents postes du traitement des boues qui ont un impact sur les performances environnementales de la station via les retours en tête sont référencés. Enfin dans une dernière partie, le rapport étudie plus particulièrement les impacts de la digestion anaérobie sur les performances de la station, notamment sur les retours en tête et les consommations énergétiques induites. Pour se faire, une première analyse des données existantes dans la littérature sera abordée ; puis dans un second temps, une ébauche de protocole de terrain sera dressée afin de pouvoir étudier les performances environnementales réelles des stations de traitement des eaux usées équipées de méthaniseurs pour le traitement de leurs boues.

2. Les performances d'une STEU

2.1 Les performances épuratoires

2.1.1 Rendements épuratoires

D'un point de vue réglementaire, les performances de traitement d'une station sont définies dans les articles 14 et 15 de l'arrêté du 22 juin 2007 relatif à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées.

Les performances épuratoires d'une station de traitement des eaux usées sont fixées (Tableau 1) :

- En concentrations maximales en sortie de STEU,
- En rendement minimal calculé en faisant le rapport entre la pollution sortante et la pollution entrante dans la station ; il définit donc le pourcentage d'abattement des différents paramètres de pollution et donc les performances de la station.

Ces performances sont variables en fonction :

- De la charge brute de pollution organique traitée par la station (Tableau 2) :
 - ≤ 120 kg DBO5 / j,
 - > 120 kg DBO5 / j.

- De la sensibilité de la zone (Tableau 3) :
 Zone normale,
 Zone sensible à l'azote et au phosphore.

Tableau 1 : Performances minimales des stations d'épuration des agglomérations devant traiter une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 120 kg / j de DBO5

PARAMETRES	CONCENTRATION A NE PAS DEPASSER	RENDEMENT MINIMUM A ATTEINDRE
DBO ₅	35 mg / L	60%
DCO		60%
MES		50%

Tableau 2 : Performances minimales des stations d'épuration des agglomérations devant traiter une charge brute de pollution organique supérieure à 120 kg / j de DBO5

PARAMETRES	CONCENTRATION A NE PAS DEPASSER	CHARGE BRUTE DE POLLUTION ORGANIQUE REÇUE (KG DBO5 / J)	RENDEMENT MINIMUM A ATTEINDRE
DBO ₅	25 mg / L	120 < - ≤ 600	70%
		> 600	80%
DCO	125 mg / L	Toutes charges	75%
MES	35 mg / L	Toutes charges	90%

Tableau 3 : Performances minimales des stations d'épuration des agglomération devant traiter une charge brute de pollution organique supérieure à 120 kg / j de DBO5 et localisé en zone sensible

REJET EN ZONE SENSIBLE A L'EUTROPHISATION	PARAMETRES	CHARGE BRUTE DE POLLUTION ORGANIQUE REÇUE (kg DBO5 / j)	CONCENTRATION A NE PAS DEPASSER	RENDEMENT MINIMUM A ATTEINDRE
Azote	NGL	600 < - ≤ 6 000	15 mg / L	70%
		> 6 000	10 mg / L	
Phosphore	Pt	600 < - ≤ 6 000	2 mg / L	80%

2.1.2 Performances assurant le bon fonctionnement d'une STEU

La définition réglementaire des performances épuratoires ne prend en considération que les impacts éventuels sur le milieu récepteur : les eaux traitées rejetées par la station doivent être de la meilleure qualité possible en respectant les contraintes réglementaires. Or, dans le contexte actuel, les stations d'épuration ne peuvent plus se contenter d'assurer des performances « épuratoires », elles doivent aussi assurer des « performances environnementales », c'est-à-dire avoir un impact le plus faible possible sur l'environnement, y compris en prenant en considération la filière boues.

De façon générale, les performances environnementales constituent un ensemble de facteurs caractérisant les impacts environnementaux d'un système d'assainissement. En plus des performances épuratoires, on prendra en compte :

- ▶ **Les consommations d'énergie** pour l'épuration, la fabrication des réactifs éventuels, le transport et le traitement des boues, l'entretien des installations,
- ▶ **Les nuisances olfactives et auditives,**
- ▶ **Les impacts environnementaux du traitement et de l'évacuation des boues,**
- ▶ **La quantité d'azote rejeté** dans l'environnement par les eaux épurées et aussi les boues (en kg NO_2^- / an / EH),
- ▶ **La quantité de substances tensio-actives rejetées** dans les cours d'eau (g / an / EH),
- ▶ **La valeur biologique en MO azotée** provenant des eaux vannes, transformée en NO_3^- au cours de l'épuration,
- ▶ **Le degré de perturbation du régime hydrique** du cours d'eau.

Dans cette étude il ne sera pas possible de travailler sur l'ensemble de ces paramètres. Ainsi, nous nous focaliserons uniquement sur les consommations énergétiques et les impacts environnementaux du traitement et de l'évacuation des boues.

2.2 Les postes de la filière boue et des voies de valorisation ayant un impact sur les performances de la filière eau

2.2.1 Les postes de traitement des boues

Les postes de traitement et de valorisation des boues référencés dans ce paragraphe ont un impact sur la filière eau au travers des retours en tête (directs et indirects).

2.2.1.1 Epaississement

L'épaississement des boues permet d'évacuer une partie de l'eau contenue dans les boues grâce à des procédés variés :

- ▶ Epaississement gravitaire,
- ▶ Flottation,
- ▶ Egouttage,
- ▶ Centrifugation.

Les boues une fois épaissies donnent une fraction solide (boues) et une fraction liquide (surnageant). Le surnageant est renvoyé en tête de station afin d'être traité dans la filière eau.

2.2.1.2 Déshydratation

La déshydratation augmente la concentration en matières sèches contenue dans les boues en éliminant mécaniquement une partie de l'eau :

- ▶ Centrifugation,
- ▶ Filtration (filtres à bandes, filtres presse),
- ▶ Lits de séchage plantés de roseaux.

Comme pour l'épaississement des boues le surnageant est renvoyé en tête de station.

2.2.1.3 Stabilisation

La stabilisation est une technique permettant de réduire la fermentescibilité des boues :

- ▶ Digestion aérobie,
- ▶ Digestion anaérobie,
- ▶ Chaulage,

► Compostage.

Pour les 3 premiers procédés (digestion aérobie, digestion anaérobie, chaulage) les impacts sur la station sont indirects car les retours en tête ne proviennent pas directement du procédé en tant que tel, mais du poste suivant (comme la déshydratation après digestion anaérobie).

Lors du compostage, les retours en tête ne sont générés que si la plate-forme de compostage est directement située sur la STEU. Ces retours seront alors formés par le lavage des aires de stockage du compost.

2.2.1.4 Séchage

Le séchage des boues est en général la dernière étape qui peut être rencontrée lors du traitement des boues. Elle permet d'évacuer l'eau contenue dans les boues afin d'obtenir des siccités importantes. Cette eau évaporée se retrouve sous forme de buée qui est envoyée dans une colonne de condensation. Les eaux de condensation et les condensats sont alors renvoyés en tête de station.

2.2.2 Elimination des boues

Après traitement, les boues suivent différentes voies d'élimination. Les voies majoritairement représentées en France sont l'épandage, l'incinération spécifique, la co-incinération et plus rarement la mise en décharge.

Parmi ces 4 techniques, seule l'incinération spécifique peut présenter des impacts sur les performances épuratoires de la station en raison de retours en tête du lavage des fumées.

Quelques autres procédés de traitement des boues sont faiblement représentés en France :

- Oxydation par Voie Humide (OVH),
- Pyrolyse,

Ces procédés ne seront pas étudiés mais ils sont décrits brièvement dans le paragraphe suivant.

L'OVH génère :

- Un gaz essentiellement composé de CO₂ et de vapeur d'eau,
 - Un liquide, la liqueur oxydée, contenant essentiellement des MES, des composés minéraux et organiques solubles et de l'ammoniaque. Cette liqueur doit ensuite être clarifiée par décantation puis déshydratée, sans conditionnement sur filtre presse.
- Ce sera donc le traitement de cette liqueur oxydée qui va créer des retours en tête pouvant avoir un impact sur les performances épuratoires de la station.

La pyrolyse est un procédé comparable à l'incinération. Les boues sont décomposées en défaut d'air par rapport à la stœchiométrie. De même que pour l'incinération, les impacts potentiels sur les performances épuratoires proviendront des retours en tête des lavages de fumées.

3. Définition des impacts des retours en tête

Les impacts des retours en tête du traitement des boues sur la station de traitement des eaux usées sont de deux natures : quantitatifs et qualitatifs.

La caractérisation des impacts quantitatifs peut être réalisée de façon assez précise alors que celle des impacts qualitatifs est beaucoup plus complexe à mettre en évidence car elle nécessite de combiner de multiples paramètres qui induiront chacun des conséquences particulières (Grulois *et al.*, 1993).

3.1 Impacts quantitatifs

3.1.1 Bibliographie

Dans la littérature, les évaluations quantitatives des retours en tête d'un certain nombre de procédés de traitement des boues sont référencées. Ces retours en tête sont exprimés par rapport au flux de l'effluent brut (Tableau 4).

Tableau 4 : Impacts quantitatifs des retours en tête de certains procédés de traitements des boues sur la station de traitement des eaux usées

	EPAISSISSEMENT GRAVITAIRE	FILTRE A BANDES	DIGESTION ANAEROBIE
	(Sadowsky A.G., 2002)	(Sadowsky A.G., 2002)	(Couturier C. <i>et al.</i> , 2001)
Débit (% débit EB)	nc	nc	6 à 10%
DBO ₅ (% DBO ₅ EB)	8 à 10%	10%	5 à 30%
MES (% MES EB)	4 à 6%	20%	2 à 17%
NTK (% NTK EB)	10%	5%	15 à 25%
N-NH ₄ ([NTK] EB)	0,8	nc	nc
Pt (% Pt EB)	0	2%	1 à 10%

EB = Effluents bruts

nc = Non communiqué

D'autres impacts quantitatifs ont été évalués sur 3 systèmes de traitement des boues (Tableau 5).

Tableau 5 : Impacts quantitatifs des retours en tête de 3 systèmes de traitement des boues sur la station de traitement des eaux usées

(GRULOIS ET AL., 1993)	EPAISSISSEMENT SEPRE DIGESTION FILTRE PRESSE	EPAISSISSEMENT SEPRE DIGESTION FILTRE A BANDES	EPAISSISSEMENT MIXTE DIGESTION FILTRE A BANDES
Débit (%)	6	10	9
DBO ₅ (%)	5	17	30
MES (%)	2	14	17
NTK (%)	15	17	25
Pt (%)	1	4	10

3.1.2 Equation générale

Les retours en tête peuvent être exprimés en fonction :

- de la charge de pollution entrante dans la station d'épuration,
- des filières de traitement des eaux
- des boues appliquées.

Les retours en tête peuvent donc être exprimés sous forme de bilan qui n'est valable qu'en supposant que la totalité des boues suit la même voie de traitement (Figure 1).

Équation 1 : $E_f = E_0 \cdot [X_1 + X_2(1-X_1) + X_3(1-X_2)(1-X_1)] \cdot [1-X_E \cdot X_D - X_E X_{sta1} + X_E X_{sta1} \cdot X_D]$

E_f	Charge de pollution dans les retours en tête (kg/j)
E_0	Charge de pollution dans les effluents (kg/j)
X_1	Rendement d'élimination du polluant dans le traitement primaire des eaux
X_2	Rendement d'élimination du polluant dans le traitement secondaire des eaux
X_3	Rendement d'élimination du polluant dans le traitement tertiaire des eaux
X_E	Rendement de capture du polluant en épaissement
X_D	Rendement de capture du polluant en déshydratation
X_{sta1}	Facteur de modification du polluant en stabilisation (digestion anaérobie et digestion aérobie)

Cette équation n'est valable que jusqu'aux étapes de déshydratation.

Pour pouvoir appliquer cette équation, il faut connaître les rendements d'élimination de la pollution à chaque étape, ce qui n'est pas toujours le cas. Des données existent, mais elles sont spécifiques d'une station à une autre, et il est difficile de trouver des données dans la bibliographie.

De plus cette équation prend en considération les paramètres de pollution, il faut donc connaître les rendements d'élimination pour chaque paramètre de pollution :

- DBO₅,
- MES,
- NTK,
- Pt

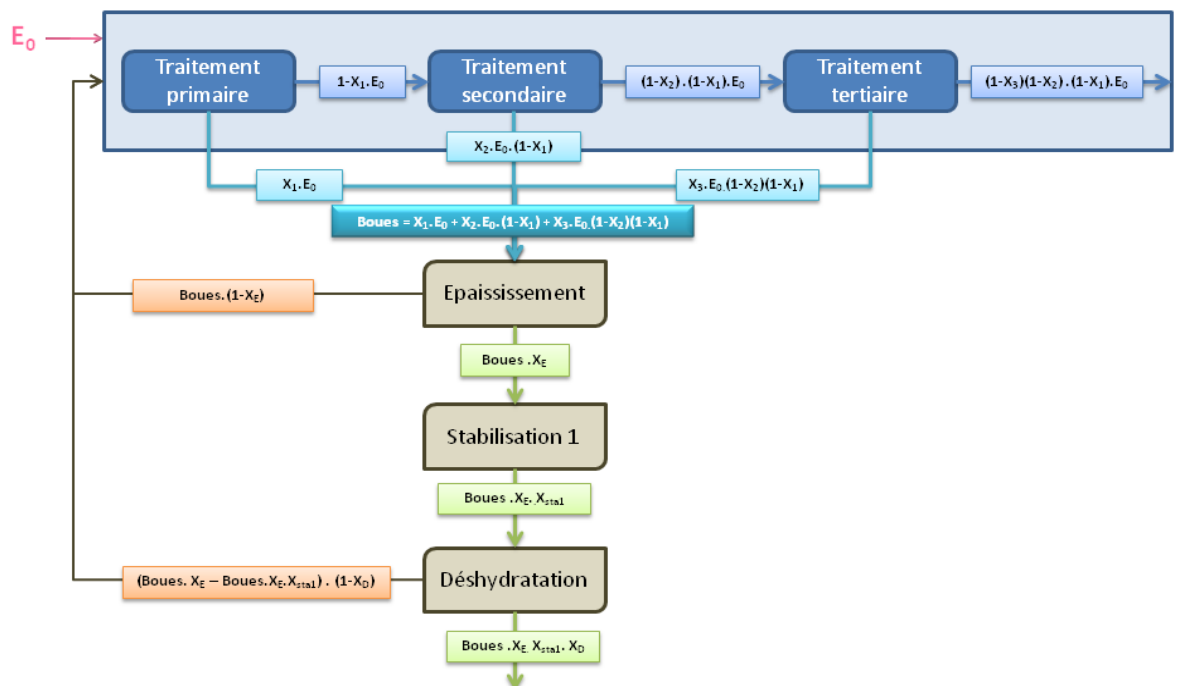


Figure 1 : Représentation schématique de l'équation générale des retours en tête

3.2 Impacts qualitatifs

La bibliographie est relativement pauvre en ce qui concerne les impacts qualitatifs des retours en tête sur la station de traitement des eaux usées. Quelques impacts ont cependant été identifiés :

- ▶ Les retours en tête des surnageants d'épaississeurs contribuent au développement de bactéries filamenteuses (GIS-BIOSTEP, 2005),
- ▶ La déshydratation par unités mobiles des boues liquides stockées sur la station génère des retours en tête très souvent chargés en ammoniacque et en sulfures (GIS-BIOSTEP, 2005),
- ▶ Les retours en tête de la déshydratation par LSPR sont généralement plus chargés en azote que ceux des procédés classiques et ces retours en tête nécessitent une surveillance accrue vis-à-vis du phosphore (Pronost J. *et al.*, 2002).
- ▶ Les retours en tête des centrifugeuses amènent une surcharge plus ou moins importante dans la ligne de traitement des eaux, selon la qualité de la déshydratation. Cette surcharge se traduira par un accroissement du débit de boues et de la consommation d'oxygène dans les bassins d'aération (et donc des surcoûts d'exploitation vis-à-vis de l'électricité et des réactifs) (Audibert J., 1998).
- ▶ Après la déshydratation du digestat de méthanisation, les retours en tête sont plus chargés en azote ammoniacal et en phosphore. Cette augmentation peut être contraignante dans le cas de stations situées en zones sensibles pour l'azote et le phosphore. En revanche sur une STEU assurant le traitement du phosphore par voie physico-chimique, ce problème n'est plus rencontré car la quasi-totalité du phosphore est précipité de façon stable dans les boues (Couturier C. *et al.*, 2001).
- ▶ Si la station n'a pas été dimensionnée de façon correcte, les retours en tête peuvent surcharger le bassin d'aération, ce qui entraîne une augmentation du débit de boues ainsi qu'une augmentation de la consommation en oxygène.
- ▶ Si les demandes en oxygène ne peuvent pas être assumées dans le bassin d'aération et dans le clarificateur, ces bassins rentreront en anaérobie.
- ▶ Une surcharge en boues dans le clarificateur peut également entraîner une diminution de la vitesse de décantation des boues dans le clarificateur et donc un départ de boues dans les effluents rejetés au milieu naturel.

Le problème de l'évaluation qualitative réside dans le fait que dès qu'un dysfonctionnement apparaîtra dans la station, les retours en tête constitueront un moyen privilégié de transmettre ce dysfonctionnement, de l'entretenir et de l'amplifier.

La Figure 2 donne une évolution en trois étapes, pour laquelle le passage d'une étape de propagation de dysfonctionnement à la suivante nécessite la boucle des retours en tête. A chaque étape une hiérarchie d'apparition des phénomènes est donnée par une numérotation. Les dégradations sont inscrites en colonne par rapport à chacun des ouvrages, avec des indices + ou – relatifs à l'importance des phénomènes (Grulois *et al.*, 1993).

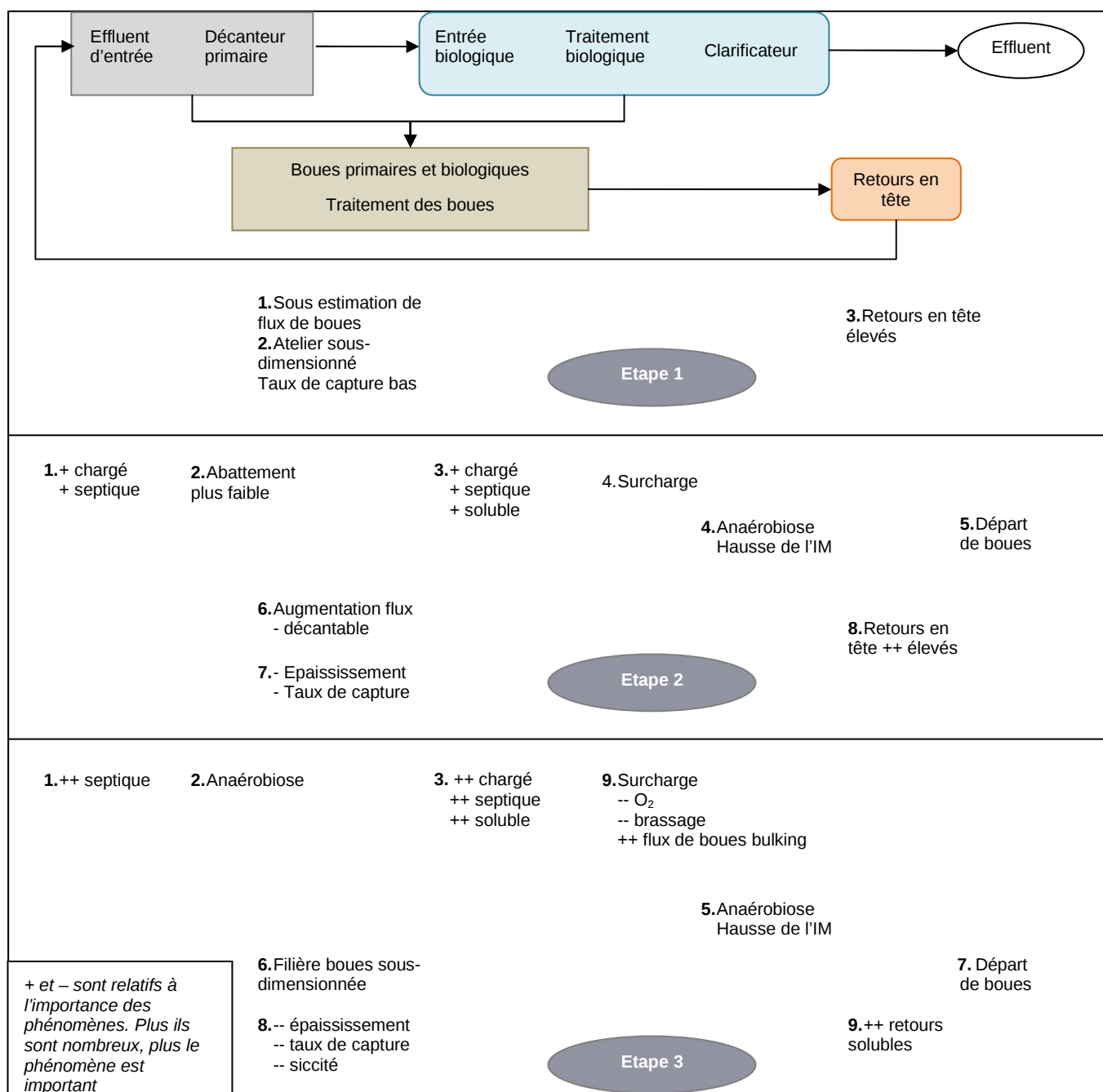


Figure 2 : Scénarios de dysfonctionnements dus aux retours en tête (Grulois et al., 1993)

Cependant, chaque procédé possède ses propres impacts vis-à-vis des performances de la station. Comme il a été dit précédemment, l'évaluation qualitative des impacts des retours en tête est difficile à évaluer, celle-ci doit être adaptée au cas par cas, en gardant à l'idée que chaque filière de traitement des boues est spécifique d'une installation, et donc que l'impact d'un procédé de traitement des boues va agir en même temps que l'impact d'un autre procédé de traitement des boues, ce qui en fait toute sa complexité.

4. Etude des impacts de la digestion anaérobie sur les performances de la station

On s'intéresse à la digestion anaérobie afin d'identifier si elle présente un réel avantage au sein d'une station de traitement des eaux usées en prenant en considération l'ensemble des impacts potentiels. Est-ce que les gains énergétiques apportés par la valorisation du biogaz et la réduction des quantités de boues sont réellement significatif ? Est-ce que les boues digérées sont plus faciles à déshydrater et à chauler ? Est-ce que cela conduit à une surconsommation énergétique afin de traiter dans la filière eaux les flux de matières polluantes issus des retours en tête ?

Pour ce faire des bilans « matière-énergie » sont nécessaires.

Dans le cas des retours en tête de la digestion anaérobie, ceux-ci ne sont pas directement issus du digesteur en tant que tel mais du système « Digestion anaérobie / Déshydratation » car ce sont les effluents issus de la déshydratation (après digestion) qui vont être renvoyés en tête de station.

On souhaite connaître l'impact de la digestion anaérobie sur les performances épuratoires de la station en termes de :

- ▶ Production de biogaz, d'électricité et de chaleur,
- ▶ Réduction des volumes,
- ▶ Incidences sur les traitements ultérieurs (déshydratation, séchage, chaulage),
- ▶ Impacts sur les flux d'azote et de phosphore au travers des retours en tête.

Ces paramètres ont déjà été étudiés, notamment par Solagro (2001).

4.1 Données de la bibliographie

4.1.1 Effet de la composition des boues sur les performances de la digestion

Il existe une corrélation entre la destruction des MV et la proportion de boues primaires dans le digesteur. Pour 100% de boues secondaires, un taux de destruction des MV de 35% est atteint. Pour 100% de boues primaires, ce taux de dégradation des MV est de 60% (Barber, 2005).

Cette corrélation entre les performances du digesteur et la destruction de MV est la seule qui peut être trouvée. Il semblerait qu'aucune corrélation ne soit significative entre les performances et le taux de charge organique ou le temps de rétention hydraulique (Barber, 2005).

4.1.2 Réduction des quantités de boues

De même, la réduction des quantités de boues est un paramètre bien connu de la méthanisation des boues. L'étude de Solagro (2001) portant sur 20 STEU réalisant la digestion anaérobie de boues mixtes (primaires et biologiques moyenne charge) a permis de conclure que la digestion anaérobie permettait d'abattre, en moyenne, de 56 % les matières volatiles et de 41% les matières sèches contenues dans des boues mixtes (Tableau 6 et Figure 3). Sur des boues d'aération prolongée ce taux d'abattement n'est plus que de 20%.

Ces taux d'abattelements portent sur les boues en sortie de digestion. Après déshydratation, le volume des boues se trouve réduit dans les mêmes proportions.

Tableau 6 : Abattement des matières volatiles et des matières sèches contenues dans les boues

	MINIMUM	MOYENNE	MAXIMUM
Abattement des MV	48%	56%	64%
Abattement des MS	36%	41%	48%

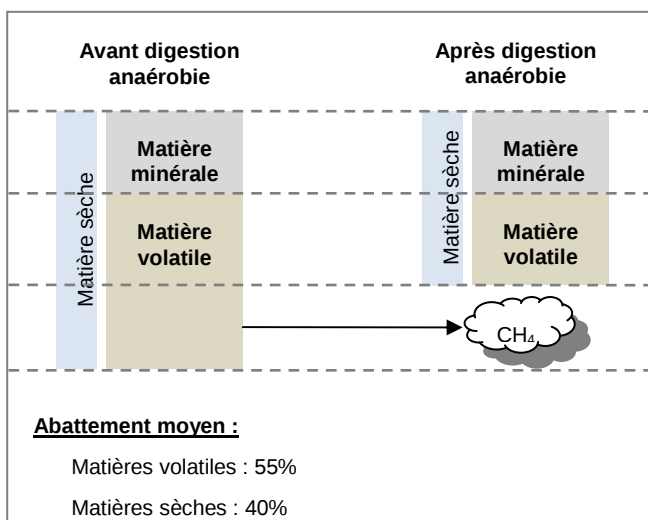


Figure 3 : Dégradation de la matière sèche lors de la digestion anaérobie des boues

4.1.3 La production de biogaz

La production en biogaz, exprimée en m^3 par tonne de matière volatile dégradée (la plupart du temps) varie sur une même station et d'une station à une autre, en fonction de la composition des boues (par exemple des boues qui concentrent de plus grandes quantités de lipides produiront plus de biogaz, car les lipides sont plus méthanogènes que la cellulose).

Le biogaz issu de la méthanisation des boues est composé en moyenne à 65% de CH_4 et 35% de CO_2 .

Une estimation des productions de biogaz portant sur 20 stations de traitement des eaux usées réalisant la digestion anaérobie de boues mixtes (primaires et biologiques moyenne charge) a été réalisée (Tableau 7). Ainsi, la production de CH_4 varie entre 240 et 780 m^3 / tMV dégradée (en fonction des installations) avec une valeur moyenne à 550 m^3 de CH_4 / tMV dégradée.

Tableau 7 : Production de biogaz pour les 20 STEU (Solagro, 2001)

PRODUCTION DE BIOGAZ	MINIMUM	MOYENNE	MAXIMUM
$\text{m}^3 \text{CH}_4$ / t de matière volatile dégradée	240	550	780
$\text{m}^3 \text{CH}_4$ / t de matière sèche introduite	120	225	320

Il existe une très forte corrélation entre le pourcentage de dégradation des MV et le taux de biogaz produit (Figure 4).

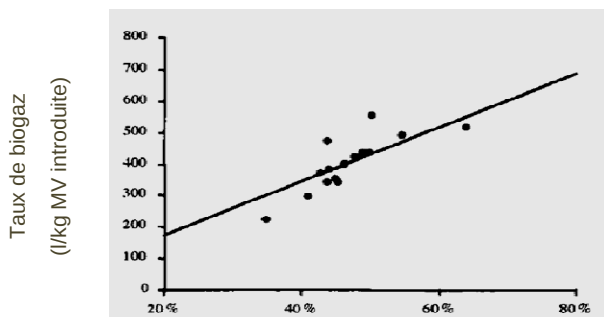


Figure 4 : Relation entre le taux de biogaz (par kg de MV introduite) et le pourcentage de MV détruites (Barber, 2005)

4.1.4 Bilans énergétiques

4.1.4.1 Production énergétique

Le bilan énergétique de la digestion anaérobie et les productions de chaleur et d'électricité sont directement dépendants de la production de biogaz de la STEU et du rendement des appareils utilisés pour la production d'énergie.

Si on prend la valeur moyenne de production de CH_4 (soit $550 \text{ m}^3 \text{CH}_4 / \text{tMV}$ dégradée) et un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) du CH_4 de $35,8 \text{ MJ/m}^3$, alors, la digestion anaérobie est à l'origine de la production de $5\,470 \text{ kWh/tMV}$ dégradée. (Solagro, 2001) (Figure 5).

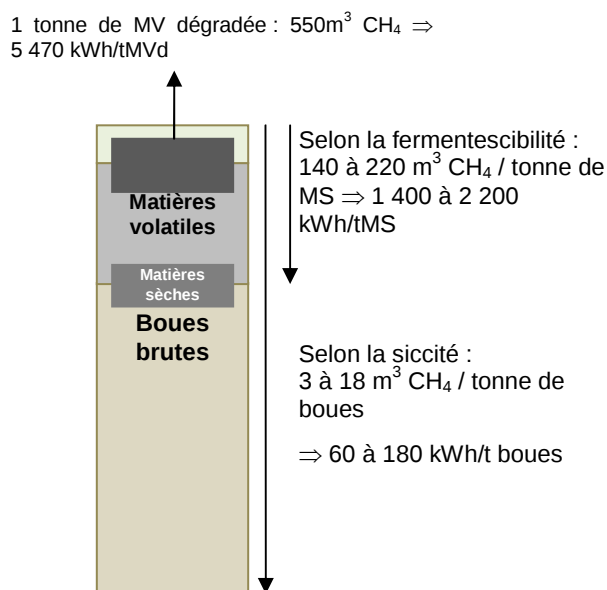


Figure 5 : Estimation des productions énergétiques lors de la digestion des boues

En fonction de la fermentescibilité des boues, les proportions de matières volatiles contenues dans les matières sèches vont varier, et donc la production de biogaz par tonne de matière sèche détruite va également varier (Tableau 8).

Tableau 8 : Fermentescibilité relative de différents types de boues

Boues d'aération forte charge	85 – 95
Boues d'aération moyenne charge	50 – 65
Boues d'aération faible charge	25 – 45
Boues digérées	0 - 20

Cependant, seulement une partie de cette énergie sera réellement valorisable, en fonction du rendement des appareils utilisés pour la valorisation (Tableau 9).

Tableau 9 : Rendements des appareils de valorisation et production de chaleur et d'électricité (en kWh / tMV détruite) si on prend une valeur moyenne de production du biogaz de 550m³ / tMV détruite

	PRODUCTION DE CHALEUR		PRODUCTION D'ELECTRICITE	
	Rendement	kWh / tMV détruite	Rendement	kWh / tMV détruite
Chaudière	80 à 90%	4376 à 4923	-	-
Moteur à gaz	45 à 55%	2461 à 3008	33 à 36%	1805 à 1969
Turbine à gaz	60 à 70%	3282 à 3829	20 à 25%	1094 à 1367

4.1.4.2 Chauffage consommé par les digesteurs

L'énergie consommée par la digestion des boues pour le chauffage des digesteurs s'élève entre 35 et 40kWh / tonne de boues entrée en digestion.

Cette consommation représente 30% de l'énergie produite avec des valeurs extrêmes de 20 à 70% en fonction des installations. La digestion anaérobie produit suffisamment d'énergie pour assurer le chauffage des digesteurs, même avec des boues peu fermentescibles issues d'aération prolongée et en conditions défavorables (Solagro, 2001).

4.1.4.3 Electricité consommée pour le fonctionnement du digesteur

Les consommations d'électricité d'un digesteur sont principalement liées au brassage et secondairement au pompage et à la circulation des boues. Les consommations électriques varient en fonction de :

- ▶ La puissance de brassage : elle varie entre 3 et 6 W/m³ de digesteur,
- ▶ La concentration des boues entrant en digestion,
- ▶ Le temps de séjour

Ainsi, les consommations électriques d'un digesteur varient entre 50 et 200 kWh/tMS introduite dans le digesteur (Tableau 10).

Tableau 10 : Consommations d'électricité en kWh/tMS, en fonction de la concentration des boues d'entrée en digestion et de la puissance de brassage (Solagro, 2001)

TENEUR	TRH	PUISSANCE (W/M ³)	
En MS	jours	4	6
8%	25	50	70
6%	30	70	110
4%	35	130	190

4.1.4.4 Bilan production énergétique / consommation énergétique pour le digesteur

Il est difficile de réaliser un bilan global généralisable à toutes les installations de méthanisation quant aux consommations énergétiques et aux productions énergétiques. On peut cependant définir « des grandes lignes » dans le cas de conditions usuelles (abattement de 40% des MS), la digestion consomme 5% de l'énergie produite, ou encore 16% de l'électricité co-générée (Solagro, 2001) (Tableau 11).

Tableau 11 : Bilan production énergétique / consommation énergétique en fonction de la nature des boues et du type de valorisation appliqué

	CONSOMMATION D'ELECTRICITE/ENERGIE PRODUITE	CONSOMMATION D'ELECTRICITE / ELECTRICITE OBTENUE PAR CO-GENERATION
Conditions usuelles	5%	16%
Boues très fermentescibles, siccité élevée	2%	5%
Boues peu fermentescibles, faible siccité	14%	44%

4.1.4.5 Bilan énergétique avec les traitements avals

Le bilan énergétique ne doit pas prendre uniquement en considération la valorisation énergétique, mais il doit également intégrer les gains énergétiques grâce aux diminutions des quantités à traiter (Solagro, 2001) (Figure 6).

La consommation d'électricité pour le traitement des eaux usées urbaines est en moyenne de 30 à 40 kWh pour 1000 EH. Le biogaz est susceptible de couvrir entre le tiers et la moitié des consommations d'électricité d'une STEU, ce qui représente en ordre de grandeur le quart de son coût de fonctionnement. La digestion anaérobie des boues permettrait également de réaliser des économies d'électricité sur les traitements avals (Tableau 12).

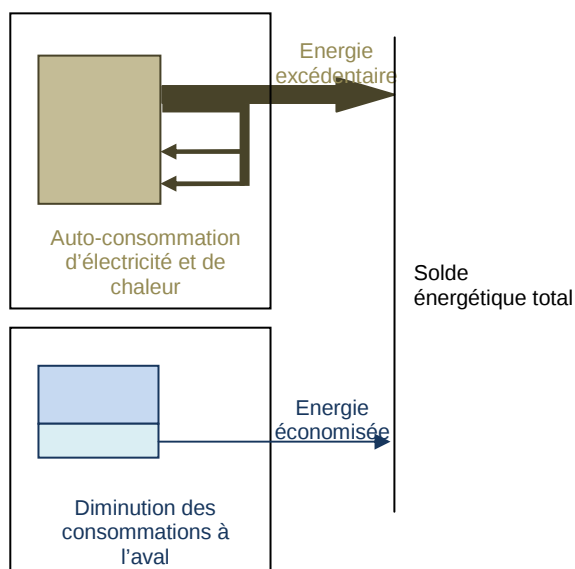


Figure 6 : Economies énergétiques (Solagro, 2001)

Tableau 12 : Economies d'électricité (Solagro, 2001)

ECONOMIES D'ELECTRICITE INDUITES PAR LA DIGESTION ANAEROBIE SUR LES TRAITEMENTS AVALS (EN KWH ELECTRIQUES PAR TONNE DE MATIERE SECHE INITIALE)	
Epandage boues digérées déshydratées	15 – 20
Compostage boues digérées déshydratées	20 – 30
Séchage thermique boues digérées déshydratées	30 – 40
Incinération boues digérées déshydratées	100 - 150

4.1.4.6 Bilan énergétique « Digestion anaérobie + Séchage thermique »

Le séchage thermique est particulièrement complémentaire de la digestion anaérobie. La méthanisation permet de réduire les quantités de boues à sécher et le biogaz produit, en plus de maintenir le digesteur à sa température, peut, dans certains cas fournir la totalité de l'énergie nécessaire au séchage.

Le bilan énergétique est lié au taux de dégradation de la matière sèche et à la siccité des boues en sortie de déshydratation. Le bilan en termes de consommation totale et surtout de consommation d'énergie externe (fioul, gaz naturel) est favorable à la digestion, même en cas de séchage de boues d'aération prolongée digérées (Solagro, 2001).

4.1.4.7 Bilan énergétique « Digestion anaérobie + Incinération »

En diminuant la teneur en MV contenues dans les boues, la digestion diminue également leur PCI. Les boues peuvent devenir non auto-combustibles. Cependant, en fonction de la teneur initiale en MV et du taux d'abattement de celles-ci, on peut déterminer la siccité minimale à atteindre pour l'auto-combustion (Tableau 13). Par exemple, lorsque la teneur initiale en MV est de 70% et que l'abattement est de 35% alors la siccité minimale doit être de 27% alors que si l'abattement est de 55%, la siccité minimale doit être de 31% (Solagro, 2001). En cas de non atteinte de cette siccité minimale, le biogaz peut être utilisé pour fournir l'énergie nécessaire.

Tableau 13 : Siccité minimale des boues déshydratées nécessaires à l'auto-combustibilité (Solagro, 2001)

		TENEUR INITIALE EN MATIERES VOLATILES			
		65%	70%	75%	80%
Taux d'abattement des matières volatiles	35%	29%	27%	25%	-
	45%	31%	29%	26%	24%
	55%	-	31%	28%	26%

Bien que le PCI des boues soit diminué, la méthanisation ne diminue pas leur potentiel énergétique. En revanche, les besoins en énergie lors de l'évaporation de l'eau contenue dans les boues diminue. En effet, ceux-ci sont liés à la quantité de boues à traiter (évaporation de l'eau), qui diminue avec la digestion. Cette diminution des besoins est

partiellement compensée par les consommations du digesteur, mais généralement le bilan global reste meilleur avec l'association « digestion + incinération ».

4.1.5 Incidences sur les traitements ultérieurs

Les principales conclusions des incidences de la méthanisation sur les traitements ultérieurs des boues ont été données par Solagro (2001). Cependant ces données sont difficiles à confirmer avec de vraies données scientifiques de recherches expérimentales (de laboratoire et de terrain).

4.1.5.1 Déshydratation

4.1.5.1.1 Déshydratabilité des boues

La capacité d'une boue à libérer son eau est appelée déshydratabilité ou filtrabilité. Celle-ci est en général mesurée par le test de temps de succion capillaire et la résistance spécifique à la filtration.

Dans les études référencées dans la bibliographie, l'impact de la digestion anaérobie sur la déshydratation des boues est partagé. En fonction des publications, certains auteurs indiquent que la digestion anaérobie augmente la déshydratabilité des boues (Rudolfs W. and Heukelekian H., 1934; Lawler *et al.*, 1986; Solagro, 2001), alors que d'autres présentent une déshydratabilité diminuée (Pearson E.L. and Buswell A.M., 1931; Bruus *et al.*, 1993; Houghton *et al.*, 2000) liée à une augmentation du relargage des exopolymères. Selon Bruus (1993), la déshydratabilité des boues stockées de façon anaérobie est plus faible que sur des boues classiques, mais seulement avant le conditionnement des boues. Une fois les boues conditionnées avec le dosage optimal en polyélectrolytes, la déshydratabilité n'est pas affectée.

A dire d'experts¹, de façon globale, la digestion anaérobie n'améliore pas l'aptitude à la déshydratation par rapport à des boues classiques. En effet, bien que la méthanisation des boues augmente les matières minérales contenues dans celles-ci, elle modifie également sa structure créant davantage de fines dans les boues digérées et elle augmente également les exopolymères créant des interactions encore mal maîtrisées. La digestion anaérobie mésophile n'influence pas les performances de la déshydratation ; c'est plutôt la nature des boues qui va les impacter¹.

Cependant, toujours à dire d'experts, la digestion anaérobie thermophile et après hydrolyse thermique impactent la déshydratabilité des boues. Dans le cas de la digestion thermophile, celle-ci rend la digestion plus difficile car les exopolymères se concentrent dans un volume moindre et des températures plus élevées. Dans le cas de la digestion après hydrolyse thermique, celle-ci entraîne un effet positif sur la déshydratabilité des boues (augmentation de la siccité des boues par rapport à une déshydratation classique).

Il semblerait qu'il existe une forte corrélation entre la siccité des boues obtenue après déshydratation et la composition en MV contenue dans les boues (Barber, 2005). Ainsi les performances de la déshydratation pourraient être liées aux performances de la digestion.

4.1.5.1.2 Consommation en polymères pour le conditionnement

Une première étude datant de 1993 analysait comment le stockage anaérobie des boues affectait les besoins pour le conditionnement et la filtrabilité des boues (Bruus *et al.*, 1993). Après un simple stockage anaérobie des boues, celles-ci présentent une augmentation de leur turbidité et de leur carbone organique dissous, conséquences de la dégradation bactérienne de la MO et de l'hydrolyse des exopolymères relargués en particules colloïdales, en ions, en exopolymères dissous et en produits de déchets fermentés (AGV, alcools...).

¹ Communication personnelle Hugues Vanden Bossche, Degrémont

Ce relargage d'exopolymères dissous et la dissociation des acides gras volatils augmenteraient la quantité de charges négatives. Ces charges négatives créeraient des liaisons avec les polyélectrolytes, ce qui diminuerait la quantité de polymères disponibles pour le conditionnement des boues, et donc augmenterait les quantités de polymères nécessaires pour les conditionner.

Dans l'étude de Novak *et al.* (2003) le conditionnement des boues par polymères après digestion anaérobie nécessite 8 à 9 fois plus de polymères que pour des boues digérées de façon aérobie. Les boues digérées de façon anaérobie nécessitent de plus grandes quantités de polymères que des boues classiques.

De plus, il semblerait que ce sont les biopolymères solubles (protéines et polysaccharides) qui sont responsables de la quantité de polymère nécessaire pour le conditionnement des boues.

Pour d'autres auteurs, le fait de digérer les boues avant la déshydratation permet de réduire les consommations en polymères (Solagro, 2001).

La question des consommations en polymères après la digestion anaérobie reste donc compliquée.

Ainsi, deux problématiques peuvent être mises en évidence :

- ▶ La digestion anaérobie avant la déshydratation des boues modifie-t-elle les consommations en polymères pour le conditionnement des boues par rapport à des boues classiques (Est-ce que les consommations en polymères par tonne de MS sont modifiées ? Est-ce qu'en prenant en considération le fait que les quantités des MS sont diminuées, cela diminue les consommations totales en polymères ?) ?
- ▶ Est-ce que les gains apportés par la digestion anaérobie (réduction des quantités de boues, production énergétiques) sont suffisamment importants pour contrebalancer les éventuelles pertes notamment liées aux sur-consommations en polymères, le cas échéant ?

4.1.5.2 Compostage

Pour les 3 traitements suivants (compostage, séchage thermique, chaulage) l'analyse bibliographique n'a pas été développée car ces paramètres seront l'objet du programme en 2013-2015.

Selon Solagro (2001) les boues digérées sont plus minéralisées que les boues fraîches, elles permettent d'économiser du matériau structurant.

Ainsi, la méthanisation avant compostage :

- ▶ Réduit les quantités de boues à composter, diminue l'emprise au sol et les apports de co-produits,
- ▶ Réduit les odeurs.

4.1.5.3 Séchage thermique

La méthanisation avant séchage thermique

- ▶ Réduit les teneurs en MV et donc diminue les risques d'explosion,
- ▶ Réduit les quantités de boues et les volumes d'eau à évaporer,
- ▶ Fournit de l'énergie pour le séchage.

4.1.5.4 Chaulage

La méthanisation avant chaulage

- ▶ Facilite l'homogénéisation boues/chaux,
- ▶ Diminue d'environ 30% les quantités de chaux à apporter par tonne de matière sèche entrante.

Par conséquent, pour le procédé de déshydratation des boues aucune conclusion n'a été validée quant à la facilité des boues digérées à être déshydratées.

Pour les autres étapes de traitement (compostage, séchage thermique, chaulage), une seule référence bibliographique est référencée ici (Solagro, 2001) ; des études complémentaires devraient être ajoutées pour affirmer ou infirmer ces conclusions.

4.1.6 Impacts sur les flux d'azote et de phosphore

Après déshydratation des boues deux types de produits vont se former : le concentrat (filtrat) et le digestat qui retourne en tête de station.

Dans la digestion anaérobie, du fait d'une diminution du pH, environ $\frac{1}{3}$ du phosphore est relargué dans le surnageant.

Le surnageant est également plus chargé en NH_4^+ à cause des conditions de dégradation de la matière organique en milieu anaérobie ne permettant pas l'oxydation de l'azote et son relargage dans l'atmosphère.

Il y a donc une augmentation en azote et en phosphore dans les eaux à traiter, ce qui peut s'avérer problématique dans les STEU soumises à des normes de rejets plus contraignantes vis-à-vis de l'azote et du phosphore.

Les charges supplémentaires apportées à la filière eau par les retours en tête du surnageant issu de la déshydratation de boues digérées sont données dans le Tableau 14 (Solagro, 2001).

Tableau 14 : Pourcentage de retours en tête sur des boues digérées (exprimé en % d'effluent entrant dans la station) (Solagro, 2001)

	POURCENTAGE DES RETOURS EN TETE (SURNAGENT)
Débit	6 à 10%
DBO₅	5 à 30%
MES	2 à 17%
NTK	15 à 25%
P	1 à 10%

Selon Fux (2004), les eaux recirculées en tête de station représentent 1% des effluents entrants en termes de débit, mais 15 à 20% de la charge en azote (après digestion anaérobie).

Lawler (1984) a évalué la quantité, la qualité et la charge en polluants dans les retours en tête après digestion anaérobie et déshydratation sur 5 STEU (Tableau 15). Dans cette étude, il a également mis en évidence que les concentrations en NTK et en PT sont corrélées aux concentrations en MES et qu'on pouvait supposer que plus la séparation solide/liquide était faible, plus des MES se trouvaient dans les retours en tête et plus les concentrations en NTK et PT dans ces retours en tête étaient importantes.

Tableau 15 : Pourcentage de retours en tête sur des boues digérées (exprimé en % d'effluent entrant dans la station) (Lawler, 1984)

	POURCENTAGE DES RETOURS EN TETE
Débit	0,83% de l'effluent entrant
DBO₅	4,5% de la masse de l'effluent entrant
MES	51,2% de la masse de l'effluent entrant
NTK	23,2% de la masse de l'effluent entrant
PT	21,9% de la masse de l'effluent entrant

Il existe un modèle d'évaluation des impacts des retours en tête sur l'efficacité de traitement de la filière eau, l'alcalinité, les équilibres énergétiques (Wett and Alex, 2003). Ce modèle a été élaboré en exploitant les données sur 5 ans d'observations du fonctionnement d'une STEU. Ce modèle permet d'observer les flux d'azote et d'énergie à l'intérieur de la STEU. Cet outil est détenu par Ifak (institut de recherche allemand) qui propose de réaliser des simulations pour des stations de traitement des eaux usées.

4.1.7 *Notions de coûts*

L'intérêt de la digestion anaérobie des boues dépend des économies qu'elle apporte sur les étapes de traitements ultérieurs (déchayage, chaulage, séchage...) et sur l'évacuation des boues (épandage, enfouissement, incinération). Ces économies sont variables en fonction de l'installation et sont à calculer au cas par cas.

Cependant on peut émettre des conclusions générales dans le cas de conditions usuelles (abattement de 40% de MS et siccité après déshydratation de 25%). Les économies alors générées varient entre 50 et 150€ / tMS initiale (MS produite par la STEU) (Tableau 16).

Du fait que la digestion permet de réduire les quantités de boues à traiter, elle génère des économies sur les étapes ultérieures de traitement :

- Sur les consommables (électricité, chaux, combustibles...),
- Sur les équipements (diminution de l'investissement et des coûts d'entretien).

Tableau 16 : Economies réalisées sur les traitements avals (consommations, amortissement et entretien). Ces valeurs sont données à titre indicatif pour un taux de dégradation des matières sèches de 40% (Solagro, 2001)

	€ / TMS INITIALE
Déshydratation	23
Chaulage	38
Séchage thermique partiel (siccité de 55%)	85
Séchage thermique total (siccité de 95%)	105

De plus, l'évacuation des boues est généralement facturée à la tonne de boues en sortie de station ; ce coût est inversement proportionnel à la teneur en matières sèches (plus on déshydrate, moins l'évacuation coûte cher). Ramenées aux quantités « sortie de la filière eau », les économies sont proportionnelles aux taux de dégradation (plus on dégrade, plus on

économise). Donc les économies sur l'évacuation finale dépendent du taux de réduction des MS et de la siccité des boues à évacuer. Elles sont donc d'autant plus importantes que les contraintes d'évacuation sont fortes (Tableau 17).

Tableau 17 : Economies réalisées sur l'évacuation des boues pour un taux de dégradation des MS de 40% (Solagro, 2001)

MODALITES D'EVACUATION	COUTS PRATIQUES TRAITEMENT + TRANSPORT (€/T DE BOUES BRUTES)	MODALITES D'EVACUATION	ECONOMIES SUR L'EVACUATION DES BOUES (€/TMS INITIALE)
Epandage	20 à 30	Boues déshydratées 25%	30 à 50
Centre de stockage des déchets	40 à 50	Boues déshydratées 25%	60 à 80
		Boues séchées 55%	30 à 40
Incinération	30 à 60	Boues déshydratées 25%	50 à 100
		Boues séchées 55%	20 à 40
Compostage	50 à 80	Boues déshydratées 25%	80 à 130

La taille de l'installation a également un impact sur les coûts. Il semblerait que les coûts du procédé chutent quand la taille de l'installation augmente (Solagro, 2001). Cependant, à partir de 500 000 EH, les coûts ne sont plus influencés par la taille de l'installation.

De plus, les installations de digestion anaérobie en dessous de 100 000 EH deviennent de plus en plus chères en termes de coûts de traitements.

Enfin, les coûts semblent plus intéressants pour des boues secondaires que pour des boues primaires (Barber, 2005).

4.1.8 Faisabilité de la digestion

Le seuil minimal de faisabilité de la digestion anaérobie se situait auparavant entre 30 000 et 200 000 EH selon les destinations finales des boues, il peut aujourd'hui être descendu à 10 000 EH compte tenu de l'augmentation des contraintes sur la gestion des boues (Solagro, 2001) (Tableau 18).

C'est le cas notamment, pour des boues très fermentescibles, pour l'épandage, la mise en décharge, le séchage thermique et l'incinération. La digestion peut également être intéressante en préalable au compostage à partir de 200 000 EH (Solagro, 2001).

Avec des boues peu fermentescibles (comme les boues d'aération prolongée), ces seuils sont supérieurs, notamment pour le compostage.

Tableau 18 : Seuils minimaux de faisabilité de la digestion anaérobie en équivalents-habitants pour différentes filières (Solagro, 2001)

	CONTRAINTES	BOUES FERMENTESCIBLES	BOUES NON FERMENTESCIBLES
Epandage	Fortes Faibles	10 000 30 000	40 000 100 000
Séchage	-	10 000	10 000
Compostage	-	20 000	120 000
Mise en décharge	Fortes Faibles	10 000 10 000	20 000 30 000
Incinération	Fortes Faibles	10 000 50 000	30 000 200 000

La méthanisation des boues n'est pas un procédé qui doit être envisagé systématiquement, elle est plutôt favorable quand les contraintes d'évacuation des boues sont importantes (Tableau 19). Cependant, d'autres facteurs sont susceptibles de plaider en faveur de la digestion anaérobie, comme des contraintes de voisinage ou de foncier.

Tableau 19 : Principaux facteurs favorables ou non à l'utilisation de la digestion anaérobie (par ordre d'importance) (Solagro, 2001)

	FACTEURS FAVORABLES	FACTEURS DEFAVORABLES
++++	Coûts d'évacuation importants	Faible coûts d'évacuation
+++	Présence de boues primaires ou de boues biologiques forte charge	Boues d'aération prolongée seules
+++	Station de moyenne ou grande capacité	Station de faible capacité
++	Contraintes de voisinage, recherche d'une maîtrise de l'emprise au sol	Absence de contraintes de voisinage, d'espace, d'emprise au sol, de nuisances
++	Destination épandage, séchage ou enfouissement	Destination incinération ou compostage
++	Pas de traitement de l'azote	Traitement de l'azote
+	Besoins énergétiques identifiés : séchage thermique des boues...	Aucune valorisation énergétique envisageable sur site ou à proximité
+	Traitement chimique du phosphore, ou pas de traitement du phosphore	Traitement biologique du phosphore
+	Co-digestion de graisses, de matières de vidange	

Les critères défavorables ne sont pas systématiquement éliminatoires. Le cumul de plusieurs critères défavorables est nécessaire pour conclure à la non faisabilité de la digestion, et inversement. Chaque solution doit être étudiée au cas par cas.

4.1.9 Conclusions sur l'analyse bibliographique

Cette analyse de la littérature permet de mettre en évidence plusieurs points :

- Les données accessibles traitant des impacts de la digestion anaérobie des boues sont relativement rares,
- Beaucoup de données sont contradictoires, notamment sur la déshydratation des boues et sur le fait que les boues sont plus facilement déshydratables après digestion, et qu'elles consomment plus ou moins de polymères.

Ainsi, il est intéressant de se pencher de façon plus approfondie sur les impacts de la digestion anaérobie sur les performances environnementales de la station. Pour cela, l'étude se concentrera dans un premier temps sur les impacts de la digestion anaérobie jusqu'à l'étape de déshydratation.

4.2 Comment évaluer les impacts de la digestion anaérobie sur les performances environnementale de la station pour compléter les données bibliographiques ?

Les données relevées dans la littérature apportent des conclusions généralistes assez poussées sur les performances, les coûts et le réel intérêt de la méthanisation. Cependant ce sont des grandes lignes, chaque installation de méthanisation étant à étudier au cas par cas.

Une étude générale sur l'ensemble des installations de méthanisation des boues en France n'apporterait pas de conclusions supplémentaires des impacts de la digestion anaérobie sur les performances épuratoires des stations de traitement des eaux usées. Les études de 2010 et 2011 (Reverdy *et al.*) ont ainsi montré les limites de l'exploitation de données de STEU obtenues directement à partir d'enquêtes. En effet, lors des enquêtes, on utilise les données mesurées dans les installations. Cependant, d'une station à une autre, ce ne sont pas les mêmes paramètres qui sont mesurés, pas à la même fréquence et avec des expérimentateurs différents. Ainsi, en enquêtant les stations, peu de données sont accessibles et celles-ci présentent une forte variabilité liée aux expérimentateurs. Elles ne sont donc pas comparables.

De plus, quand certaines données sont disponibles sur les installations, celles-ci sont parfois difficiles à obtenir car :

- les exploitants sont sans cesse sollicités pour des enquêtes portant sur leurs installations (en moyenne deux fois par an), ils manquent donc de temps et de patience quant au transfert de leurs données,
- les exploitants ne souhaitent pas forcément que leur installation soit comparée à une autre.

C'est pourquoi, si on veut pouvoir étudier les impacts de la digestion anaérobie sur les performances environnementales de la station, il est préférable de réaliser un suivi de station de traitement des eaux usées.

Pour cela il serait intéressant de se concentrer sur deux stations d'épuration, de capacité équivalente, l'une équipée d'un digesteur anaérobie, l'autre non, afin de comparer les consommations énergétiques et en polymères par exemple.

De plus, si l'on souhaite identifier si la capacité de la STEU, équipée d'un digesteur, a un impact sur les performances épuratoires de la station, il serait intéressant de travailler sur plusieurs gammes de STEU, par exemple :

- <30 000 EH
- 50 000 à 60 000 EH
- 300 000 EH
- 600 000 EH

► >1 000 000 EH

Cependant, il est important de noter que :

- (i). les effluents entrants dans les stations ne seront pas les mêmes et que les filières de traitement des eaux et des boues seront différentes entre les STEU.
- (ii). les données ne seront pas généralisables, car comme on vient de le montrer précédemment, chaque installation de méthanisation est à étudier au cas par cas. Elles sont toutes différentes en fonction des effluents entrants, de la filière de traitement des eaux, de la filière de traitement des boues, des graisses éventuellement ajoutées aux boues pour la digestion anaérobie. Néanmoins, cela permettrait d'avoir des données fiables à étudier.

4.2.1 Choix des stations de traitement des eaux usées

Comme il a été dit précédemment, 2 STEU (une avec digesteur, l'autre sans) d'une capacité équivalente et 4 autres stations seront sélectionnées afin d'évaluer les impacts de la digestion anaérobie sur les performances des stations de traitement des eaux usées.

Le choix des stations munies de digesteurs (Tableau 20) est réalisé en se basant sur les stations référencées dans l'étude de 2010 (Reverdy *et al.*, 2011).

Tableau 20 : Choix des stations équipées de digesteurs qui pourraient être appareillées

	STEU	CAPACITE	DEPARTEMENT
<30 000 EH	Saint Jean de Sixt	29 000 EH	Haute Savoie
	Equerdreville	27 800 EH	Manche
50 000 à 60 000 EH	Sallanches	57 800 EH	Haute Savoie
	Samoëns	55 833 EH	Haute Savoie
300 000 EH	La Feyssine	300 000 EH	Rhône
	Bonneuil-en-France	300 000 EH	Val d'Oise
600 000 EH	Nancy	500 000 EH	Meurthe-et-Moselle
	Lille	750 000 EH	Nord
1 000 000 Eh	Strasbourg	1 017 000 EH	Bas-Rhin
	Marseille	1 800 000 EH	Bouches du Rhône

En ce qui concerne le choix de la station non équipée de méthaniseur, et qui sera comparée à la station de 300 000 EH, il a été réalisé en se basant sur la base de données du Ministère qui recense la totalité des stations de traitement des eaux usées en France.

Ainsi 8 stations pourraient être comparées à la station de 300 000 EH avec digesteur (Tableau 21).

Tableau 21 : STEU non équipées de méthaniseur et qui pourraient être comparées à la STEU de 300 000 EH

STEU	CAPACITE
Le Mans	365 000 EH
Saint Thibaut des Vignes	350 000 EH
Orléans	350 000 EH
Caen	332 000 EH
Le Havre	300 000 EH
Saint Etienne	282 000 EH
Colmar	250 000 EH
Brive	250 000 EH

Le choix des stations se fait aussi bien sur des critères techniques (capacité, traitements des eaux, des boues...), mais également sur la localisation géographique dans la mesure du possible. En effet, afin d'appareiller les stations et de récupérer les données, une proximité géographique faciliterait la collecte des données ainsi que les coûts.

4.2.2 Réflexions sur la mise en place d'un protocole expérimental sur les STEU

Le protocole ici présenté n'est qu'une ébauche, il sera ajusté en fonction des conditions de terrain et des réflexions à venir. Il a, en partie, été mis en place à partir du guide méthodologique mis en place par l'ADEME pour le suivi d'une installation de méthanisation (ADEME, 2009).

Ce guide a été élaboré en rationalisant les différentes étapes de fonctionnement du processus de méthanisation. Chaque étape constitue ainsi une unité fonctionnelle pour laquelle différents paramètres nécessaires au suivi sont identifiés.

Pour une installation de méthanisation, 5 unités fonctionnelles sont définies (Figure 7) :

- ▶ **Unité fonctionnelle 1 (UF1) :** Réception et transformation des matières premières. Cette UF regroupe tous les paramètres relatifs aux matières premières et aux procédés de stockage/transformation mis en place en amont de la digestion. Etant donné que dans notre cas nous travaillons sur des stations de traitement des eaux usées, cette étape correspondrait au moment où les boues sont extraites de la filière eau et sont envoyées dans la filière boues (stockage éventuel, épaissement).
- ▶ **Unité fonctionnelle 2 (UF2) :** Digesteur. Cette UF comprend les équipements de digestion et de stockage de biogaz. C'est à ce niveau que sont mesurées les performances de production de biogaz et les rendements de dégradation anaérobie.
- ▶ **Unité fonctionnelle 3 (UF3) :** Valorisation énergétique. Cette UF comprend l'ensemble des équipements destinés au traitement du biogaz et à sa valorisation énergétique ; y compris la vente d'énergie à un opérateur.
- ▶ **Unité fonctionnelle 4 (UF4) :** Valorisation du digestat. Cette UF comprend l'ensemble des équipements destinés au stockage, au post-traitement et à la valorisation du digestat. Dans notre étude, par soucis de simplicité, le choix a été fait de se porter uniquement sur l'étape de déshydratation des boues ; ainsi cette UF4 portera sur le stockage éventuel des boues avant déshydratation, leur conditionnement et leur déshydratation.

- **Unité fonctionnelle 5 (UF5) :** Fonctionnement général (moyens humains et matériel).
Il s'agit de regrouper à ce niveau toutes les opérations liées au fonctionnement général de l'installation de l'UF1 (entrée en traitement des boues) à l'UF4 (fin de traitement en déshydratation).

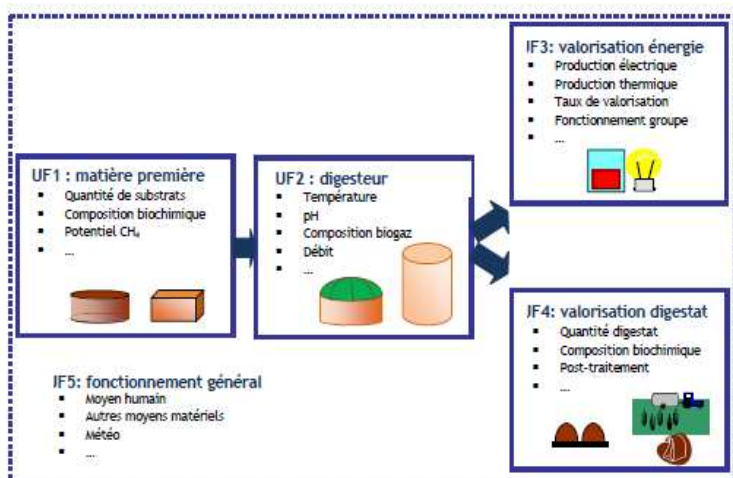


Figure 7 : Schéma de principe du suivi des différentes unités fonctionnelles (ADEME, 2009)

Ce suivi des UF sera réalisé en suivi expérimental (dans la mesure du possible).

Le principe général du suivi de l'installation est récapitulé dans la Figure 8.

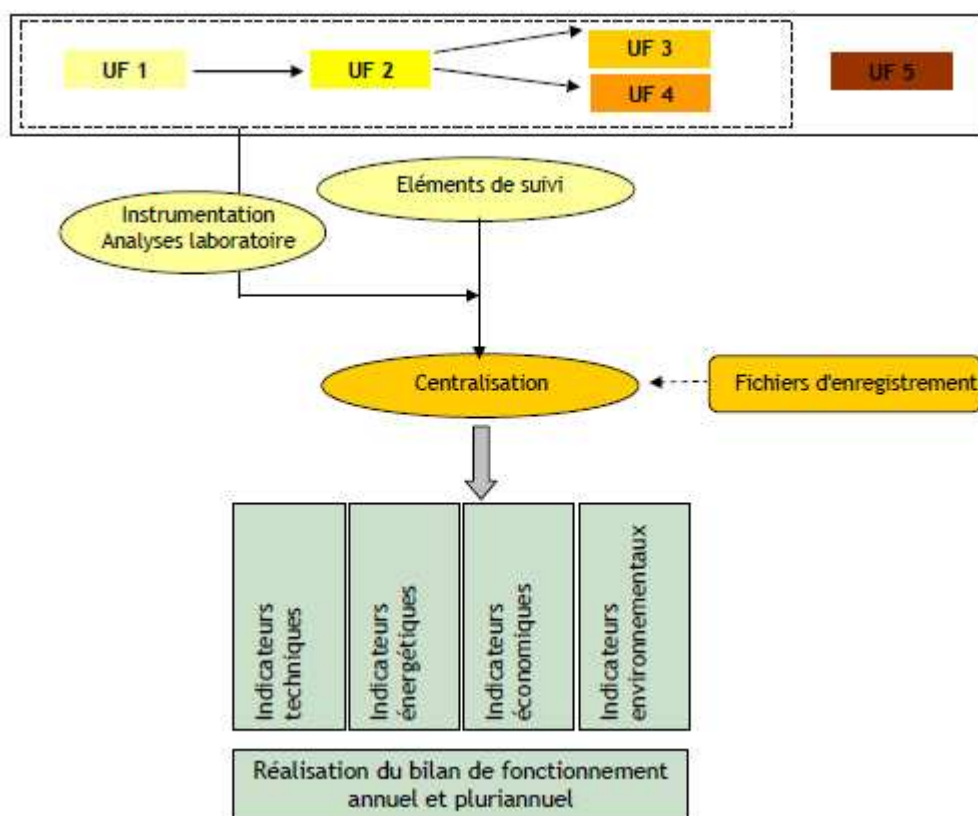


Figure 8 : Schéma de principe de la mise en place d'un suivi (ADEME, 2009)

4.2.2.1 Eléments de suivi par UF

4.2.2.1.1 UF1 – Réception et transformation des matières premières

Cette UF va porter sur le stockage éventuel des boues à la sortie de la filière eau ainsi que leur épaissement avant d'être envoyées en digestion anaérobie.

Les paramètres qui vont constituer cette UF comprennent :

- Les volumes et les tonnages des différentes matières,
- Les compositions biochimiques des substrats (matières sèches, matières organiques, azote total, azote ammoniacal, phosphore),
- Les potentiels méthanogènes des substrats.

4.2.2.1.2 UF2 – Digesteur

Cette UF concerne tous les équipements de digestion et de stockage du biogaz.

Les paramètres qui vont constituer cette UF comprennent :

- Les volumes, les tonnages et la composition du mélange entrant,
- Les paramètres de fonctionnement du milieu de fermentation (température, pH, Acides Gras Volatiles, alcalinité, ammoniac, matière sèche résiduelle, matière organique résiduelle),
- La production et la composition du biogaz (débit de biogaz, température du biogaz, pression du biogaz, teneur en méthane, teneur en dioxyde de carbone, teneur en hydrogène sulfuré).

4.2.2.1.3 UF3 – Valorisation énergétique

Cette UF concerne tous les équipements destinés au traitement du biogaz et à sa valorisation énergétique.

Les paramètres qui vont constituer cette UF comprennent :

- Le suivi de fonctionnement des équipements de valorisation qui consiste à relever les principaux paramètres de fonctionnement de l'équipement de valorisation du biogaz et à noter les éléments liés à l'entretien et/ou aux pannes de cet équipement,
- Le comptage de l'énergie valorisée sous toutes ses formes (chaleur et électricité).

NB : Les compteurs de production/utilisation d'énergie sont généralement mis en place lors de la construction de l'installation. Dans le cadre du suivi, il s'agit de s'appuyer sur les données fournies par ces éléments et éventuellement de rajouter des compteurs chaleur supplémentaires selon la configuration de l'installation.

4.2.2.1.4 UF4 – Valorisation du digestat

Cette UF concerne l'ensemble des équipements destinés dans notre cas au stockage éventuel et au traitement par déshydratation du digestat.

Les paramètres qui vont constituer le suivi de cette UF comprennent :

- La mesure de la quantité de digestat produit,
- Dans le cas de notre suivi, on souhaite également aborder la question de la consommation en polymères et les consommations énergétiques spécifiques à l'étape de déshydratation.

4.2.2.1.5 UF5 – Fonctionnement général

A ce niveau, il s'agit de relever les données générales d'exploitation qui comprennent les conditions extérieures pouvant influencer le process de méthanisation ainsi que les relevés relatifs au temps de travail, à la durée d'utilisation des matériels de manutention et propres au fonctionnement de l'installation (pompes, broyeurs...).

- Les paramètres qui vont constituer le suivi de cette UF comprennent :
- Les moyens humains nécessaires au fonctionnement (temps de travail),
- Les matériels propres à l'installation (temps d'utilisation, consommations énergétiques globales),
- Les données météorologiques.

4.2.2.2 Paramètres à mesurer

4.2.2.2.1 Fonctionnement général de l'installation de méthanisation

UF	PARAMETRE	UNITE	MOYEN D'OBTENTION DE LA VALEUR	FREQUENCE DE RELEVÉ
UF1 : Réception et transformation des boues	Quantité boues	m ³ et tonnes	Pesons, débitmètre, protocole adapté	
	Composition boues	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
	Potentiel méthanogène	Nm ³ CH ₄ / tMO	Echantillon et analyse laboratoire	
UF2 : Digesteur	Quantité mélange entrant	m ³ et/ou tonnes	Pesons, débitmètre, protocole adapté	2 fois par an
	Composition biochimique du mélange	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
	Température	°C	Sonde de type thermocouple	Minimum 1 fois par jour
	pH	Unité pH	pHmètre	1 à 5 fois / semaine
	AGV	g/L eq. acide acétique	Echantillon et analyse laboratoire	1 à 3 fois / semaine
	Alcalinité	g/L eq HCO ₃ ⁻	Echantillon et analyse laboratoire	
	MS résiduelle	%MB	Echantillon et analyse laboratoire	
	MO résiduelle	%MB	Echantillon et analyse laboratoire	
	Débit de biogaz	Nm ³ / h	Débitmètre étalonné	En continu

UF	PARAMETRE	UNITE	MOYEN D'OBTENTION DE LA VALEUR	FREQUENCE DE RELEVÉ
	Teneur CH ₄ et CO ₂	%	Analyseur IR, tubes colorimétriques	Quotidien
	Teneur H ₂ S	ppm	Analyseur dédié, tubes colorimétriques	1 à 3 fois / semaine
UF3 : Valorisation de l'énergie	Fonctionnement général de l'installation	Selon paramètre		1 fois / semaine
	Energie électrique	kWh	Compteur électrique normalisé	1 à 7 fois par semaine
	Energie thermique	kWh	Compteur thermique normalisé	
UF4 : Valorisation du digestat	Quantité boues	m ³ et tonnes	Pesons, débitmètre, protocole adapté	Minimum 2 fois par an
	Composition	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
	Consommation en polymères			
	Consommations énergétiques			
UF5 : Fonctionnement général	Données météorologiques	°C, mm	Thermomètre, pluviomètre	Quotidien
	Temps de travail pour chaque opération	minutes	Montre/chronomètre	A chaque opération

Une notion qui devrait également être prise en considération correspond aux fuites de biogaz du digesteur. En effet, des fuites potentielles de biogaz auront un impact considérable sur le bilan environnemental de la station, et notamment sur le réchauffement climatique étant donné que le CH₄ présente un pouvoir de réchauffement global 25 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone.

4.2.2.2 Impacts sur les flux d'azote

Il existe de nombreuses données dans la bibliographie. Cependant comme il a été montré précédemment, les retours en tête dépendent des effluents entrants dans la station, de la filière de traitement des eaux et de la filière de traitement des boues sur la station.

Cependant si on souhaite évaluer ces retours en tête, il faut mesurer les paramètres comme les MES, le COT, la DBO₅, le NTK et le PT.

En parallèle, afin d'identifier l'impact de ces retours en tête sur les consommations énergétiques dans les bassins d'aération, il faut être en mesure d'identifier les consommations énergétiques.

4.2.2.2.3 Représentation schématique des postes à étudier

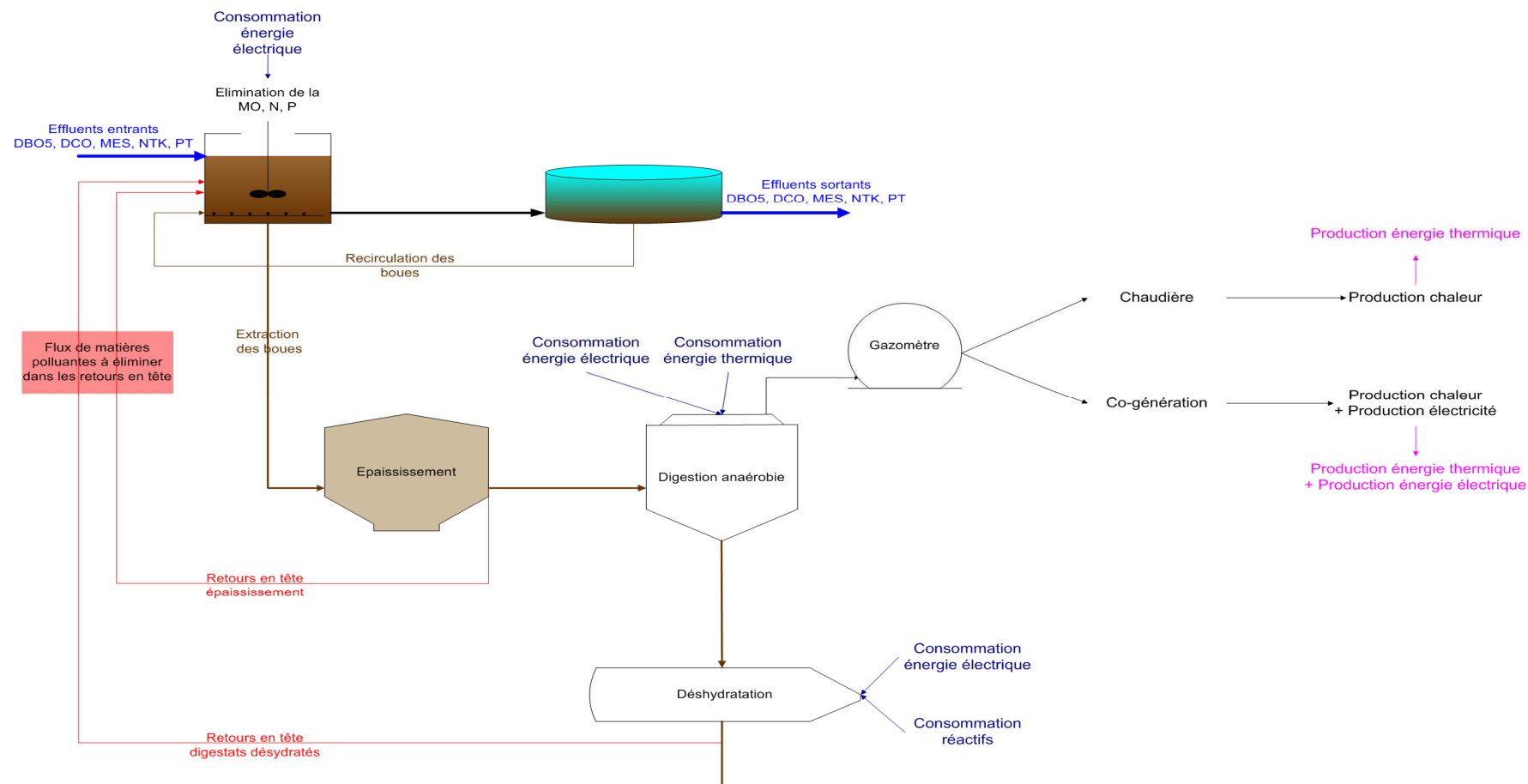


Figure 9 : Représentation schématique des postes à étudier sur les 5 STEU afin d'évaluer les impacts de la digestion anaérobie sur les performances de la STEU

4.2.2.3 Mise en place d'indicateurs de suivi

Selon le guide de l'ADEME (2009), deux types d'indicateurs peuvent être distingués :

- Les indicateurs biologiques relatifs aux performances de production du biogaz et de dégradation de la matière en digestion. On retrouve ainsi le rendement matière, le taux de dégradation de la matière organique, le rendement biologique, le bilan physico-chimique et le taux de minéralisation de l'azote.
- Les indicateurs techniques relatifs aux temps de travail humain et matériel dédiés au fonctionnement de l'installation, les indicateurs de dimensionnement d'une installation (rendement technologique), les indicateurs relatifs au fonctionnement de l'installation (temps de séjour, temps de rétention hydraulique, charge spécifique).

4.2.2.3.1 Indicateurs biologiques

Sept indicateurs biologiques permettent une analyse du fonctionnement d'une unité de méthanisation.

INDICATEUR	RENDEMENT MATIERE (RM)
Intérêt	Mesure la production de digestat à partir d'une quantité de boues traitées
Unité	%
Expression	$R_m = \frac{\text{Tonnage sortant digestat}}{\text{Tonnage entrant mélange}}$
Variables de calcul	Tonnage sortant digestat : tMB Tonnage entrant mélange : tMB
Spécificité liée au procédé	Pour les procédés à alimentation discontinue, les mesures doivent être réalisées sur le même digesteur et le même chargement afin d'obtenir des données exploitables. Pour les procédés à alimentation continue, les mesures sont réalisées sur un pas de temps donné (ex : temps de rétention hydraulique).

INDICATEUR	TAUX DE DEGRADATION DE LA MATIERE ORGANIQUE (TD)
Intérêt	Mesure la quantité de matières organiques dégradées pendant la digestion. Egalement appelé taux d'épuration. Il a une influence sur la production de biogaz.
Unité	%
Expression	$T_d = \frac{\text{Tonnes de MO du digestat}}{\text{Tonnes de MO du mélange entrant}}$
Variables de calcul	Tonnes de MO du digestat : tMO / tMS Tonnage de MO du mélange entrant : tMO / tMS
Spécificité liée au procédé	Pour les procédés à alimentation discontinue, les mesures doivent être réalisées sur le même digesteur et le même

	chargement afin d'obtenir des données exploitables.
INDICATEUR	RENDEMENT BIOLOGIQUE (RB)
Intérêt	Mesure la quantité de biogaz produit au cours de la digestion. Egalement appelé rendement de transformation des déchets ou production spécifique. Il peut également être exprimé à partir de la production de méthane.
Unité	Nm ³ biogaz / tMO ou Nm ³ CH ₄ / tMO
Expression	$Rb = \frac{\text{Production de biogaz}}{\text{Tonnes de MO du mélange}}$ ou $Rb = \frac{\text{Production de biogaz} \times \text{Teneur en CH}_4}{\text{Tonnes de MO du mélange}}$
Variables de calcul	Tonnes de MO du mélange: tMO / tMS Production de biogaz : Nm ³ Teneur en CH ₄ : %
Spécificité liée au procédé	-

INDICATEUR	TAUX DE MINÉRALISATION DE L'AZOTE (TMN)
Intérêt	Mesure le taux de minéralisation de l'azote.
Unité	%
Expression	$TmN = \frac{\text{Teneur en NH}_4 \text{ digestat}}{\text{Teneur en NH}_4 \text{ mélange entrant digesteur}}$
Variables de calcul	Teneur en NH ₄ digestat : g/kgMS Teneur en NH ₄ mélange entrant digesteur : g/kgMS
Spécificité liée au procédé	-

INDICATEUR	RENDEMENT TECHNOLOGIQUE (RT) OU RENDEMENT VOLUMIQUE (RV)
Intérêt	Exprime la quantité de biogaz produit par unité de volume de digesteur et par jour.
Unité	Nm ³ biogaz / m ³ digesteur / jour
Expression	$Rt = \frac{\text{Production de biogaz}}{\text{Volume du digesteur} \times \text{Temps de séjour}}$
Variables de calcul	Production de biogaz : Nm ³ Volume du digesteur : m ³ Temps de séjour : jours

Spécificité liée au procédé	-
-----------------------------	---

INDICATEUR	BILAN HYDRIQUE
Intérêt	Les unités de méthanisation mettant en oeuvre un procédé à alimentation discontinue nécessitent l'immersion du mélange pour deux raisons : - les bactéries anaérobies responsables du processus de dégradation se développent dans un milieu humide ; - l'immersion du mélange permet également d'atteindre les conditions d'anaérobiose. L'immersion est assurée par les jus du mélange et un apport d'eau extérieure. Cette phase liquide est appelée "jus de recirculation". Pour optimiser la gestion du procédé, il est nécessaire de connaître le volume de jus utilisé au cours de la digestion par tonne de matière traitée. Pour cela, on calcule l'indicateur d'apport en jus de recirculation (Aj).
Unité	m ³ /tonne traitée
Expression	$A_j = \frac{\text{Temps de fonctionnement des pompes} \times \text{Débit de la pompe}}{\text{Tonnage entrant du mélange}}$
Variables de calcul	Temps de fonctionnement des pompes : h Débit de la pompe : m³/h Tonnage entrant du mélange : tonnes
Spécificité liée au procédé	Indicateur calculé uniquement pour les procédés à alimentation discontinue

4.2.2.3.2 Indicateurs techniques

INDICATEUR	TEMPS DE RETENTION HYDRAULIQUE (TRH)
Intérêt	Quantifie la durée de séjour de la matière au sein du digesteur.
Unité	jours
Expression	$TRH = \frac{\text{Volume utile du digesteur}}{\text{Débit de matière entrant} \times 24}$
Variables de calcul	Volume utile du digesteur : m³ Débit de la pompe d'injection : m³/h
Spécificité liée au procédé	-

INDICATEUR	CHARGE ORGANIQUE (CO)
Intérêt	Indicateur de l'intensité du traitement et du dimensionnement de l'installation.
Unité	T MO / m ³ utile de digesteur / jour
Expression	$CO = \frac{\text{Tonnes de MO du mélange}}{\text{Volume du digesteur} \times \text{TRH}}$
Variables de calcul	Tonnes de MO du mélange : tonnes Volume du digesteur : m ³ TRH : jours
Spécificité liée au procédé	-

INDICATEUR	TEMPS DE TRAVAIL HUMAIN (TH)
Intérêt	Détermine le temps de travail humain nécessaire à la conduite de l'installation d'une façon globale et pour chaque opération : - Suivi de la digestion, - Maintenance et entretien du moteur, - Maintenance et entretien du digesteur
Unité	h / tMB traitée
Expression	Th globale = Somme de l'ensemble des Th par opération
Variables de calcul	Relevés manuels des heures par opération Tonnage traité sur la période considérée
Spécificité liée au procédé	-

4.2.2.3.3 Indicateurs énergétiques

INDICATEUR	PRODUCTION D'ENERGIE PRIMAIRE (PP)
Intérêt	Correspond à la quantité d'énergie produite théoriquement à partir du biogaz, hors pertes liées au rendement du moteur.
Unité	kWh PCI / Nm ³
Expression	$P_p = \text{Production de biogaz} \times \text{Teneur en CH}_4 \times \text{PCI CH}_4$
Variables de calcul	Production de biogaz : Nm ³ Teneur en CH ₄ : %

	PCI CH ₄ : 9,96 kWh / Nm ³ CH ₄
Spécificité liée au procédé	-

INDICATEUR	PRODUCTION D'ENERGIE UTILE
Intérêt	Correspond à l'énergie réellement produite à la sortie du module de co-génération ou de la chaudière et comprend la production d'électricité (Pe) et la production thermique totale (Ptht) dont la production thermique valorisée (Pthv). L'énergie électrique produite est mesurée grâce à un compteur électrique présent sur l'installation. La production d'énergie thermique totale (Ptht) se mesure par un compteur général situé en sortie du module de co-génération/chaudière. La production thermique valorisée (Pthv) se mesure par un compteur dédié ou par la différence entre le compteur général et le compteur aérotherme.
Unité	Pe : kWh électriques Ptht et Pthv : kWh thermiques utiles
Expression	Relevé direct
Variables de calcul	-
Spécificité liée au procédé	-

INDICATEUR	RENDEMENT DE L'INSTALLATION
Intérêt	Le biogaz produit est valorisé dans le module de co-génération/chaudière permettant la production d'électricité et/ou de chaleur. Cependant la totalité du biogaz n'est pas transformé en énergie, le rendement du module n'étant pas de 100%. Il convient alors de mesurer ce rendement : - Rendement électrique (Re) - Rendement thermique (Rth) - Rendement global (Rg)
Unité	%
Expression	$Re = \frac{Pe}{Production\ de\ biogaz \times Teneur\ en\ CH_4 \times PCI\ CH_4}$ $Rt = \frac{Pthv}{Production\ de\ biogaz \times Teneur\ en\ CH_4 \times PCI\ CH_4}$ $Rg = \frac{Pe + Pthv}{Production\ de\ biogaz \times Teneur\ en\ CH_4 \times PCI\ CH_4}$
Variables de calcul	Production de biogaz : Nm ³

	Teneur en CH ₄ : % Pe : kWh électriques Pthv : kWh thermiques utiles
Spécificité liée au procédé	-
Spécificité liée au procédé	-

5. Conclusion

L'étude des impacts environnementaux des stations de traitement des eaux usées doit intégrer l'analyse du traitement des boues car elle représente une part importante des coûts d'investissement et de fonctionnement et des impacts globaux d'une STEU.

Le but de cette étude était de se concentrer sur les conséquences de la digestion anaérobie des boues sur les performances des stations de traitement des eaux usées : Est-ce que les retours en tête entraînent des sur-consommations énergétiques dans les bassins d'aération ? Est-ce que la digestion anaérobie entraîne des sur-consommations en polymères et énergétiques à l'étape de déshydratation ?

Pour tenter de répondre à ces questions, une première analyse bibliographique des données existantes a été réalisée. Ceci a permis de faire un point sur :

- ▶ Les réductions des quantités de boues,
- ▶ La production de biogaz,
- ▶ Les bilans énergétiques (consommations électriques et thermiques, valorisation électrique et thermique),
- ▶ Les incidences sur les traitements ultérieurs (déshydratation, compostage, séchage, chaulage),
- ▶ Les impacts sur les flux d'azote et de phosphore.

Une attention toute particulière a été portée sur les incidences sur les traitements ultérieurs et notamment sur la déshydratation des boues en prenant en considération la déshydratabilité de celles-ci et les consommations en polymères pour leur conditionnement.

Il semblerait que des conclusions globales puissent être définies sur les réductions des quantités de boues et la production de biogaz. Cependant, en ce qui concerne les incidences sur les traitements ultérieurs (notamment la déshydratation) et les impacts sur les retours en tête, les conclusions varient d'une étude à l'autre et elles sont parfois contradictoires entre elles. On peut donc difficilement définir si d'un point de vue technico-économique une taille d'installation est plus intéressante qu'une autre.

C'est pourquoi nous proposons, dans une seconde partie, une méthodologie pour compléter les données portant sur les impacts de la digestion anaérobie sur les performances environnementales d'une station de traitement des eaux usées.

Pour cela un premier choix de STEU a été réalisé. Ce choix porte au total sur 6 stations (5 avec digesteur anaérobie, une -de référence- sans digestion anaérobie) :

- ▶ <30 000 EH,
- ▶ 50 000 à 60 000 EH,
- ▶ 300 000 EH,
- ▶ 600 000 EH,
- ▶ 1 000 000 E,
- ▶ La station sans digestion est censée présenter une capacité d'environ 300 000 EH.

Une première approche expérimentale est ici présentée. Elle s'inspire en partie du guide de suivi mis en place par l'ADEME (2009) et sera adapté dans les prochains mois en collaboration avec les exploitants des stations de traitement des eaux usées.

La prochaine phase va donc consister à mettre en place avec les stations de traitement des eaux usées un groupe de travail pour étudier les impacts de la digestion anaérobie sur les performances environnementales des STEU.

6. Sigles et abréviations

AGV : Acides gras volatiles

Aj : Apport en jus de recirculation

CO : Charge organique

COT : Carbone organique total

DBO₅ : Demande biologique en oxygène à 5 jours

DCO : Demande chimique en oxygène

EB : Effluent brut

MB : Matière brute

MES : Matières en suspension

MO : Matière organique

MS : matière sèche

MV : matière volatile

Nm3 : Normaux m³

NTK : Azote total Kjeldahl

OVH : Oxydation par voie humide

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

Pe : Production électrique

Pp : Production d'énergie primaire

PT : Phosphore total

Ptht : Production thermique totale

Pthv : Production thermique valorisée

Rb : Rendement biologique

Re : Rendement électrique

Rg : Rendement global

Rm : Rendement de matière

Rt : Rendement technologique

Rth : Rendement thermique

Rv : Rendement volumique

STEU : Station de traitement des eaux usées

Td : taux de dégradation de la matière organique

TH : Temps de travail humain

TmN : Taux minimal de l'azote

TRH : Temps de rétention hydraulique

UF : Unité fonctionnelle

7. Bibliographie

ADEME, 2009. Guide méthodologique pour le suivi d'une installation de méthanisation.

Audibert J., 1998. La logique floue optimise la centrifugation des boues. InterSections Novembre 1998, 31-34.

Barber, W.P., 2005. The effects of improving sewage sludge digestion. Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management 19, 214-224.

Bruus, J.H., Christensen, J.R., Rasmussen, H., 1993. Anaerobic storage of activated sludge: Effects on conditioning and dewatering performance. Water Science and Technology 28, 109-116.

Couturier C., Berger S., Meffren I., 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines, Etat des lieux, Etat de l'art. Solagro, p. 34.

Fux, C., Siegrist, H., 2004. Nitrogen removal from sludge digester liquids by nitrification/denitrification or partial nitrification/anammox. Water Science and Technology 50, 19-26.

GIS-BIOSTEP, 2005. Dysfonctionnements biologiques des stations d'épuration : origines et solutions. FNDAE n°33 Document technique, p. 124.

Grulois, P., Bousseau, A., Blin, E., Fayoux, C., 1993. Evaluation of the impact of return flows on the operation of a wastewater treatment plant. Water Science and Technology 28, 273-281.

Houghton, J.I., Quarmby, J., Stephenson, T., 2000. The impact of digestion on sludge dewaterability. Process Safety and Environmental Protection 78, 153-159.

Lawler, D.F., Chung, Y.J., Hwang, S.-J., Hull, B.A., 1986. ANAEROBIC DIGESTION: EFFECTS ON PARTICLE SIZE AND DEWATERABILITY. Journal of the Water Pollution Control Federation 58, 1107-1117.

Lawler, D.F., Singer, P.C., 1984. Return flows from sludge treatment. Journal of the Water Pollution Control Federation 56, 118-126.

Novak, J.T., Sadler, M.E., Murthy, S.N., 2003. Mechanisms of floc destruction during anaerobic and aerobic digestion and the effect on conditioning and dewatering of biosolids. Water Research 37, 3136-3144.

Pearson E.L., Buswell A.M., 1931. Sludge ripeness studies. Industrial and Engineering Chemistry 3, 359-360.

Pronost J., Pronost R., Deplat L., Malrieu J., J.-M., B., 2002. Stations d'épuration : Dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation. FNDAE n°22 bis - Document technique, p. 86.

Reverdy, A.L., Baudez, J.C., Dieude-Fauvel, E., 2011. La digestion anaérobie des boues d'épuration urbaines. Etat des lieux, Etat de l'art. In: Cemagref (Ed.), p. 74.

Rudolfs W., Heukelekian H., 1934. Relation between drainability of sludge and degree of digestion. Sewage Works Journal 6, 1073-1081.

Sadowsky A.G., 2002. Méthode de calcul d'une filière de traitement - "Boues activées - Très faible charge - Nitrification et dénitrification - Traitement du phosphore". ENGEES, p. 103.

Solagro, 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines - Etat des lieux sur le bassin Adour-Garonne - Rapport final. Toulouse, p. 57.

Wett, B., Alex, J., 2003. Impact of separate rejection water treatment on the overall plant performance. Water Science and Technology 48, 139-146.

8. Table des tableaux

Tableau 1 : Performances minimales des stations d'épuration des agglomérations devant traiter une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 120 kg /j de DBO5	12
Tableau 2 : Performances minimales des stations d'épuration des agglomérations devant traiter une charge brute de pollution organique supérieure à 120 kg / j de DBO5.....	12
Tableau 3 : Performances minimales des stations d'épuration des agglomération devant traiter une charge brute de pollution organique supérieure à 120 kg / j de DBO5 et localisé en zone sensible	12
Tableau 4 : Impacts quantitatifs des retours en tête de certains procédés de traitements des boues sur la station de traitement des eaux usées.....	15
Tableau 5 : Impacts quantitatifs des retours en tête de 3 systèmes de traitement des boues sur la station de traitement des eaux usées	15
Tableau 6 : Abattement des matières volatiles et des matières sèches contenues dans les boues	19
Tableau 7 : Production de biogaz pour les 20 STEU (Solagro, 2001).....	20
Tableau 8 : Fermentescibilité relative de différents types de boues	21
Tableau 9 : Rendements des appareils de valorisation et production de chaleur et d'électricité (en kWh / tMV détruite) si on prend une valeur moyenne de production du biogaz de 550m ³ / tMV détruite	22
Tableau 10 : Consommations d'électricité en kWh/tMS, en fonction de la concentration des boues d'entrée en digestion et de la puissance de brassage (Solagro, 2001).....	22
Tableau 11 : Bilan production énergétique / consommation énergétique en fonction de la nature des boues et du type de valorisation appliqué.....	23
Tableau 12 : Economies d'électricité (Solagro, 2001)	24
Tableau 13 : Siccité minimale des boues déshydratées nécessaires à l'auto-combustibilité (Solagro, 2001).....	24
Tableau 14 : Pourcentage de retours en tête sur des boues digérées (exprimé en % d'effluent entrant dans la station) (Solagro, 2001).....	27
Tableau 15 : Pourcentage de retours en tête sur des boues digérées (exprimé en % d'effluent entrant dans la station) (Lawler, 1984)	28
Tableau 16 : Economies réalisées sur les traitements avals (consommations, amortissement et entretien). Ces valeurs sont données à titre indicatif pour un taux de dégradation des matières sèches de 40% (Solagro, 2001)	28
Tableau 17 : Economies réalisées sur l'évacuation des boues pour un taux de dégradation des MS de 40% (Solagro, 2001).....	29
Tableau 18 : Seuils minimaux de faisabilité de la digestion anaérobie en équivalents-habitants pour différentes filières (Solagro, 2001)	30
Tableau 19 : Principaux facteurs favorables ou non à l'utilisation de la digestion anaérobie (par ordre d'importance) (Solagro, 2001)	30
Tableau 20 : Choix des stations équipées de digesteurs qui pourraient être appareillées.....	32
Tableau 21 : STEU non équipées de méthaniseur et qui pourraient être comparées à la STEU de 300 000 EH....	33

9. Table des figures

Figure 1 : Représentation schématique de l'équation générale des retours en tête.....	16
Figure 2 : Scénarios de dysfonctionnements dus aux retours en tête (Grulois et al., 1993).....	18
Figure 3 : Dégradation de la matière sèche lors de la digestion anaérobie des boues	20
Figure 4 : Relation entre le taux de biogaz (par kg de MV introduite) et le pourcentage de MV détruites (Barber, 2005)	20
Figure 5 : Estimation des productions énergétiques lors de la digestion des boues	21

<i>Figure 6 : Economies énergétiques (Solagro, 2001)</i>	<i>23</i>
<i>Figure 7 : Schéma de principe du suivi des différentes unités fonctionnelles (ADEME, 2009).....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 8 : Schéma de principe de la mise en place d'un suivi (ADEME, 2009).....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 9 : Représentation schématique des postes à étudier sur les 5 STEU afin d'évaluer les impacts de la digestion anaérobie sur les performances de la STEU.....</i>	<i>39</i>

Irstea

1, rue Pierre Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony

01 40 96 61 21

www.irstea.fr

Onema

Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.onema.fr