



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final Septembre 2012

La digestion des boues d'épuration: situation et potentiel d'optimisation

*Travail de Master réalisé au printemps 2012 par X. Chopy,
stagiaire-ingénieur ISARA Lyon (France) chez EREP SA*

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche énergétique
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Mandataire:

EREP SA
Chemin du Coteau 28
1123 Aclens
www.erep.ch

Auteurs:

Xavier Chopy, xchopy@gmail.com
Nathalie Bachmann, EREP SA, nathalie.bachmann@erep.ch

Responsable de domaine de l'OFEN: Sandra Hermle

Chef de programme de l'OFEN: Sandra Hermle

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: SI/500746-01

Les auteurs de ce rapport portent seuls la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Résumé

Dans les stations d'épuration existent des gisements énergétiques qui restent aujourd'hui peu ou mal exploités en Europe. La digestion anaérobie des boues est une solution pour valoriser ce potentiel et augmenter la production d'énergie renouvelable. Ce travail tente d'expliquer pourquoi certaines stations d'épuration pratiquent la digestion des boues alors que d'autres ne profitent pas de cette technologie. Pour cela, deux questions sont traitées :

- Quelles sont les options technologiques pour la digestion dans les STEP?
- Quelles sont les raisons qui expliquent les disparités de développement et de performances de cette technique ?

La digestion anaérobie peut être optimisée en augmentant le taux de valorisation du biogaz produit, en diminuant les consommations d'énergies de l'installation de digestion et en augmentant la production de biogaz. Pour guider les acteurs dans cette démarche d'optimisation une plaquette a été réalisée. La désintégration est un moyen d'augmenter la production de biogaz jusqu'à 18% en réduisant de 20% le volume des boues sèches résiduelles. En Suisse, la production d'énergie pourrait être augmentée jusqu'à 130 GWh/an, en mettant en place des prétraitements de désintégration dans toutes les STEP pratiquant la digestion. La codigestion reste rarement pratiquée en STEP alors que son potentiel en Europe est conséquent. Dans les pays où les boues sont incinérées, cette option est limitée.

Aujourd'hui seulement 26% des boues d'épuration françaises sont digérées soit une production de 9,8 kWh/hab contre 74% et une production de 37,4 kWh/hab en Suisse. En France, 80% de la digestion se réalise dans les STEP de grandes tailles, supérieures à 50 000 EH. La Suisse consacre cette technologie à l'ensemble de son parc, 91% de la digestion anaérobie est pratiquée dans des STEP de moins de 50 000 EH. Ces deux pays ont des schémas de développements opposés compte tenu des contraintes topographiques différentes. Ces différences de développement s'expliquent également par des décisions politiques et des orientations environnementales différentes dans les deux pays. Les STEP françaises et suisses ont choisi la digestion pour réduire le volume de boues et pour l'attrait économique ainsi que la production d'énergie. Le troisième critère de choix distingue ces deux pays, en France ce procédé est retenu pour la qualité agricole du digestat, alors qu'en Suisse c'est le traitement des odeurs qui reste déterminant.

Les marges de développement françaises restent importantes, la majorité des STEP peuvent encore s'équiper. Mais les clés du développement restent politiques et environnementales. La quasi-totalité du parc suisse est équipé, le développement se fera sur l'optimisation et la réhabilitation des installations de digestion.

Abréviations

CCF	Couplage Chaleur Force
COV	Composés organiques volatils
d.n.d.	Donnée non disponible
EH	Equivalents Habitants
GES	Gaz à Effet de Serre
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules
MF	Matière Fraiche
MM	Matière Minérale
MO	Matière Organique
MS	Matière Sèche
Nm³	Normaux Mètre Cube
OFEN	Office Fédérale de l'Energie
OFEV	Office Fédérale de l'Environnement
RPC	Rétribution à Prix Coutant
STEP	Station d'Epuration
TRH	Temps de Rétention Hydraulique
UIOM	Unité d'Incinération d'Ordures Ménagères

Table des matières

INTRODUCTION

OBJECTIFS

MÉTHODOLOGIE

PARTIE I : ETAT DE L'ART ET EVALUATION DES PROCEDES DE DIGESTION EN STEP **10**

1.	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	11
2.	PRÉTRAITEMENTS DES BOUES	14
2.1.	CONTEXTE	14
2.2.	TAMISAGE	14
2.3.	EPAISSISSEMENT	14
2.4.	DÉSINTÉGRATION	15
2.4.1.	MÉCANIQUE	15
2.4.2.	PHYSIQUE	16
2.4.3.	CHIMIQUE	17
2.4.4.	BIOLOGIQUE	17
2.4.5.	COMPARAISON	17
3.	LA DIGESTION ANAÉROBIE	18
3.1.	PROCESSUS	18
3.2.	RÉACTIONS BIOLOGIQUES	19
3.3.	CONDITIONS PHYSICO-CHIMIQUES	20
3.4.	TYPES DE DIGESTEURS	21
3.5.	PRINCIPAUX ACCIDENTS BIOLOGIQUES	22
3.6.	OPTIMISATION : LA CODIGESTION	23
4.	TRAITEMENT DES BOUES DIGÉRÉES	23
4.1.	DÉSHYDRATATION	24
4.1.1.	DÉSHYDRATATION STATIQUE	24
4.1.2.	DÉSHYDRATATION MÉCANIQUE	24
4.1.3.	DÉSHYDRATATION THERMIQUE	26
4.1.4.	EPURATION DE L'AIR DE SÉCHAGE	32
4.2.	DESTINATIONS ET UTILISATIONS	33
5.	VALORISATION DU BIOGAZ	35
5.1.	STOCKAGE	35
5.2.	TRAITEMENTS	36
5.2.1.	EPURATION DU BIOGAZ	36
5.2.2.	ENRICHISSEMENT DU BIOGAZ	38
5.3.	MODES DE VALORISATION DU BIOGAZ	40
5.3.1.	THERMIQUE	40
5.3.2.	COGÉNÉRATION	40
5.3.3.	INJECTION DE BIOMÉTHANE	43
5.3.4.	CARBURANT BIOMÉTHANE	43

PARTIE II : EFFETS DE LA DIGESTION EN STEP	44
6. EFFETS SUR LES BOUES	45
6.1. STABILISATION DES BOUES	45
6.2. MODIFICATION DE LA FRACTION FERTILISANTE	45
6.2.1. <i>EVOLUTION DES NUTRIMENTS N, P ET K</i>	45
6.2.2. <i>RÉPARTITION N, P, K APRÈS TRAITEMENT DU DIGESTAT</i>	46
6.2.3. <i>AMÉLIORATION DU PROCESSUS D'HUMIFICATION</i>	46
6.3. SIMPLIFICATION DE L'ÉLIMINATION ET VALORISATION	46
6.3.1. <i>RÉDUCTION DES VOLUMES</i>	46
6.3.2. <i>RÉDUCTION DES PATHOGÈNES</i>	47
7. EFFETS ÉNERGÉTIQUES	48
7.1. PRODUCTION D'ÉNERGIE	48
7.2. L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE EN STEP	49
7.3. BILAN ÉNERGÉTIQUE DES FILIÈRES BOUES	50
7.4. FOCUS SUR LE BILAN THERMIQUE	52
7.5. PRÉCONISATIONS ÉNERGÉTIQUES	53
7.5.1. <i>TROIS PISTES D'AMÉLIORATION</i>	53
7.5.2. <i>PRENDRE LES BONNES DÉCISIONS</i>	55
7.6. EVALUATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES	58
7.6.1. <i>OBJECTIFS</i>	58
7.6.2. <i>PRÉSENTATION</i>	58
8. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	59
9. SYNTHÈSE DES EFFETS DE LA DIGESTION DES BOUES	60
PARTIE III : FRANCE ET SUISSE, MOTIVATIONS DIFFÉRENTES POUR LA DIGESTION	63
10. DÉVELOPPEMENT EN FRANCE ET EN SUISSE	64
10.1. FRANCE	64
10.2. SUISSE	67
10.3. STRUCTURES DES PARCS DE DIGESTION EN 2012	69
11. VISIONS DES EXPLOITANTS SUISSES ET FRANÇAIS	71
11.1. MOTIVATIONS DES EXPLOITANTS	72
11.2. FACTEURS DE DÉVELOPPEMENT SELON LES EXPLOITANTS	73
12. LES FREINS À LA DIGESTION EN STEP	74
12.1. LES CINQ FREINS DES PROJETS	74
12.2. INTÉRÊT DE LA DIGESTION POUR L'EXPLOITANT	76
CONCLUSIONS	77
BIBLIOGRAPHIE	79
ANNEXE 1 : SCHEMA DE LA DIGESTION EN STEP	
ANNEXE 2 : QUESTIONNAIRE POUR ENQUETE	
ANNEXE 3 : ETUDES DE CAS - STEP MORGES (SUISSE) ET DE MORILLON (FRANCE)	
ANNEXE 4 : PLAQUETTE – DIAGNOSTIQUE ENERGETIQUE DE LA DIGESTION EN STEP	

Introduction

En 2012 l'énergie est au cœur des débats politiques et citoyens. Les Etats cherchent à as-soir leur indépendance énergétique et favoriser de plus en plus les « énergies vertes ». On constate aujourd'hui que dans les stations d'épuration

existent des gisements énergétiques encore peu ou mal exploités dans de nombreux pays Européens. La digestion anaérobie des boues est une solution pour valoriser ce potentiel et produire de l'énergie renouvelable. Les stations d'épuration sont des lieux privilégiés pour accueillir une installation de digestion car elles présentent une forte consommation éner-gétique et des besoins en chaleur relativement constants sur l'année. Elles ont accès sans dif-ficulté à la matière fermentescible qui arrivent continuellement à la STEP. Le site a déjà une fonction industrielle et un personnel technique est en place.

La directive européenne Energies Renouvelables (2009/28/CE) a fixé un objectif de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation brute d'énergie finale en 2020. Les pays membres de l'Union Européenne se voient dans l'obligation de transformer leur parc éner-gétique pour atteindre cet objectif. Compte tenu de l'augmentation actuelle du prix des énergies fossiles et de la raréfaction progressive des ressources, les STEP commencent à appréhen-der différemment les boues qu'elles ont longtemps considérées comme un simple déchet. C'est dans ce contexte que ce travail doit apporter des réponses à la question suivante :

Pourquoi certaines stations d'épuration pratiquent la digestion des boues alors que d'autres non ? En 2012, quels sont les moyens d'optimiser la digestion dans les STEP? Quelles sont les raisons qui expliquent les disparités de développement et de performances de cette technique ?

Pour répondre à cette question un plan en 3 parties est adopté. La première présente le fonctionnement de la digestion anaérobie en STEP et les technologies disponibles. La se-conde identifie les effets techniques, énergétiques et environnementaux de la digestion dans les stations d'épuration. Elle comporte une analyse énergétique particulière de la digestion et un outil pour évaluer les performances d'une installation en STEP en fournissant des pistes d'optimisation. La dernière partie compare le développement de cette technologie entre la France et la Suisse. Elle confronte les motivations des exploitants pour la digestion anaéro-bie dans ces deux pays.

Objectifs

Cette étude se présente comme un outil d'aide à la décision pour les exploitants de STEP ou les autorités compétentes désireuses de s'informer sur les différentes technologies de digestion en STEP. Elle rend compte de façon scientifique des aspects positifs et négatifs auxquels sont confrontés quotidiennement ces exploitants. Ce travail pourra être utile à toute personne voulant s'informer sur la digestion anaérobie des boues et sur les motivations des STEP pour cette technique. Cette étude a été réalisée dans le but de répondre à 3 objectifs :

- ✓ Expliquer l'organisation de la digestion en STEP et donner une vue d'ensemble des technologies existantes
- ✓ Identifier les raisons des disparités de développement de la digestion anaérobie des boues
- ✓ Identifier les moyens d'optimiser la digestion en STEP en apportant une aide à la décision quant au choix des procédés.

Méthodologie

Pour répondre aux objectifs de cette étude, le travail a été structuré en 3 parties. Un état de l'art et une évaluation des techniques de digestion en STEP, une analyse des effets de la digestion des boues avec la construction d'un outil pour optimiser la digestion en STEP et une comparaison du développement en France et en Suisse. Voici la démarche réalisée pour chacune de ces étapes.

Etat de l'art et évaluation des procédés de digestion en STEP :

Ce travail a consisté en une recherche et une synthèse bibliographique sur le thème de la digestion anaérobie des boues. Ces informations étaient soit en libre accès soit dans la bibliothèque interne du bureau EREP. Ce travail a été complété par les visites des stations d'épuration de Berne, de Morges (Suisse) et de Morillon (France). A ces occasions des entretiens et des questions ont permis de compléter le travail bibliographique. Des données techniques et économiques ont gracieusement été transmises par ces installations ce qui a permis d'étayer la rédaction.

Effets de la digestion en STEP :

Ce travail s'est essentiellement concentré sur une recherche et une synthèse bibliographique. Comme pour la partie précédente, ces informations étaient soit en libre accès soit dans la bibliothèque interne du bureau EREP. Des calculs supplémentaires ont été proposés pour approfondir les résultats de l'étude documentaire, ces derniers se sont basés sur les données techniques transmises par l'installation de Morges (Suisse). En ce qui concerne l'outil d'évaluation des performances énergétiques des installations de digestion en STEP, une recherche bibliographique spécifique sur les valeurs des paramètres de digestion et des indicateurs de performances a été conduite. Les données manquantes ont été complétées par les données internes du bureau EREP. Les actions d'optimisation sont le fruit d'une ré-

flexion compte tenu des résultats précédents. Cet outil a été testé avec les données de l'installation de Morges (Suisse).

Comparaison du développement en France et en Suisse

Un travail bibliographique sur le développement de cette technique dans ces deux pays a été réalisé. Les informations plus nombreuses sur le cas français ont conduit à une enquête postale auprès de STEP suisses pour produire des données comparables à la France. Pour cette partie, l'OFEV a été sollicité pour obtenir la liste des STEP suisses et identifier précisément celles qui pratiquent la digestion anaérobie. A partir de cette liste, (OFEV, 2007), un échantillon d'enquête a été construit avec un objectif de 43 STEP. L'échantillon d'enquête est construit selon la répartition du nombre de STEP par classe de grandeur:

	STEP en Suisse	Répartition STEP en Suisse (%)	STEP interrogées	Répartition STEP interrogées (%)	Répartition STEP pratiquant digestion (%) *
<2000 EH	306	37%	15	35%	3,80%
2001-10 000 EH	233	28%	11	26%	32,40%
10 001-50 000 EH	209	25%	10	23%	48,50%
50 001-100 000 EH	48	6%	3	7%	9,80%
>100 000 EH	32	4%	4	9%	5,40%
TOTAL	828	100%	43	100%	100%

Tableau 1 : Construction échantillon de STEP suisses enquêtées, sur base de (OFEV, 2007)

Partie I :

Etat de l'art et évaluation des procédés de digestion en STEP

1. Principe de fonctionnement

La digestion anaérobie est une étape optionnelle dans la chaîne de traitement des boues de STEP. Elle permet de stabiliser les boues, réduire leur volume et faciliter la déshydratation. Ce traitement produit également, sous l'action microbienne, un gaz énergétique qui peut être valorisé de différentes manières. La figure 1 illustre schématiquement les étapes de traitement des boues par digestion.

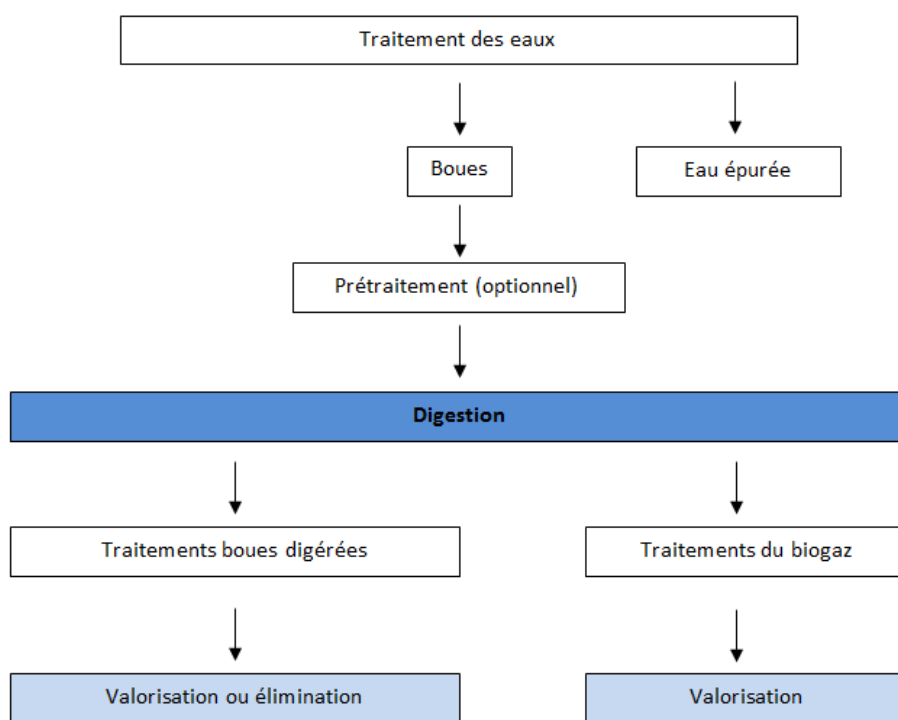


Figure 1 : Schéma du parcours d'une boue de STEP digérée

Les boues produites par les STEP peuvent être soumises à un prétraitement avant d'être introduites dans le digesteur dans l'optique d'améliorer l'efficacité du processus de digestion (c.f. chapitre 2). Les boues séjournent environ 25 jours dans le digesteur en conditions anaérobies pour permettre aux microorganismes de dégrader suffisamment la matière organique. Si d'autres déchets organiques, provenant de l'industrie agro-alimentaire par exemple, sont digérés avec les boues de STEP on parle de codigestion (c.f. chapitre 3). A la sortie du digesteur, les phases liquide et solide de l'effluent sont séparées. La fraction liquide est renvoyée en tête de STEP. La phase solide peut être compostée, épandue en agriculture, incinérée avec les ordures ménagères, servir de combustible dans les cimenteries ou être envoyée en centre de stockage (c.f. chapitre 4). Les options sont limitées selon les réglementations nationales. Notamment, l'incinération des boues est obligatoire dans certains pays. Le biogaz produit lors de la digestion est récupéré pour produire de l'énergie.

Une illustration plus détaillée des procédés est donnée dans la figure 2 (digestion des boues) et 3 (valorisation du biogaz et des boues digérées), intégrant les principales options technologiques.

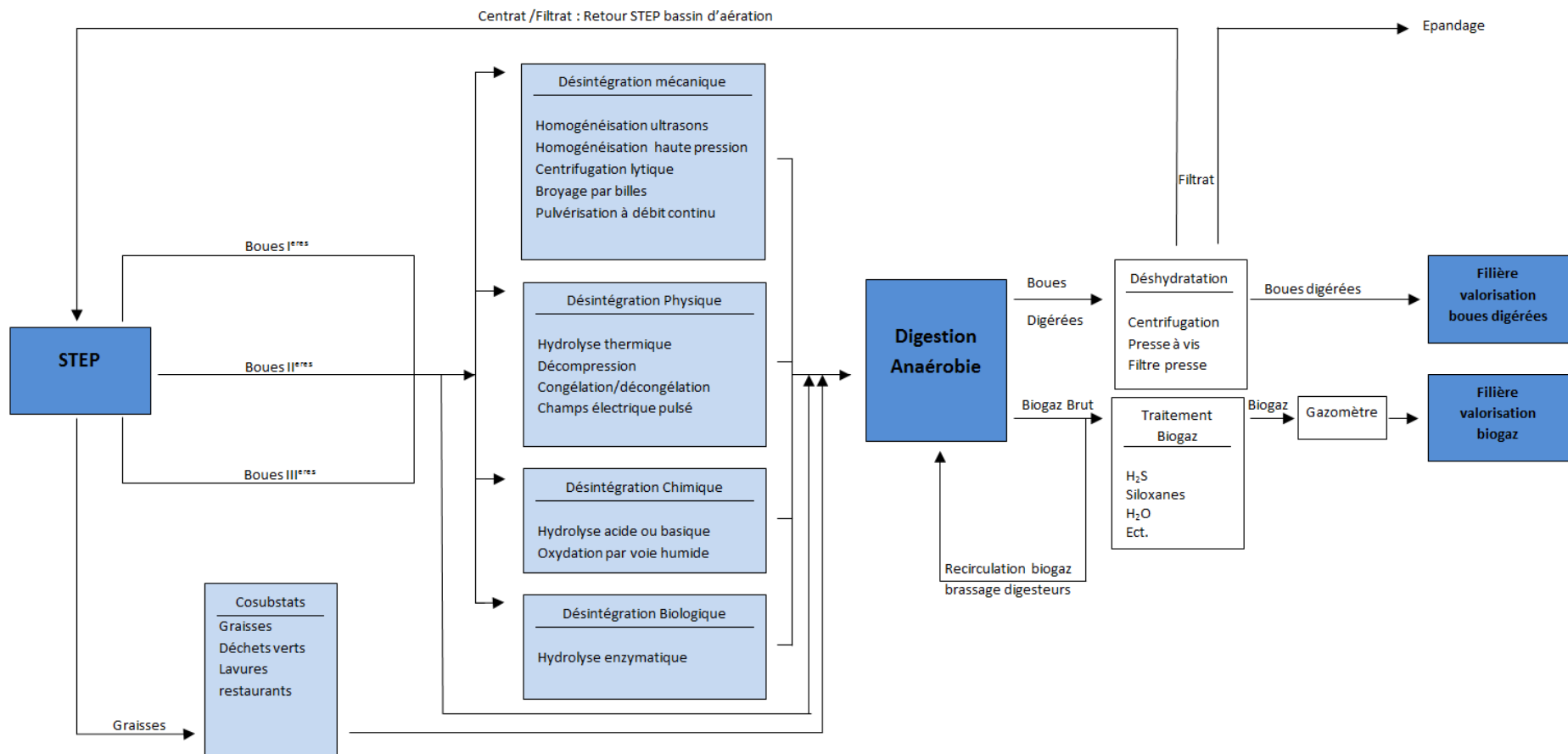


Figure 2 : Procédés de digestion anaérobie des boues de STEP

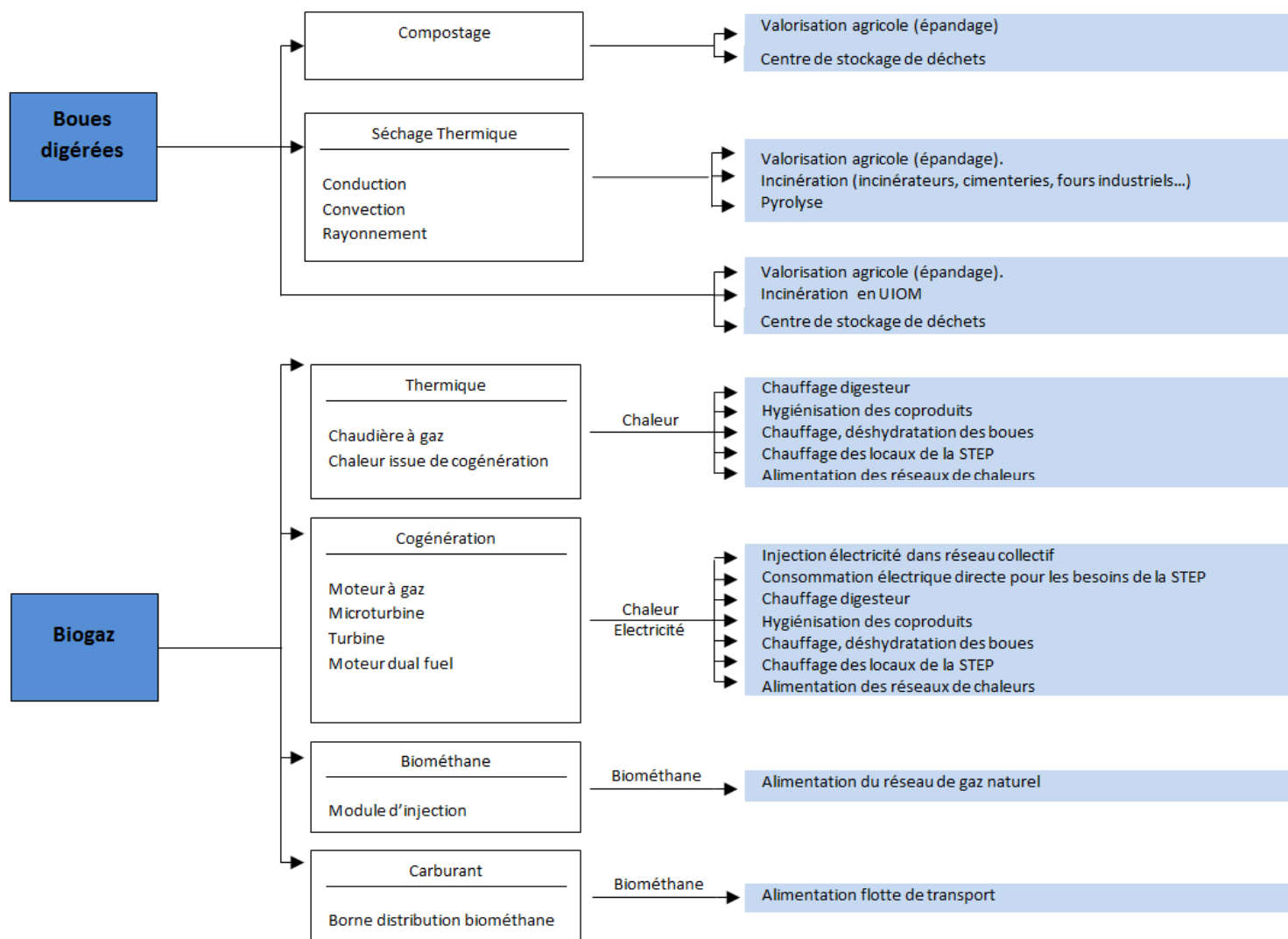


Figure 3 : Valorisation du biogaz et des boues digérées

2. Prétraitements des boues

2.1. Contexte

Lors de l'épuration des eaux usées différents types de boues sont produits. Leurs origines et leurs caractéristiques sont listées ci-après :

- Les **boues primaires** résultent de la décantation primaire des eaux usées, où les matières en suspension se déposent au fond du décanteur. La majorité des boues est issue de ce processus. Leur teneur en matière sèche (MS) est relativement élevée entre 2 et 4%.
- Les **boues secondaire** ou **boues biologiques** sont issues du traitement biologique de l'eau, tels que les boues activés ou les lits bactériens. Leur teneur en MS est réduite suite à l'aération et la dégradation microbienne. Elle se situe entre 0.8 et 2% MS.
- Les **boues tertiaires** ou **boues physico-chimiques** sont issues d'un traitement tertiaire des boues, comme par exemple la précipitation du phosphore. Elles constituent une très petite partie de l'ensemble des boues. Leur teneur en MS est généralement inférieure à 1%.
- Le mélange des boues est appelé **boues mixtes**. Leur teneur en MS varie entre 1 et 3 %, en fonction des traitements de chaque STEP.

La teneur en matière sèche et en matière organique des boues est une caractéristique importante pour la digestion anaérobie. Elles déterminent principalement le potentiel de réduction du volume des boues et la production de biogaz, respectivement d'énergie. Plus la teneur organique d'une boue est élevée, plus son pouvoir méthanogène augmente. Suite à l'aération et l'âge plus avancé des boues secondaires, ces dernières ont un pouvoir méthanogène plus faible que les boues primaires (qui n'ont pas été aérées). Habituellement, les STEP méthanisent les boues mixtes.

2.2. Tamisage

Les boues brutes peuvent contenir des particules grossières et fibreuses (coton tiges, cheveux, etc.) qui risquent de boucher les pompes et conduites. Egalement, elles peuvent provoquer des problèmes dans le digesteur, notamment des dépôts et des croûtes flottantes. Le tamisage avec une grille de l'ordre de 5mm permet d'éliminer ces particules. Pour éviter son colmatage, une grille plus grande (environ 10 à 12 mm) est généralement installée en amont du tamis.

2.3. Epaississement

En sortie de la ligne de traitement de l'eau les boues sont liquides, environ 2% de MS. L'épaississement concentre la MO contenue dans les boues pour optimiser le contact « microorganismes-substrat » et mieux exploiter la capacité du digesteur. Il consiste à retirer une

partie de l'eau contenue dans les boues pour augmenter la siccité jusqu'à 7% de MS (ADEME, 2003)². Il est possible de distinguer deux grands types d'épaississement :

- **Epaississement gravitaire** : les boues sont épaissies par sédimentation. Le séparateur lamellaire est couramment utilisé en STEP, le flot circule lentement dans une enceinte traversée par des plaques. Chaque plaque constitue un fond sur lequel peut se déposer la matière. Le temps de sédimentation est alors réduit.
- **Epaississement mécanique** : Il existe deux principaux procédés d'épaississement mécanique :
 - L'égouttage, la boue liquide s'écoule à travers un tamis, les matières avec un diamètre supérieur à la maille sont piégées. Ce principe est utilisé par les tables d'égouttage (filtre à bandes), ou les tambours d'égouttage.
 - La centrifugation, la force centrifuge sépare l'eau des particules en suspensions.

2.4. Désintégration

Avant d'entrer en digestion, les boues épaissies peuvent être désintégrées pour optimiser la digestion. L'objectif est d'augmenter la production de biogaz et de réduire le volume de boues résiduelles après digestion.

Ce traitement déstructure la matière organique, fragmente les agglomérats et lyse les membranes cellulaires. Le contenu enzymatique des cellules est déversé dans la matrice, ces protéines participent à la phase d'hydrolyse, première étape de la méthanisation (phénomène d'autolyse) (OFEN, 2007). Le principe de ce processus est illustré dans la figure 4.

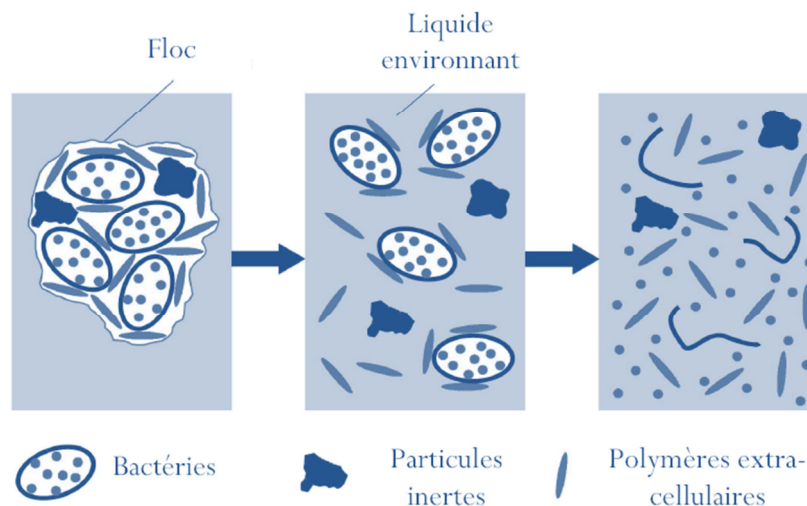


Figure 4 : Principe de la désintégration des boues de STEP (OFEN, 2007)

2.4.1. Mécanique

On distingue cinq techniques de désintégration mécaniques :

- **Homogénéisation ultrasons** : Des ultrasons à haute fréquences sont émis au travers des boues. Ils font vibrer les molécules qu'ils rencontrent. Des bulles de cavita-

tions éclatent et dégagent localement de la chaleur et de la pression : jusqu'à 5 000 °C et 2 000 bars (OFEN, 2007). Cette énergie lyse les membranes cellulaires et dissout les floccs

- **Homogénéisation haute pression** : Les boues sont pompées à travers une canalisation qui rétrécit brutalement et augmentent brusquement. Cette conduite génère de fortes turbulences responsables de la désintégration. L'utilisation de basse pression (50 - 200 bars) dissout uniquement les floccs, au-dessus (200 - 1200 bars) les cellules sont désintégrées (OFEN, 2007)
- **Centrifugation lytique** : Ce procédé utilise les centrifugeuses qui épaississent les boues. Un module d'extension lytique est adapté sur la centrifugeuse. La boue en rotation est extraite de la centrifugeuse en étant projetée contre un élément fixe, l'impact désintègre la matière (OFEN, 2007)
- **Broyage par billes** : Il s'agit d'une enceinte remplie à 70-90% d'éléments broyeurs (billes en zirconium ou verre). Les boues sont introduites dans l'enceinte et l'ensemble est mélangé par un agitateur. Les billes exercent des forces de cisaillements responsables de la désintégration (OFEN, 2007)
- **Pulvérisation à débit continu** : Les boues traversent un gicleur à débit continu dans des conditions de pression et de débit précises. Des bulles de cavitations désintègrent les boues (OFEN, 2007).

2.4.2. Physique

On distingue quatre techniques de désintégration physique :

- **Hydrolyse thermique** : Elle consiste à réduire les chaînes moléculaires par chauffage. Les boues sont soit directement mises en contact avec de la vapeur, soit chauffer via un échangeur de chaleur. L'hydrolyse peut être inférieure ou supérieure à 100 °C (elle s'effectue alors sous pression) (OFEN, 2007)
- **Décompression** : Elle utilise du dioxyde de carbone dans un état supercritique ($T > 31\text{ °C}$ et $P > 74\text{ bars}$). Dans ces conditions le CO_2 se comporte comme un liquide tout en ayant les propriétés physiques d'un gaz. Il est injecté au contact des boues, il diffuse au travers des membranes cellulaires, la pression de l'enceinte est alors réduite, il passe sous forme gazeuse, se dilate et détruit les membranes (OFEN, 2007)
- **Congélation/décongélation** : Les boues sont congelées, l'eau contenue entre les floccs se solidifie en occupant un volume plus important qu'à l'état liquide. Les floccs éclatent (OFEN, 2007)
- **Champs électrique pulsé** : Deux électrodes sont plongées dans la boue, elles génèrent des impulsions électriques qui provoquent des ondes de chocs responsables de la désintégration (OFEN, 2007).

2.4.3. Chimique

On distingue deux techniques de désintégration chimique :

- **Hydrolyse acide ou basique** : l'objectif est de réduire la taille des chaînes moléculaires par ajouts d'acides (H⁺) ou de bases (HO⁻) (OFEN, 2007)
- **Oxydation par voie humide** : elle met en jeu un gaz oxydant (l'oxygène, l'ozone ou le peroxyde d'hydrogène) au contact des boues chauffées. L'oxydation produit un rejet gazeux, un liquide biodégradable et un solide essentiellement minéral (OFEN, 2007). La dose appliquée est de l'ordre de 0,05 à 2,0 grammes d'ozone par gramme de MS (Müller et al., 2008).

2.4.4. Biologique

On distingue une technique de désintégration biologique :

- **Hydrolyse enzymatique** : Les hydrolases sont soit ajoutées pendant la digestion soit produites par la biomasse contenues dans les boues, c'est le phénomène d'autolyse (OFEN, 2007).

2.4.5. Comparaison

Les performances des procédés de désintégration sont très variables en fonction du degré de désintégration obtenu. Le tableau 2 montre différents producteurs fournisseurs d'unités de désintégration et les caractéristiques de leurs procédés (selon indications commerciales).

Producteur	Méthode	Type	Gain production de biogaz	Gain de volume sur MS
Lysatec Process	Mécanique	Centrifugation lytique	15%	/
Bellmer Desint.BD / Sonotronic	Mécanique	Homogénéisation à ultrasons	20%	10 à 20%
DMS	Mécanique	Homogénéisation à ultrasons	13%	/
Sonix TM	Mécanique	Homogénéisation à ultrasons	20%	/
VTA- GSD	Mécanique	Homogénéisation à ultrasons	11%	14 à 18%
ASTM	Physique	Hydrolyse thermique basse	17%	10 à 15%
Pondus process	Physique	Champs électriques pulsés	30%	/
Cambi	Physique	Hydrolyse thermique haute	20%	50%
Microsludge TM	Mixte: mécanique, chimique	Homogénéisateur haute pression et traitement basique	72%	59%
Zimpro ®	Chimique	Oxydation à l'oxygène	14%	28%

Tableau 2 : Effets de la désintégration sur la production de biogaz et le volume des boues (OFEN, 2007)

Les performances des procédés dépendent du principe de désintégration, du constructeur et de la structure de la boue. Pour deux constructeurs différents avec la même technique les résultats présentent des écarts significatifs (homogénéisateurs à ultrasons). Dans le cas du procédé Microsludge la production de biogaz pourrait être augmentée de +72%, ce qui reste peu probable au regard des autres résultats dont la moyenne est de +18% de biogaz. Les consommations énergétiques varient en fonction du type de désintégration :

	Energies consommées par kgMS et par m ³ de boues ¹⁾		Energie consommée par EH ²⁾	
	Electricité kWh/kgMS	Chaleur KWh/m ³	Electricité kWh.EH ⁻¹ .an ⁻¹	Chaleur kWh.EH ⁻¹ .an ⁻¹
Homogénéisation à ultrasons	1,5	/	7,49	/
Homogénéisation haute pression	0,3	/	1,50	/
Pulvérisation à débit continu	0,1	/	0,50	/
Centrifugation lytique	1,1	/	5,49	/
Broyage par billes	0,3	/	1,50	/
Champs électriques pulsés	d.n.d	/	d.n.d	/
Oxydation (ozone)	0,2	/	1,00	/
Hydrolyse thermique	> 0,02	>100	>0,10	> 4 700

1) Consommation d'énergie pour une hausse de 10% du degré de désintégration

2) Hypothèse: 30% des boues en excès sont traitées

Tableau 3 : Consommations énergétiques des procédés de désintégration, données constructeurs (sur base de Müller et al., 2008).

Les procédés qui consomment le plus d'énergie sont l'hydrolyse thermique (chaleur), les ultrasons, et la centrifugation lytique. A noter que cette dernière technique permet à la fois de désintégrer et d'épaissir les boues, son bilan global est donc meilleur. Les procédés qui sont les plus économes sont la pulvérisation à débit continu, l'oxydation et le broyage par billes.

3. La digestion anaérobie

3.1. Processus

La digestion anaérobie, ou méthanisation, est l'étape qui convertit l'énergie contenue dans un déchet organique sous forme de biogaz.

La matière organique contenue dans les boues est dégradée par des microorganismes pour subvenir à leurs besoins en conditions anaérobies. Leur métabolisme conduit à la production de biogaz contenant environ 60% de méthane.

3.2. Réactions biologiques

La méthanisation se déroule en quatre étapes successives, énoncées ci-après et illustrées dans la figure 5.

Hydrolyse : Etape de solubilisation des macromolécules organiques par lyse. Elles sont transformées en glucides, protéines et lipides (Deublein et Steinhauser, 2008). Cette phase réduit la longueur des chaînes moléculaires pour faciliter l'action microbienne qui suit.

Acidogénèse : Les monomères formés sont dégradés en acides gras volatils (acide butyrique, propionique, acétique), en alcools, en dihydrogène et en dioxyde de carbone (Deublein et Steinhauser, 2008).

Acétogénèse : Les produits de la phase précédente sont convertis en acétate en dioxyde de carbone et en dihydrogène

Méthanogénèse : A ce stade, deux voies sont possibles, soit l'acétate est utilisé pour produire du méthane et du gaz carbonique, soit le gaz carbonique et l'hydrogène présents sont utilisés pour produire du méthane. Cette étape est réalisée par des archaebactéries (SOLAGRO, 2001). Elles se distinguent des bactéries par une structure membranaire différente, une configuration particulière de l'ADN et un métabolisme qui leur est propre.

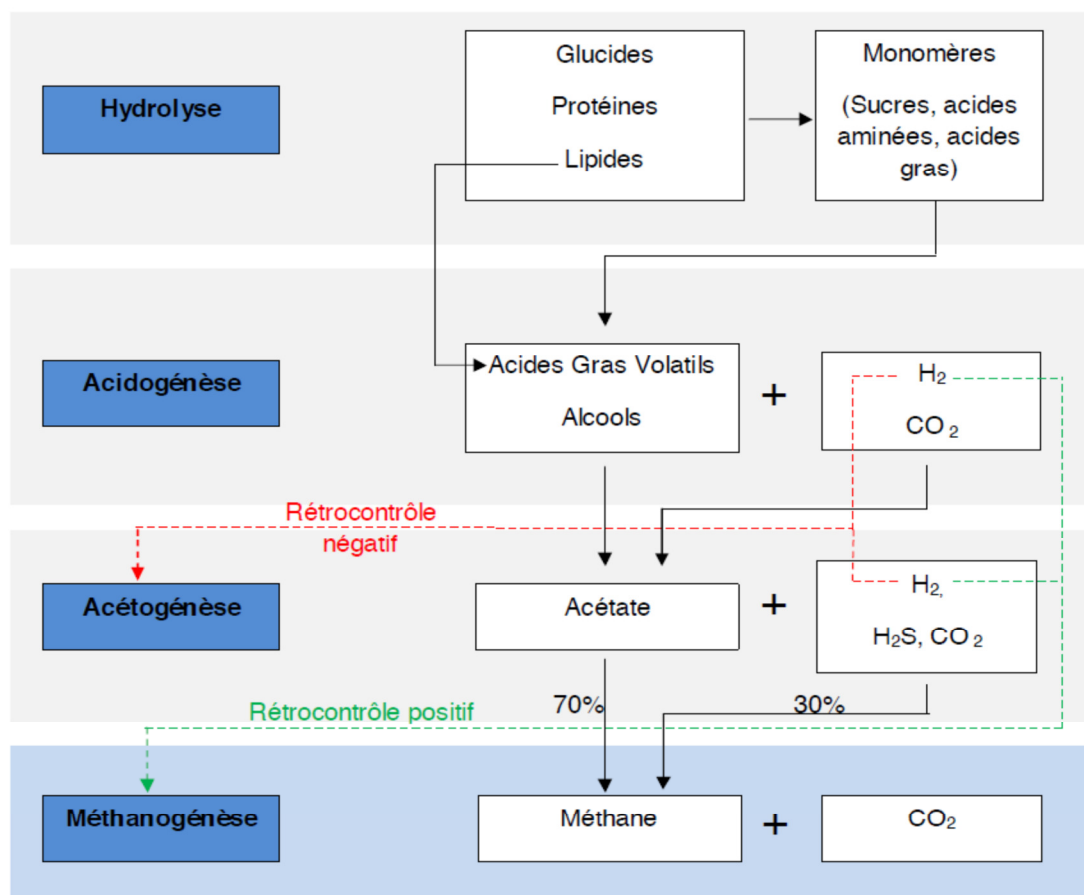


Figure 5 : Réactions biochimiques de la digestion anaérobie
(sur base de SOLAGRO, 2001, Deublein et Steinhauser, 2008 et RECORD, 2003)

L'action des archaebactéries (méthanogénèse) est entièrement dépendante du travail effectué en amont par les autres populations bactériennes. Des liens d'interdépendance unissent

ces populations qui sont à la fois en compétition et en coopération pour se développer. Chaque espèce remplit une fonction métabolique spécifique et indispensable à la survie de sa consœur. Cet équilibre dynamique est responsable de la production de biogaz.

3.3. Conditions physico-chimiques

On distingue 6 paramètres à respecter pour garantir une digestion performante :

- Teneur en eau : la digestion s'opère sur des substrats jusqu'à 51% de MS (Deublein et Steinhauser, 2008). Dans le cas de la digestion des boues, le substrat est liquide, la digestion se déroule à 5 % MS en moyenne.
- pH : neutre entre 6,8 et 8,5 (Deublein et Steinhauser, 2008).
- Conditions : anaérobie stricte
- Températures : il existe trois plages de température pour la digestion anaérobie :

Digestion thermophile :	50 à 58 °C
Digestion mésophile :	25 à 45 °C
Digestion psychrophile :	10 à 25 °C

La digestion en STEP est généralement mésophile. Ces gammes de températures correspondent aux plages de croissances idéales des microorganismes qui diffèrent selon la température de digestion choisie.

- Temps de rétention hydraulique : c'est le temps de séjour théorique des substrats dans le digesteur. La moyenne des temps de séjours en STEP en France est de 25 jours (Club Biogaz, 2011).
- Charge organique: c'est la quantité organique de matière que traite le digesteur par unité de volume et de temps. Elle s'exprime en kilogramme de Matière Volatile par mètre cube de digesteur et par jour ($\text{kgMV/m}^3.\text{j}$). La charge organique est idéalement de l'ordre de $2 (\pm 0,5) \text{ kgMV/m}^3.\text{j}$ en STEP.

La digestion est un système biologique en perpétuel évolution et oscille autour d'un point d'équilibre. Les populations microbiennes se développent et régressent en fonction de l'accès au substrat et des conditions physico-chimiques auxquelles elles sont soumises. Si un de ces paramètres s'éloigne de sa valeur de référence, l'activité biologique est stressée et les performances de digestion diminuent. Ces microorganismes ont une capacité de résilience qui leur permet après un stress de retrouver l'équilibre initial. Plus les conditions sont stables et l'alimentation en substrat est régulière, plus le développement biologique est performant.

3.4. Types de digesteurs

Trois formes de digesteurs sont principalement utilisées en STEP, illustrées dans la figure 6 :

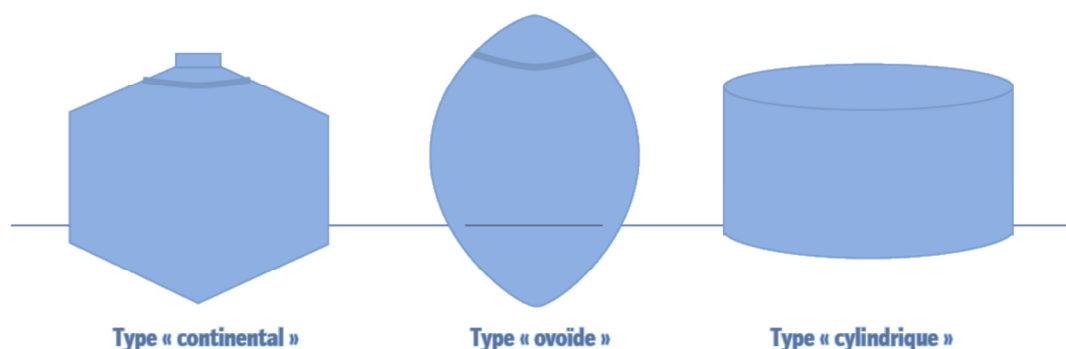


Figure 6 : Principaux types de digesteurs utilisés par les STEP (SOLAGRO, 2001)

En Europe, le digesteur le plus utilisé est le modèle « continental ». Sa hauteur est généralement égale à son diamètre. Le fond est conique pour récupérer les sables et les sédiments accumulés (SOLAGRO, 2001). En Allemagne les digesteurs de forme ovoïde se sont développés pour les installations de grande taille (p. ex. dans la STEP de Munich). Au Royaume Uni et en Scandinavie ce sont préférentiellement les digesteurs cylindriques qui sont employés (SOLAGRO, 2001). Il n'existe pas de digesteur avec des performances notablement supérieures. La forme résulte souvent du savoir-faire développé par les constructeurs locaux. D'autres facteurs comme la qualité des équipements fournis par le constructeur sont importants.

Le digesteur de la figure 7 est de type « continental » (SOLAGRO, 2001). Les boues épaissies sont introduites dans le digesteur (1) au contact des boues en digestion qui viennent d'être chauffées (6). Cela augmente la température des boues entrantes. Le digestat circule à travers un échangeur de chaleur tubulaire pour être maintenu à température. Il est brassé régulièrement par recirculation du biogaz sous pression (7, 10). Cela permet d'homogénéiser le digesteur, d'assurer une température de digestion identique dans l'ensemble de l'enceinte et de faciliter la remontée du biogaz. La quantité de boue introduite dans le digesteur détermine le débit de digestat évacué. Il quitte le digesteur grâce à un système de sur-verse (2). Au fond ce digesteur, on trouve une vanne de vidange pour vider le digesteur et effectuer des contrôles de structure et désensabler l'enceinte périodiquement (3). Le biogaz produit est évacué progressivement vers le gazomètre grâce à la légère surpression qui règne dans le digesteur. Le digesteur est équipé de dispositifs de sécurité. Si l'évacuation du biogaz ou du digestat s'effectue anormalement, une soupape de sur- ou sous-pression permet d'éviter tout risque de fuite (11). Ce système est doublé par un disque de surpression dimensionné pour rompre au-delà d'une pression déterminée (12). En cas de dysfonctionnement de l'évacuation classique du digestat (2), un système de secours permet d'évacuer les boues digérées (4). Ce dernier système s'ajoute à la vidange citée précédemment (3).

Jusqu'à 20% de biogaz supplémentaire peuvent être produits dans le post digesteur.

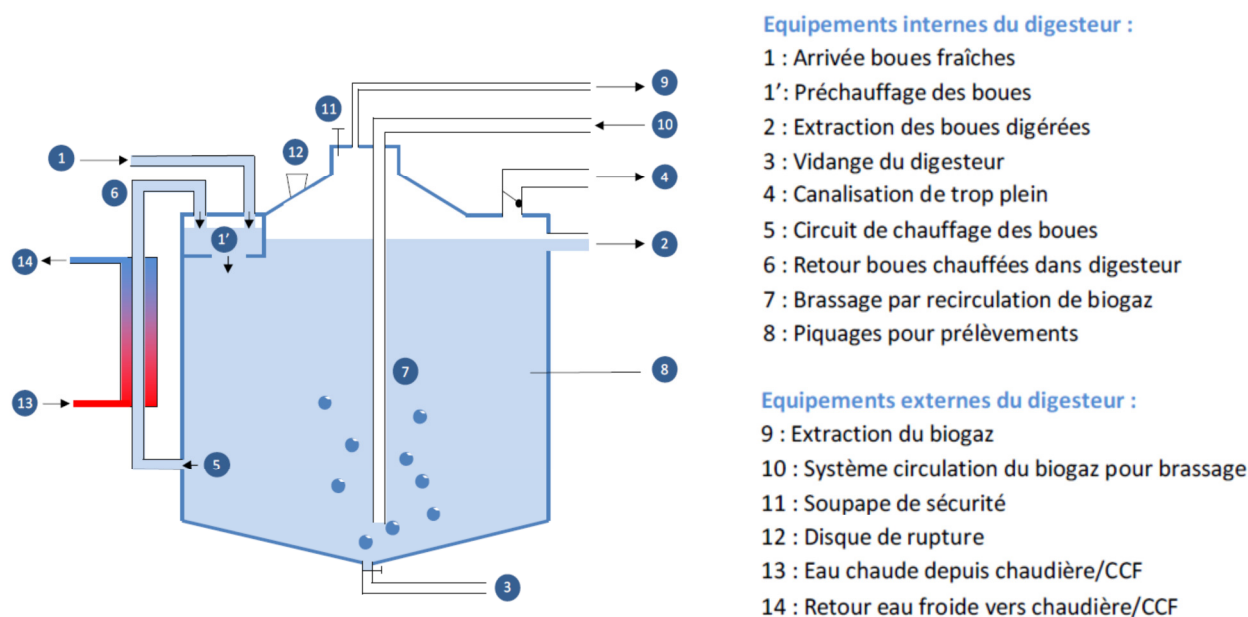


Figure 7 : Fonctionnement d'un digesteur de STEP (sur base de SOLAGRO, 2001)

Les formes de digesteurs sont variées et les principes de fonctionnement peuvent différer. Certaines stations d'épuration mettent en place un post-digester, également nommé digesteur secondaire, qui n'est généralement pas chauffé. L'inertie thermique du digestat permet d'entretenir une fermentation anaérobie dans ce second digesteur où il est possible de récupérer jusqu'à 20% de biogaz supplémentaire.

3.5. Principaux accidents biologiques

La digestion des boues d'épuration est un processus stable. Les problèmes biologiques sont rares, si les préconisations de base sont respectées (paragraphe 3.3). Néanmoins, des accidents biologiques peuvent se produire. Ci-après sont décrites les principales difficultés:

L'acidose est l'un des accidents biologique majeur sur un digesteur. Il a pour origine un mauvais équilibre de la ration (riche en lipides). Lors de la phase acidogène une accumulation d'acides gras volatils fait chuter le pH du digesteur. La production de biogaz diminue et s'arrête (Deublein et Steinhauser, 2008).

La surproduction de dihydrogène inhibe l'acétogénèse et bloque la méthanogénèse (Deublein et Steinhauser, 2008), dû à un emballement de la phase acidogène. Dans le cas de la monodigestion des boues ces phénomènes sont rares. La boue est le substrat majoritaire, sa composition est stable et les perturbations de la flore microbienne restent faibles.

Ces accidents se rencontrent sur des installations dont la gestion est intensive et qui codigèrent des substrats très méthanogènes (huiles, oléagineux etc.). La digestion repose sur des équilibres biologiques que doit prendre en compte l'exploitant.

3.6. Optimisation : la codigestion

La codigestion consiste à digérer simultanément des résidus organiques, appelés cosubstrats ou coproduits, avec les boues. L'objectif est d'augmenter la production de biogaz. Des exemples de cosubstrats sont nommés dans le tableau 4 ainsi que leur rendement en biogaz et la teneur en méthane du biogaz récolté.

Substrat	Rendement [m ³ biogaz / t _{MF}]	Teneur en CH ₄ [%]
Boues de STEP (liquides)	17,5	60
Lavures de restaurant	75,7	70
Drèche de brasserie	80,5	68
Sang d'abattoirs	111,0	53
Graisses de STEP	111,4	60
Graisses d'IAA	128,0	60
Biodéchets ménagers	147,0	57
Graisses d'abattoir	170,0	50
Huile comestible usagée	980,1	70

Tableau 4 : Pouvoir méthanogène des cosubstrats utilisés par les STEP
(Source interne EREP SA)

La codigestion suppose que le digesteur est capable d'accueillir des substrats supplémentaires et que la charge organique admissible n'est pas saturée. Pour certains cosubstrats la législation impose une hygiénisation avant digestion. Ce traitement de pasteurisation vise à détruire la flore pathogène (70°C pendant plus d'une heure (Club Biogaz, 2011)).

Dans le cas de la Suisse, où la totalité des boues est incinérée, il est préférable de digérer ces coproduits dans des installations de digestion agricoles ou industrielles qui permettent un retour au sol de la matière organique.

4. Traitement des boues digérées

On entend par « digestat » les substrats digérés extraits du digesteur, dans le cas des STEP on parle communément de « boues digérées ».

4.1. Déshydratation

A la sortie du digesteur une déshydratation du digestat est souvent réalisée pour réduire drastiquement le volume à manipuler. On distingue trois types en fonction du degré de déshydratation souhaité :

- Déshydratation statique
- Déshydratation mécanique (30% de MS)
- Déshydratation thermique, ou « séchage » (plus de 95% de MS)

Si un digestat subit une déshydratation thermique il doit avoir été au préalable déshydraté mécaniquement. L'eau et l'air issus de la déshydratation thermique contiennent des impuretés qui doivent être traités spécifiquement.

La digestion facilite la déshydratation car les floes sont déstructurés lors de la première phase de digestion (hydrolyse).

4.1.1. Déshydratation statique

Après digestion, les boues sont envoyées directement vers un stockage pour décanter. La gravité sépare l'eau des éléments solides contenus dans les boues digérées. Les matières les plus denses sédimentent sur le fond de la cuve alors que la phase liquide est pompée en surface. C'est un procédé rarement utilisé car la teneur en matière sèche des sédiments est très légèrement supérieure à la siccité moyenne des boues digérées (ADEME, 2010).

4.1.2. Déshydratation mécanique

Des forces mécaniques sont appliquées sur les boues digérées pour les déshydrater. La presse à vis et la centrifugeuse sont les plus utilisées :

Presse à vis : Elle traite un digestat à 5% de MS pour en extraire une fraction solide de l'ordre de 25 à 30% de MS (OFEN et EREP SA, 2009). Le digestat est filtré sur tamis. La fraction solide est envoyée à l'aide d'une visse vers une presse hydraulique. Elle est pressée contre une porte qui exerce une contre pression. Lorsque la pression exercée sur la fraction solide est supérieure à la contre pression de la porte, elle est expulsée. L'eau extraite est renvoyée en tête de STEP.

Centrifugation : Ce procédé a été présenté dans le paragraphe sur les techniques de désintégration. Dans ce cas la centrifugeuse n'est pas équipée du module d'extension lytique. La centrifugation permet de faire passer le digestat d'une teneur en matière sèche de 1 – 3% à 15 – 30% (OFEN et EREP SA, 2009).

D'autres systèmes de déshydratation peuvent être utilisés en STEP comme le filtre à bandes, le filtre presse, ou le filtre à membrane, tous ces systèmes ont des performances et des consommations énergétiques différentes :

	Teneur finale en MS (%)	Electricité consommée par m ³ de boue digérée (kWh/m ³)	Electricité con- sommée par EH (kWh/EH*an)
Epaississement statique	5 - 8	0,05 - 0,3	0,03 - 0,17
Presse à vis	23 - 28	0,3 - 0,5	0,17 - 0,28
Centrifugation	25 - 35	1,3 - 1,8	0,74 - 1,0
Filtre à bandes	23 - 28	0,35 - 0,8	0,20 - 0,45
Filtre-presse	28 - 40	1,0 - 2,2	0,6 - 1,2

Tableau 5 : Performances des procédés de déshydratation statique et mécanique du digestat (sur base de Müller et al., 2008)

La presse à vis est le procédé qui consomme le moins d'énergie pour une teneur maximale en sortie de 28% de MS. La centrifugeuse permet d'atteindre 35% de MS mais elle consomme 3 fois plus d'énergie que la presse à vis. La figure 8 illustre les consommations énergétiques des systèmes de déshydratation mécanique.

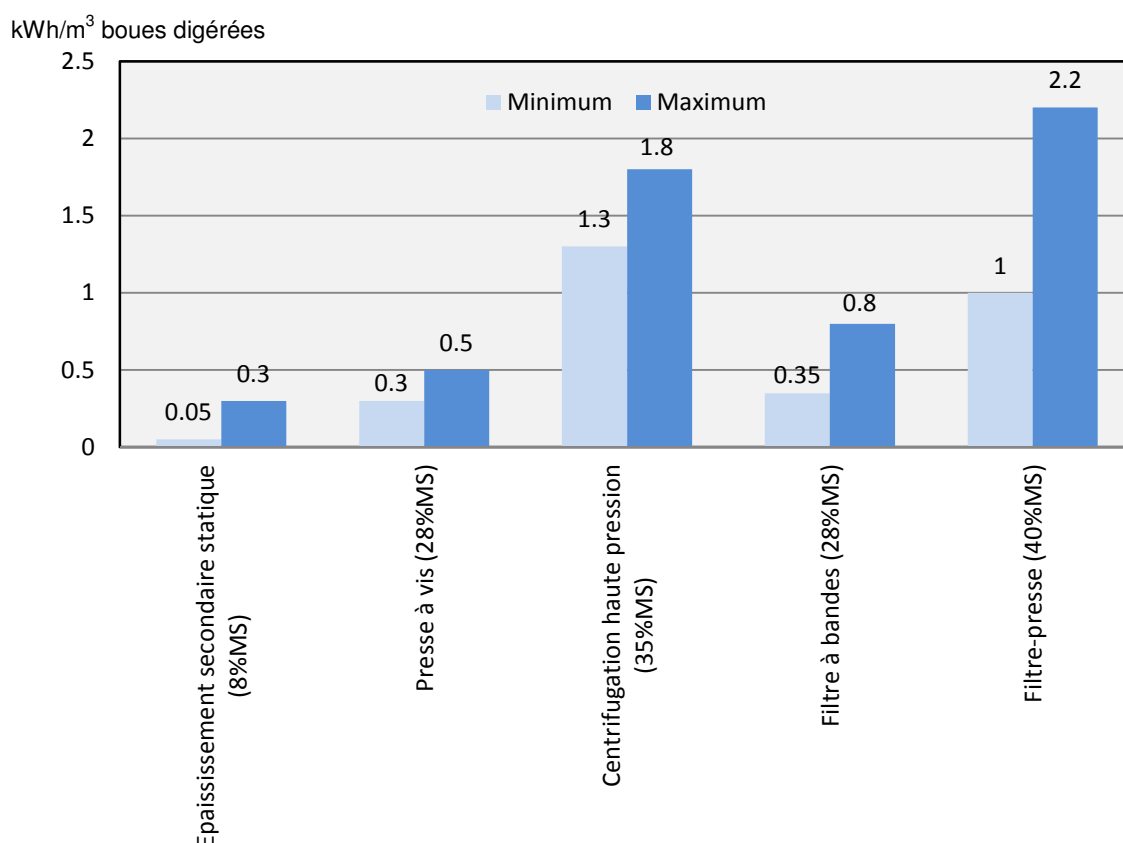


Figure 8 : Consommations électriques des procédés de déshydratation statique et mécanique (Müller et al., 2008)

L'épaississement statique est économe en énergie mais la siccité des boues obtenues est très faible, il peut être envisagé dans le cas d'une simple valorisation du digestat en agricul-

ture car cette filière ne nécessite pas une siccité élevée des boues. La déshydratation mécanique implique un stockage de la fraction liquide et un retour en tête de STEP pour traitement. La fraction solide doit être stockée sur une plateforme avant évacuation.

La déshydratation mécanique permet au digestat de subir des traitements qui étaient jusqu'à ce stade impossibles, c'est le cas de la déshydratation thermique (« séchage ») ou de l'incinération en UIOM.

4.1.3. Déshydratation thermique

La déshydratation thermique vise à retirer l'eau du digestat jusqu'à plus de 90% de MS pour diminuer drastiquement le volume des boues digérées. Cela permet au digestat d'accéder à de nouvelles filières de valorisation : l'utilisation comme combustible renouvelable (p.ex. incinération en cimenterie).

De la chaleur est utilisée pour chauffer et vaporiser l'eau contenue dans les boues digérées. La déshydratation thermique met en jeu trois manières de véhiculer la chaleur, la conduction, la convection ou le rayonnement ce qui permet distinguer 3 catégories de sècheurs :

- Sècheurs directs : le fluide caloporteur est en contact direct avec la boue
- Sècheurs indirects : une paroi chaude provoque le séchage
- Sècheurs mixtes : indirects + directs

▪ Séchage direct

Sécheur à tambour (ou rotatif) : La boue digérée est introduite dans un cylindre rotatif dans lequel circule de l'air chaud et sec (co-courant ou contre-courant). Le cylindre est légèrement incliné, sous l'effet de la rotation et de la légère pente, la boue progresse. La boue sèche est éjectée à l'autre extrémité du cylindre (ADEME, 2010)

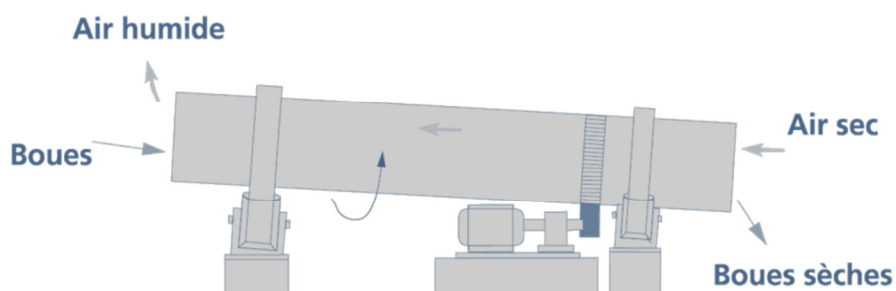


Figure 9 : Sécheur à tambour (ADEME, 2010)

Sécheur à lit fluidisé (ou pneumatique) : Un injecteur pulvérise la boue digérée dans le sécheur. Elle rencontre un air chaud et sec qui met en suspension les petits agrégats. La boue digérée est alors séchée. Un séparateur récupère la fraction sèche et évacue l'air humide (ADEME, 2010).

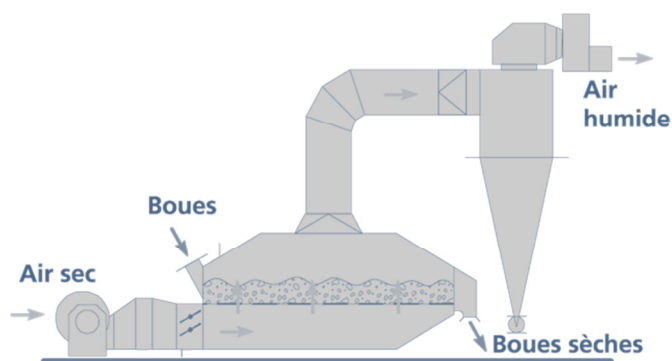


Figure 10 : Sécheur à lit fluidisé pneumatique (ADEME, 2010)

Sécheur flash (ou atomiseur): Un injecteur introduit dans une cuve la boue digérée. Il vaporise le digestat en fines particules qui rencontrent un air chaud et sec. La pulvérisation augmente la surface d'évaporation et le séchage est instantané. Les boues sèches sont collectées. (ADEME, 2010).

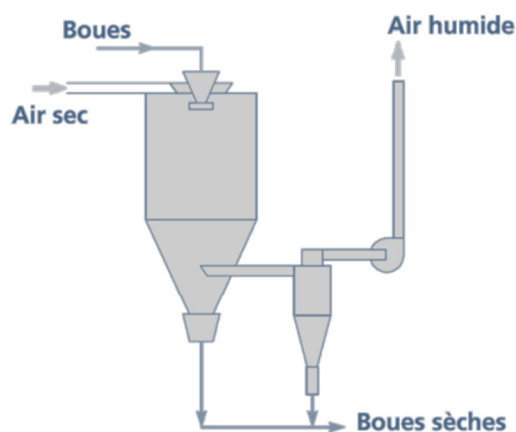


Figure 11 : Sécheur flash (atomiseur) (ADEME, 2004)²

Sécheur à bandes : La boue digérée est introduite sur un tapis perforé (les bandes). De l'air chaud et sec est soufflé au travers et au-dessus des boues. L'air se charge en humidité et les boues sèches sont expulsées à l'autre extrémité de la machine (ADEME, 2010).

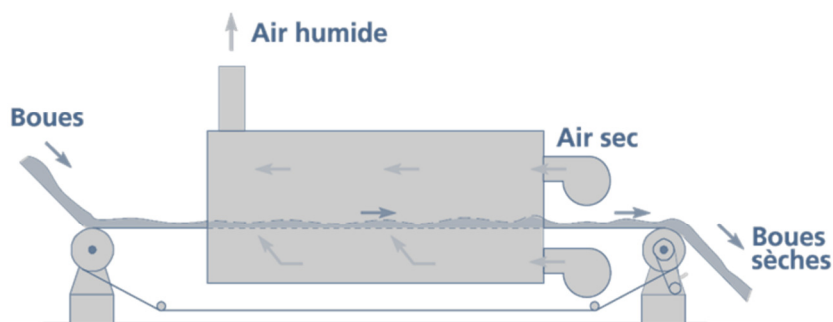
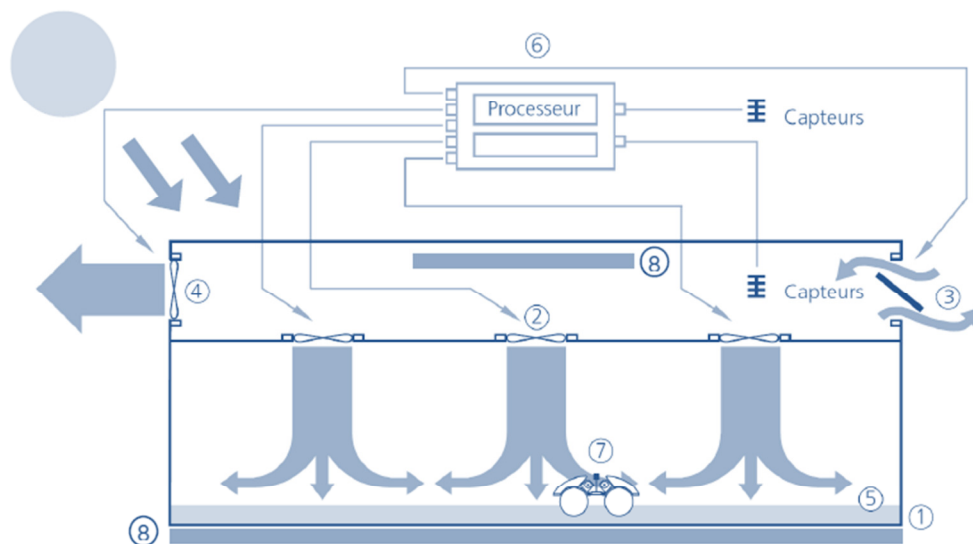


Figure 12 : Sécheur à bandes (ADEME, 2010)

Sécheur solaire : Les boues digérées sont épandues sur une hauteur de 30 cm dans une serre (ADEME, 2004)². Les rayons infrarouges du soleil réchauffent l'enceinte. Des ventilateurs soufflent l'air chaud accumulé dans la partie haute de la serre sur les boues digérées. La capacité évaporatoire est de l'ordre de $3\text{m}^3.\text{an}^{-1}.\text{m}^{-2}$ selon la zone géographique considérée. C'est un système avec une forte empreinte au sol (OFEN et EREP SA, 2009). La siccité peut être portée jusqu'à 80% de MS. Un système de chauffage de l'air assure un séchage constant tout au long des saisons (OFEN et EREP SA, 2009).



- 1- **Enveloppe du bâtiment** : enveloppe fermée, hautement transparente, résistante à la grêle, au vent et aux charges de neige. Empêche la circulation d'air incontrôlée et les déperditions de chaleur.
- 2- **Circulation d'air interne** : Des ventilateurs réglés, situés à l'intérieur, assurent une vitesse optimale des flux d'air au-dessus du digestat, indépendamment des conditions ambiantes.
- 3- **Volets d'aération** : Adaptent la circulation d'air aux exigences du séchage.
- 4- **Circulation d'air à l'aide de ventilateurs** : Des ventilateurs modulables assurent l'apport de grands volumes d'air et permettent l'utilisation du potentiel naturel de séchage de l'air ambiant, indépendamment des vents existants.
- 5- **Digestat**
- 6- **Réglage climatique** : Une commande centrale de réglage et de pilotage traite les données mesurées, règle et contrôle tous les composants. Elle optimise le processus de séchage en fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques du digestat.
- 7- **Système de mélange continu du digestat** : des robots de retournement automatiques brassent, retournent et transportent le digestat.
- 8- **Chauffage additionnel** : possibilité qui permet d'utiliser la chaleur excédentaire du CCF.

Figure 13 : Sécheur solaire (sur base de OFEN et EREP SA, 2009)

▪ Séchage indirect

Sécheurs à tambours rotatifs : Les boues digérées sont introduites dans un cylindre rotatif. Dans la paroi circule un fluide caloporteur chaud (vapeur d'eau, huile). Il met en mouvement et chauffe la boue en évaporant l'eau. La fraction sèche est expulsée à l'autre extrémité du cylindre (ADEME, 2010).

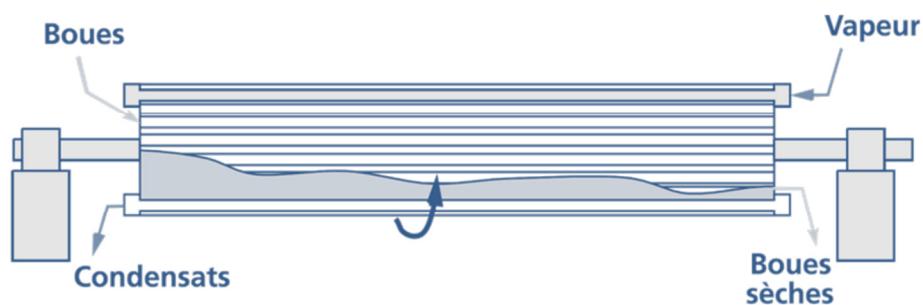


Figure 14 : Sécheur à tambours rotatifs (ADEME, 2010).

Sécheur à palettes : Procédé identique au sécheur à tambour rotatif, mais dans ce cas le tambour est immobile et ce sont des palettes qui brassent et sèchent. Comme dans le cas du tambour rotatif, un fluide caloporteur circule dans la paroi du cylindre pour chauffer les boues digérées (ADEME, 2010).

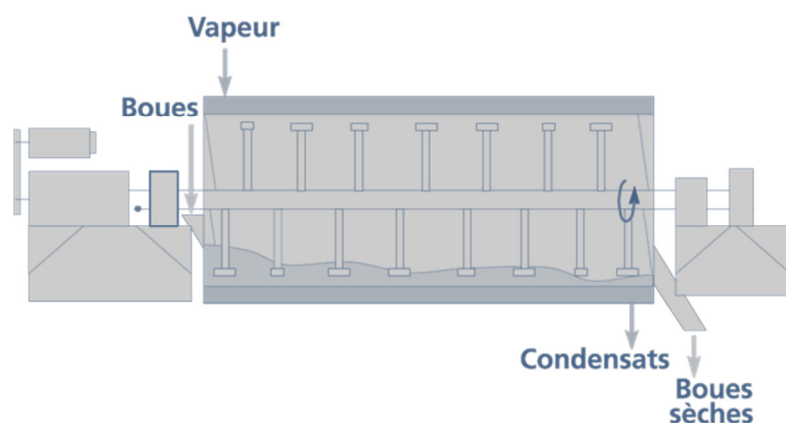


Figure 15 : Sécheur à palettes (ADEME, 2010)

Sécheur à disques : Idem que le sécheur à palettes, mais les palettes sont remplacées par des disques qui chauffent les boues digérées (ADEME, 2010).

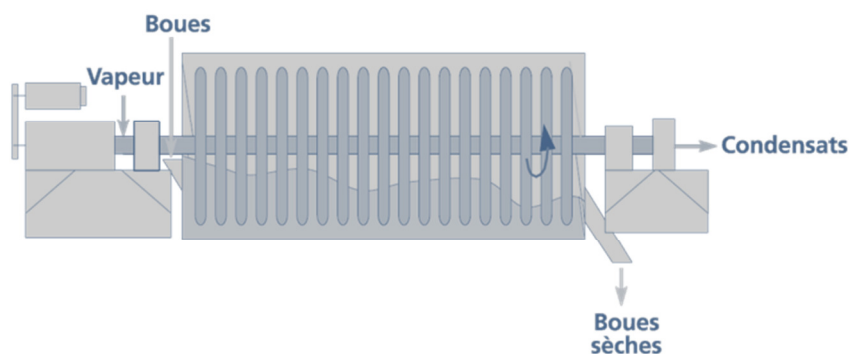


Figure 16 : Sécheur à disques (ADEME, 2010)

Sécheur à couche mince : Le digestat est introduit entre un tapis et un rouleau chauffé. Le rouleau étale et chauffe les boues digérées sur le tapis, l'eau se vaporise. Le rouleau est mis en rotation lentement ce qui permet le convoyement des boues. Un couteau racle la boue qui adhère au rouleau et les boues sèches sont évacuées (ADEME, 2010).

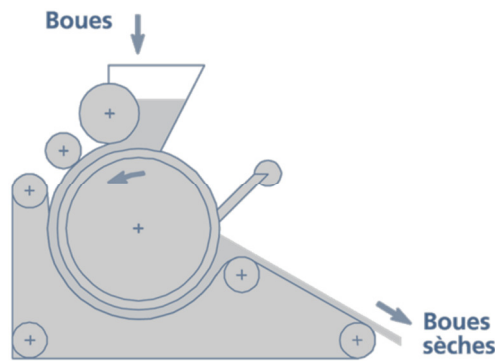


Figure 17 : Sécheur à couche minces (ADEME, 2010)

Sécheur par évaporation - condensation : Les boues digérées sont introduites dans une enceinte dont les parois sont chauffées (55 à 65°C). L'eau contenue dans les boues digérées se vaporise. Pour augmenter le séchage, l'enceinte est placée sous vide (-200mbar). Cela permet d'abaisser la température d'évaporation (OFEN et EREP SA, 2009). Pour éviter la volatilisation de l'azote ammoniacal (NH_3), une solution acide diminue le pH des boues digérées (NH_4^+ , non volatil) (OFEN et EREP SA, 2009).

▪ Séchage mixte

Les sécheurs mixtes sont des systèmes qui combinent à la fois un séchage direct et indirect. Deux systèmes peuvent être cités :

Séchage conductif et convectif : Ce sont des sécheurs à palettes équipés d'une circulation d'air chaud ou des sécheurs à lit fluidisé dont les parois sont chauffées (ADEME, 2004)².

Séchage radiatif et convectif : Ce sont des sécheurs à bandes dont les parois sont chauffées (ADEME, 2004)².

Les performances des sécheurs varient en fonction de la technique utilisée, comme il est illustré dans le tableau 6.

		Sécheur à lit fluidisé	Sécheur à tambour	Sécheur à disques	Sécheur à couche mince	Sécheur à bandes	Séchage solaire
Taille STEP la plus adaptée	EH	> 100 000	> 100 000	> 100 000	20 000 - 300 000	15 000 – 100 000	5 000 – 100 000
Evaporation de l'eau	kg _{eau} /h	> 1 500	> 1 501	> 1 502	< 3 000	< 1 500	< 1 500
Teneur en MS (min. initial)	% MS	25 - 33	25 - 33	25 - 32	25 - 32	25 - 30	3 - 30
Teneur en MS (max. final)	% MS	> 90 %	> 90 %	> 90 %	> 90 %	90	40 - 90
Energie électrique par tonne d'eau évaporée							
Electricité	kWh/ t _{eau}	64 - 93	85	64	128 -156	129	10 - 30
Energie thermique par tonne d'eau évaporée							
Chaleur	kWh/ t _{eau}	820 - 880	800 - 865	876	790 - 850	863	0
Possibilité d'utiliser de la chaleur externe pour les besoins du sécheur	%	/	/	/	10%	100%	Energie solaire
Possibilité de récupérer la chaleur résiduelle pour d'autres usages	%	10 - 90 %	20 - 50%	37%	50%	%	/
Besoins en énergie par tonne de boues déshydratées							
Energie électrique	kWh/ t _{BD}	52	57	43	95	86	13
Energie thermique	kWh/ t _{BD}	567	555	584	546	575	0
Besoins en énergie par tonne de MS							
Energie électrique	kWh/ t _{BD}	174	189	142	316	287	44
Energie thermique	kWh/ t _{BD}	1 889	1 850	1 947	1 818	1 918	0
Besoins en énergie par EH							
Energie électrique	kWh/ EH.an	3,8	4,1	3,1	6,9	6,3	1,0
Energie thermique	kWh/ EH.an	41,4	40,5	42,6	39,8	42,0	0

Tableau 6 : Performances des procédés déshydratation thermique (sur base de Müller et al., 2008)
 (*BD, Boues Déshydratée)

Le sécheur solaire est de loin le plus économe en énergie avec seulement 1,0 kWh/EH.an. En revanche l'emprise au sol nécessaire peut s'avérer incompatible avec l'implantation de la STEP. C'est le sécheur à tambour qui arrive en seconde position avec une consommation de 45,0 kWh/EH.an. Arrive ensuite le sécheur à lit fluidisé (45,2 kWh/EH.an) suivi de près par le sécheur à disque (45,7 kWh/EH.an). Les plus gros consommateurs d'énergies sont le sécheur à couche mince avec 46,7 kWh/EH.an et le sécheur à bandes avec 48 kWh/EH.an. C'est donc le sécheur solaire qui est recommandé en priorité si l'ensoleillement et l'espace disponible sont suffisants. De manière plus conventionnelle, on retiendra les sécheurs à lit fluidisé et à tambour.

A noter que la déshydratation thermique n'est possible que sur les boues digérées avec une siccité supérieure à 15 - 20% de MS (ADEM, 2004)². En dessous de ces valeurs la déshydratation mécanique est plus efficace et moins coûteuse. Le coût de la déshydratation thermique diminue si une source de chaleur est à disposition sur la STEP (récupération de chaleur du CCF).

4.1.4. Epuration de l'air de séchage

La déshydratation thermique des boues digérées produit un air humide qui contient des composés toxiques ou malodorants comme l'H₂S ou le NH₃. Des traitements pour épurer l'air avant évacuation sont nécessaires. Quatre familles de procédés permettent de traiter cet air vicié (Club Biogaz, 2011):

- Lavage de l'air en solution aqueuse (eau simple ou avec additifs)
- Adsorption sur solide
- Traitement biologique
- Oxydation thermique ou catalytique

Ces procédés sont décrits dans le tableau 7. Les systèmes qui mettent en jeu une combustion ou des composés chimiques sont les plus coûteux (lavage en solution 15€/m³/h ; oxydation catalytique ou thermique 21€/m³/h), en contrepartie, leur efficacité est élevée. Le traitement par lavage en solution est le procédé avec la plus grande plage de fonctionnement (débit usuel et composés interceptés), c'est l'une des raisons qui explique qu'il soit couramment utilisé en STEP.

	Lavage en solution	Biofiltre	Adsorption sur solide	Oxydation catalytique ou thermique
Principe	Passage de l'air dans solution. Soit lavage acide (contre ammoniac) soit lavage soude + javel (contre composés soufrés réduits)	L'air traverse le milieu support de bactéries (tourbe ou eau). Prétraitement nécessaire sur forte concentration azote. Période d'adaptation bactéries si variation de charges (quelques semaines)	Adsorption sur solide des molécules odorantes. Nécessité d'imprégnation chimique en cas de petites molécules à traiter (H ₂ S, NH ₃)	Oxydation par combustion
Efficacité	Performant sur tous composés odorants	Performant sur composés organiques, notamment soufrés, moyenne sur ammoniac	Performant sur tous composés odorants si support solide imprégné (H ₃ PO ₄ pour NH ₃ et K ₂ CO ₃ pour H ₂ S)	Performant sur les solvants et fortes concentrations
Plage débits (Nm³/h)	3 000 - 200 000	0 - 20 000	0 - 5 000	0 - 22 000
Investissement moyens (débit 2'000 m³/h)	15 €/m ³	8 €/m ³	6 €/m ³	21 €/m ³
Consommable	Eau, acide sulfurique, Hydroxyde de sodium, Hypochlorite de sodium, électricité	Eau, électricité, garnissage	Electricité, support adsorbant (charbon actif, gel de silice etc.)	Electricité, combustible
Déchets	Déchets liquides acides, déchets liquide oxydo-basiques	Déchets liquides acides + bactéries en suspensions	Charbon actif	
Suivi et entretien	Mensuel: étalonnage sondes. Annuel: vidange + nettoyage laveurs	Annuel (réensemencement)	Renouvellement adsorbant	Annuel
Points forts	Grande souplesse vis-à-vis variation de charges et de débit. Régulation possible, mise en route instantanée. Procédé courant, bon retour d'expériences	Bien adapté aux débits importants et faibles concentrations. Faible coûts investissement et fonctionnement. Aucun produit polluant nécessaire	Tolère les variations de débit importantes. Exploitation simple	Adapté aux COV et mélanges complexes. Performance élevée
Points faibles	Manipulation produit chimiques. Coût consommables. Traitement du résidu liquide (possible en STEP)	Chemins d'écoulement des gaz, limitation des surfaces de transfert. Encombrement possible des filtres. Ensemencement lent	Coût fonctionnement élevé, renouvellement adsorbant en fonction du débit et de la concentration	Coût énergétique élevé

Tableau 7 : Comparaison des traitements de l'air issu de la déshydratation thermique des boues digérées (Club Biogaz, 2011)

4.2. Destinations et utilisations

Les différents degrés de déshydratation conduisent à différents traitement et différentes destinations finales des boues digérées. Les filières d'élimination à disposition des STEP varient également d'un pays à l'autre. La figure 18 montre, sans tenir compte d'un pays en particulier, les filières que peuvent rejoindre les boues digérées.

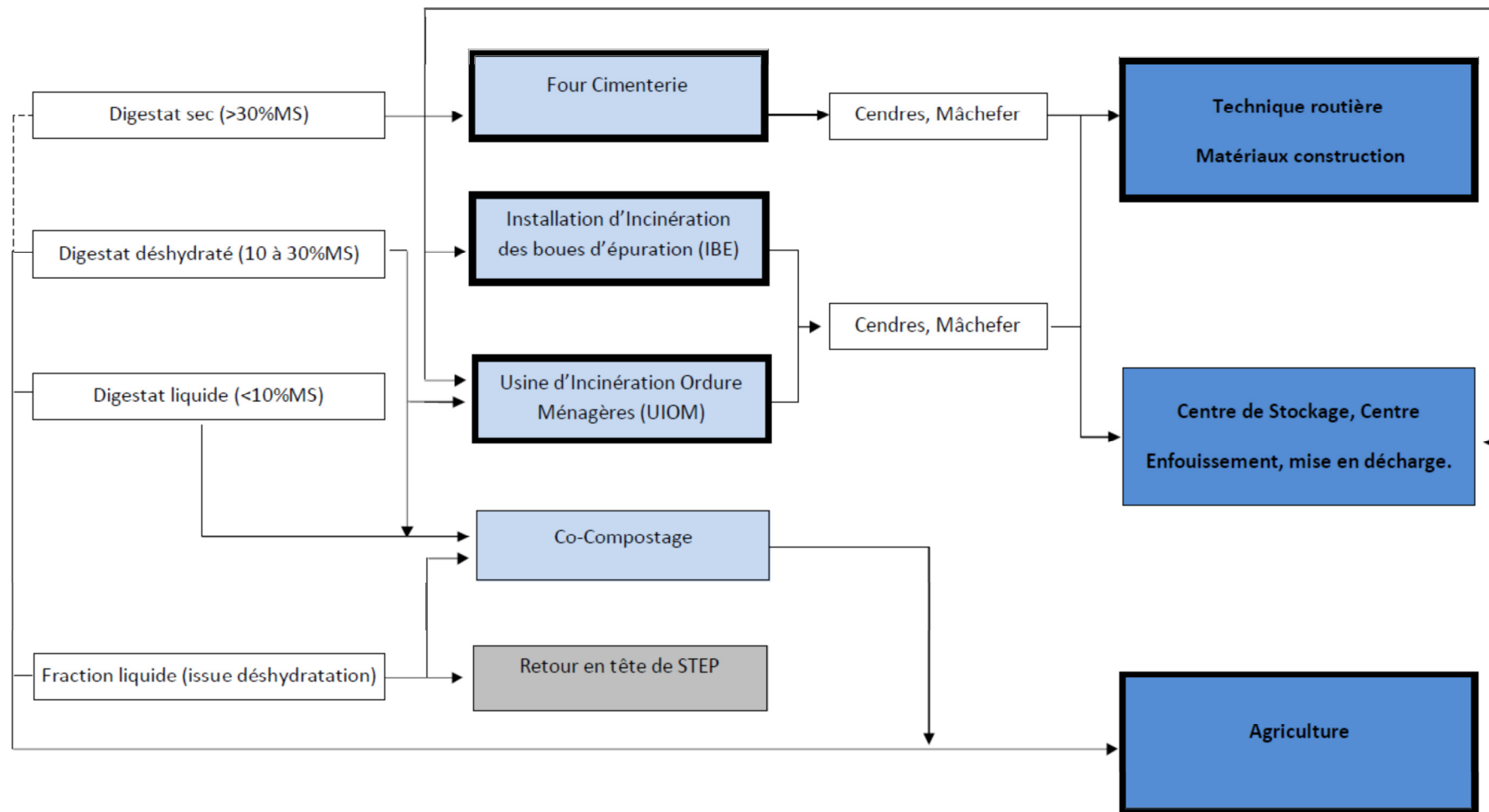


Figure 18 : Filières d'élimination des boues digérées de STEP (sur base de SOLAGRO, 2001; ADEME, 2003³ ; Bertholon J, 2002)

Il est important de distinguer les étapes de traitements du digestat du lieu de réception final des boues, c'est-à-dire l'endroit précis où les boues et leurs résidus disparaissent. Une fois déshydratées, les boues digérées peuvent encore subir 4 traitements de valorisation :

- **Le compostage** : le digestat liquide ou déshydraté est composté avec des déchets verts. Le digestat est hygiénisé et la fraction organique est humifiée.
- **L'incinération en cimenteries** : le digestat se substitue aux combustibles utilisés par les fours et l'énergie thermique dégagée est utilisée pour la fabrication du ciment.
- **L'incinération en UIOM** : le digestat est co-incinéré avec des déchets ménagers, l'énergie thermique est valorisée en électricité, en chauffage etc.
- **L'incinération en IBE** : l'énergie thermique produite lors de l'incinération est valorisée en chaleur ou en électricité

Les boues digérées et les produits de ces derniers traitements peuvent rejoindre 3 destinations finales distinctes :

- **L'agriculture** : le compost, les 3 types de digestats et la phase liquide peuvent être retournés au sol et se substituer aux engrais de synthèse. L'apport de MO, stabilise la structure des sols. Cette pratique est autorisée en France mais soumise au plan d'épandage, elle est interdite en Suisse depuis 2006.
- **Le centre d'enfouissement technique** : le mâchefer ou le digestat sec sont déposés pour être stocké.
- **Le secteur de la construction** : Le mâchefer issu de la combustion des boues digérées dans les UIOM, des cimenteries et des IBE est utilisé en remblais pour la construction de routes et de matériaux tels que le carrelage (Bertholon J, 2002).

Il est intéressant de noter que l'agriculture est à la fois un lieu de traitement du digestat et une destination finale. Dans certains pays comme la France, c'est également la seule destination finale capable de supporter l'ensemble des différents digestats ainsi que la fraction liquide. A noter également que le digestat sec peut être directement envoyé en centre de stockage.

5. Valorisation du biogaz

5.1. Stockage

Le biogaz qui sort du digesteur est stocké temporairement dans un gazomètre avant d'être valorisé. Les gazomètres sont des réservoirs tampons capables d'amortir les variations de production pour assurer une alimentation continue des systèmes de valorisation.

En STEP, le gazomètre n'est habituellement pas intégré dans le digesteur, comme c'est souvent le cas en agriculture. Le stockage externe sous double membranes souples est très utilisé. La légère pression dans le digesteur évacue le biogaz vers le gazomètre. Une première membrane sphérique contient le biogaz. Elle se gonfle et se dégonfle en fonction de la production de biogaz. Une seconde membrane est installée par-dessus la première et entre les deux un ventilateur souffle de l'air. Le ventilateur régule le débit entre les deux membranes pour qu'une pression constante soit appliquée sur le biogaz. Dans le gazomètre, le

biogaz est légèrement sous pression, il peut être expulsé dans les conduites pour être valorisé.

Il existe d'autres systèmes plus anciens, nommé «à cloche », qui restent courants. Ils consistent à stocker le biogaz sous une cloche métallique immergée. L'étanchéité est assurée par un joint à eau, le dôme s'élève et retombe en fonction de la production de biogaz.

Le gazomètre est équipé d'éléments de sécurité. Si le stockage est plein, une torchère brûle le biogaz avant échappement dans l'atmosphère. Une soupape de sécurité permet en cas de panne de la torchère (ou de révision) d'assurer une évacuation du biogaz. Ces installations sont également dotées de capteurs de pression capables de signaler toute variation de pression anormale dans le gazomètre. Les figures 19 et 20 montrent des gazomètres avec double membranes.



Figure 19 : Gazomètre STEP de Bern



Figure 20 : Gazomètre STEP de Morillon

5.2. Traitements

5.2.1. Epuration du biogaz

A la sortie du digesteur le biogaz est appelé « biogaz brut ». Il se compose principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), mais également de vapeur d'eau (H_2O), de sulfure d'hydrogène (H_2S) et de traces d'autres gaz. Pour une valorisation efficace et pour éviter d'endommager les unités de valorisation, le biogaz doit subir une épuration. Uniquement le méthane est un vecteur énergétique, les autres composés peuvent être considérés comme impuretés dans le biogaz. Ces derniers et leurs effets sont décrits dans le tableau 8.

Composé	Teneur	Principaux Effets
CO ₂	25-50% du volume	Diminue le pouvoir calorifique
		Diminue le pouvoir détonnant du biogaz, abaisse le rendement des moteurs
		Corrosion si le gaz est humide
H ₂ S	0 - 0,5% du volume	Corrode les équipements de combustion et les systèmes de pompages
		Emission de SO ₂ après brûleurs ou de H ₂ S dans le cas d'une combustion imparfaite (toxique à forte dose, odeur nauséabonde)
NH ₃	0 - 0,05% du volume	Diminue le pouvoir détonnant du biogaz, abaisse le rendement des moteurs
Vapeur d'eau	1 - 5% du volume	Corrode les équipements de combustion et les systèmes de pompages
		La condensation endommage les instruments de mesure
		Risque de gèle des systèmes de pompages et des conduites
Particules	diamètre > 5µm	Usure prématurée des moteurs et des turbines
N ₂	0 - 5% du volume	Diminue le pouvoir calorifique
		Diminue le pouvoir détonnant du biogaz, abaisse le rendement des moteurs
Siloxanes	0 - 50 mg/m ³	Agent abrasif des moteurs, augmente la fréquence de maintenance

Tableau 8 : Impuretés dans le biogaz brut et leurs effets (Deublein et Steinhauser, 2008)

L'épuration vise à piéger les substances indésirables du biogaz qui empêchent ou affectent sa valorisation. L'objectif est d'optimiser les performances de valorisation du biogaz et de protéger les équipements avec lesquels il est en contact.

Les trois familles de traitements pour épurer le biogaz - les procédés biologiques, physiques et chimiques - sont présentées dans le tableau 9.

Composé	Biologique	Physiques	Chimiques
H₂S	Désulfuration bactérienne dans le digesteur par injection d'oxygène (thiobacilles) (SOLAGRO, 2001)	Adsorption charbon actif	Absorption organique : polyéthylène glycol.
			Absorption chimique : lavage à la soude (NaOH) ; mono éthanol amine (MEA) ; diméthyle éthanolamine (DMEA) ; hydroxydes de fer ; chlorure de fer
	Biofiltre (thiobacilles)	Séparation par cryogénisation	Ajout d'hydroxyde de fer (Fe ₂ O ₃) dans les boues avant digestion : précipitation sulfure de fer (FeS). (SOLAGRO, 2001)
H₂O		Condensation dans les conduites	Absorption liquide : solution de glycol ou sel hygroscopique
		Séparation par cryogénisation	Absorption organique : polyéthylène glycol.
		Adsorption solide: SiO ₂ ou charbon actif	
NH₃			Absorption organique : polyéthylène glycol.
Siloxanes		Séparation par refroidissement	Adsorption sur un mélange hydrocarboné
		Séparation par cryogénisation	
		Adsorption: charbon actif; aluminium activé; gel de silicone.	
CO₂	A l'état de recherches : traitement enzymatique (carboanhydrase)	Adsorption par variation de pression sur zéolite ou charbon actif	Absorption par lavage à l'eau
		Séparation membranaire	Absorption organique dans polyéthylène glycol.
		Séparation par cryogénisation	Absorption chimique sur mono éthanol amine (MEA) ou diméthyle éthanol
Particules		Filtration membranaire	

*Tableau 9 : Procédés d'épuration du biogaz de STEP
(sur base de l'Agence Internationale de l'Energie, 2009)*

5.2.2. Enrichissement du biogaz

Pour satisfaire certains modes de valorisation, comme l'injection dans le réseau de gaz naturel, le biogaz épuré doit subir un enrichissement. L'objectif est de produire un gaz avec une qualité égale à celle du gaz naturel (minimum 96 % de CH₄), appelé «biométhane».

A l'inverse de l'épuration, l'enrichissement ne retire pas les composés indésirables, il piège le méthane contenu dans le biogaz. L'épuration vise à éliminer le CO₂ qui reste dans le bio-

gaz après épuration. Les procédés qui permettent de produire du biométhane figurent dans le tableau 10.

Type de procédé	Besoin électrique	Besoin thermique	Perte méthane	Teneur en méthane finale
	kWh/m ³	kWh/m ³	%	% du volume
AMP	0,23 – 0,40	/	1 – 3	96 – 98
Lavage à eau sous pression	0,24 – 0,40	/	1 – 2	96 – 98
Selexol	0,19 – 0,50	/	1 – 2	96 – 98
Monoéthanolamine	0,13 – 0,15	0,60 – 0,75	0,1 – 1	99
Diéthanolamine	0,06 – 0,20	0,44 – 0,80	0,1 – 1	99 – 99,9
Cryogénie	0,18 – 0,25	/	0,1 – 1	98 – 99,99
Tamis Moléculaire	0,35	/	2 – 15	85 – 98

Tableau 10 : Performances des procédés d'enrichissement du biogaz (Müller et al., 2008)

L'enrichissement consiste à retirer principalement le CO₂ et le N₂ présent dans le biogaz. La technique d'adsorption modulée en pression (AMP) est couramment utilisée par les STEP comme procédé d'enrichissement. Les traitements aux amines sont les plus gros consommateurs d'énergie car ils nécessitent un apport de chaleur important. En revanche, avec la cryogénie, ce sont les traitements qui engendrent le moins de perte de biogaz.

Plusieurs STEP en Suisse injectent du biométhane dans le réseau de gaz naturel. Les installations de Lucerne, Berne et Meilen sont décrites dans le tableau 11. L'installation de Berne est la plus importante, sa taille lui permet de réaliser des économies d'échelles.

STEP	Lucerne	Berne	Meilen
Procédé	AMP	AMP	Traitement aux Amines
Taille de l'installation (Nm ³ / h)	50	175	50 – 75
Coûts de production (ct./kWh)	7,4	3	6,3
Pertes de méthane (%)	2,7%	1,9%	0,1%
Consommation totale d'énergie pondérée (en % du biogaz brut)	29%	13%	8%
-Electricité (pondérée à 2.9)	29%	13%	8%
-Chaleur (pondérée à 1.1)	0%	0%	12%
Récupération de chaleur	0%	0%	7%

Tableau 11 : Exemples de STEP suisses qui injectent du biométhane (Müller et al., 2008)

5.3. Modes de valorisation du biogaz

L'énergie contenue dans le biogaz est convertie en énergie thermique, électrique ou motrice. Le biogaz peut être valorisé via une chaudière, un cogénérateur, une borne d'injection de biométhane ou une borne de distribution de biométhane. La valorisation par voie thermique et par cogénération requièrent une épuration simple (tolère une part de CO₂) alors que la cogénération avec une pile à combustible, l'injection et la distribution de biogaz enrichi nécessitent en enrichissement en biométhane.

5.3.1. Thermique

Il s'agit de produire de la chaleur pour chauffer les locaux de la STEP, chauffer le digesteur, hygiéniser les éventuels coproduits, sécher les boues ou encore alimenter un réseau de chaleur (revente de la chaleur).

Le biogaz sert de combustible, l'énergie thermique dégagée lors de la combustion chauffe un fluide caloporteur (l'eau la plupart du temps). La valorisation thermique est aujourd'hui encore souvent utilisée. Sauf en cas de présence d'un utilisateur de chaleur industriel, il est cependant préférable d'installer une unité de cogénération qui produit de la chaleur et de l'électricité.

5.3.2. Cogénération

La cogénération permet la production d'énergies électrique et thermique à partir du biogaz. Les différents usages de l'énergie thermique sur une STEP sont identiques à ceux énoncés dans le paragraphe précédent sur les chaudières à biogaz. L'électricité produite peut être valorisée de deux façons, soit l'électricité est consommée directement par la STEP pour couvrir ses besoins, soit l'électricité est injectée dans le réseau électrique contre versement d'une rétribution.

Le cogénérateur convertit l'énergie du biogaz en énergie électrique et thermique. La force motrice générée par la combustion du biogaz entraîne un rotor qui fait tourner un aimant dans une bobine, l'électricité est produite. Le cogénérateur émet de la chaleur récupérée par un circuit de refroidissement. Les types de cogénérateurs qui peuvent être utilisés par les STEP sont:

- Turbines (grosses installations)
- Micro turbines
- Moteurs à gaz
- Moteurs duals fuels (capables de fonctionner au biogaz et au fuel)
- Pile à combustible

La pile à combustible est un système techniquement à part et encore peu employée, en 2009 seule la STEP de Dübendorf (Suisse) était équipée (Müller et al., 2008). Ce système devrait se développer dans les années à venir uniquement sur les grosses installations.

Le biogaz de STEP contient en moyenne 65% de méthane (Club Biogaz, 2011)² ce qui convient à tous les types de cogénérateurs. Le moteur à gaz reste le plus employé en STEP, suivit par les microturbines, les moteurs dual fuels, les turbines, et enfin la pile à combustible.

Un procédé de cogénération doit être le plus performant possible compte tenu de la teneur en méthane du biogaz, de la quantité de biogaz produit (conditionne la puissance électrique installée), des besoins en chaleur de la STEP et des environs. Généralement le débit de biogaz dans les STEP est constant. L'avantage procuré par la tolérance du moteur dual fuel face à d'éventuelles variations ne se justifie pas. Sauf cas exceptionnels, sur certains sites (en zone touristique ou dans le cas de la codigestion) où des variations de débit et de taux de méthane dans le biogaz s'observent. Dans ce cas, la microturbine ou le moteur dual fuel peuvent s'envisager. Aujourd'hui, les microturbinas sont de plus en plus utilisées par les STEP compte tenu de leur faible besoin d'entretien, les turbines sont, quant à elles, réservées exclusivement aux installations de plusieurs Méga Watts. Chaque procédé de cogénération correspond donc à une gamme de puissance, comme montré dans le tableau 12.

Gamme puissance électrique	Procédés de cogénération
<30kWe*	Pas de turbine, quelques moteurs à gaz, moteurs dual fuel
30kWe - 250kWe	Moteur à gaz, moteur dual fuel, microturbine à gaz
250kWe - 1,2MWe	Moteurs à gaz et moteur dual fuel ou micro-turbines à gaz en parallèles
>1,2MWe	Moteurs à gaz et turbines à gaz

Tableau 12 : Gammes de puissances des cogénérateurs (RECORD, 2009)

Les moteurs à gaz sont présents dans toutes les catégories de puissances, c'est également l'une des raisons pour lesquelles les STEP les utilisent couramment. Pour la majorité des STEP, les besoins en chaleur nécessitent uniquement de l'eau chaude, le moteur à gaz est donc suffisant. Si la STEP souhaite bénéficier de températures plus élevées (450 – 500 °C) son choix pourra se porter sur une microturbine. La production de chaleur est directement liée au rendement des cogénérateurs mais le rendement thermique d'un cogénérateur est inversement proportionnel au rendement électrique. La comparaison des deux procédés les plus utilisés en STEP est donnée dans la figure 21.

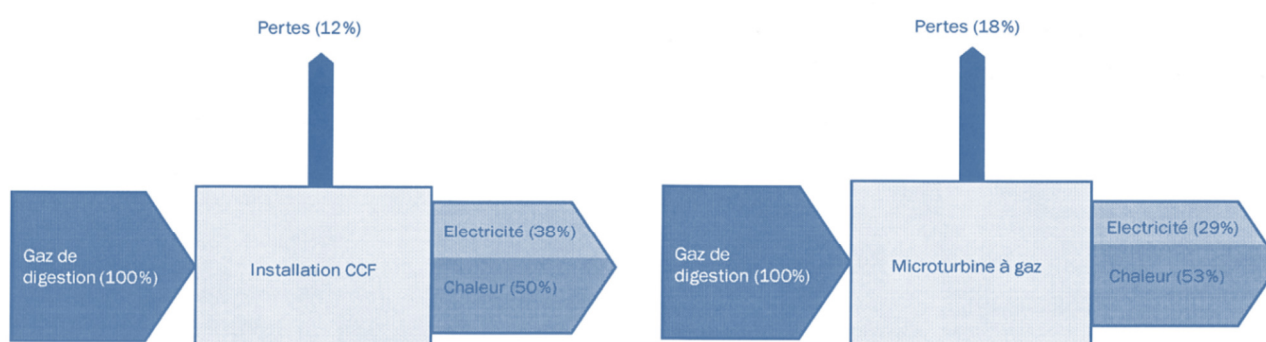


Figure 21 : Rendements moteur à gaz (CCF) et micro turbine à gaz (Müller et al., 2008)

Le rendement électrique du moteur à gaz est en moyenne supérieur de 9 points à celui de la microturbine. Le rendement thermique du moteur à gaz est inférieur de 3 points à celui de la microturbine. La microturbine à gaz a un taux de valorisation global moins bon que celui du moteur, 82% contre 88% pour le moteur. Les plus gros moteurs à gaz ont des rendements

électriques supérieurs à 40%. A noter que le rendement des procédés diminue fortement lorsque la puissance installée est faible. C'est le moteur dual fuel qui offre les meilleurs rendements électrique pour ces petites puissances installées (RECORD, 2009). Une synthèse comparative du moteur à gaz et de la microturbine est donnée dans le tableau 13.

	Microturbine à gaz	Moteurs à gaz
Disponibilité	94 - 98%	90 - 97%
Température chaleur résiduelle	450-500 °C	80 °C refroidissement moteur 150 °C Gaz échappement ¹
Charge (teneur CH₄)	Bon fonctionnement en charge partielle	Fonctionnement moyen en charge partielle
Maintenance	Réduite	Accrue
Huile	Peu de consommation	Grande consommation
Variation de concentration de CH₄	Peu sensible	Sensible
Coût	Investissement élevé, faible coût de fonctionnement	Faible coût d'investissement, coût de fonctionnement élevé.

Tableau 13 : Comparaison moteur à gaz et micro turbine à gaz, sur base de (RECORD, 2009).

La microturbine offre une disponibilité supérieure à celle du moteur. Elle est en moyenne opérationnelle jusqu'à 98% de l'année contre 97% pour le moteur à gaz (RECORD, 2009). La microturbine est capable de fonctionner jusqu'à 20% de sa charge nominale contre 50% pour les moteurs à gaz (RECORD, 2009). La microturbine valorise des biogaz avec des teneurs pauvres en méthane (pas le cas du biogaz de STEP) (RECORD, 2009). A puissances égales, la microturbine représente un investissement plus important que le moteur à gaz.



Figure 22 : Cogénération moteur à gaz, station d'épuration de Bern, 600kWélec

¹ Source interne EREP : Information colloque Biomasse Suisse, jeudi 21 juin 2012 à Vevey.

5.3.3. Injection de biométhane

Après épuration et enrichissement, un module d'injection odorise le biogaz pour le rendre détectable en cas de fuite et l'injecte dans le réseau. Le biométhane est acheminé sans perte vers son lieu de consommation ce qui n'est pas le cas lors du transport thermique ou électrique de l'énergie.

Pour le moment, la France n'autorise pas l'injection de biométhane de STEP elle émet des réserves quant à l'innocuité sanitaire. La Suisse, injectent le biométhane de STEP depuis 1995.



Figure 23 : Unité enrichissement du biogaz, STEP Berne

5.3.4. Carburant biométhane

Soit une borne de distribution de biométhane est directement installée sur la STEP, soit le biométhane est injecté dans le réseau pour alimenter des bornes en ville. Dans les deux cas, le biométhane approvisionne en carburant des véhicules équipés d'un moteur à gaz uniquement. Grâce à ce système, l'agglomération de Lille alimente sa flotte de transports publics en biométhane.



Figure 24 : Borne de distribution de Gaz Naturel pour Véhicules (GNV) à Toulouse et système de stockage du GNV dans un véhicule (Agence locale de l'Energie des Ardennes, 2009)

Partie II :

Effets de la digestion en STEP

6. Effets sur les boues

6.1. Stabilisation des boues

La digestion anaérobie entraîne une stabilisation des boues. Un temps de séjour adéquat dans le digesteur permet la dégradation biologique de la matière organique accessible aux microorganismes. A la fin du processus l'activité biologique diminue fortement en raison de l'accès de plus en plus difficile à la fraction organique, en partie transformée en biogaz. Cette action, dite de stabilisation, diminue fortement les émissions d'odeurs des boues résiduelles. Egalement, la masse de matière organique dans les boues est abattu de l'ordre de 50%. La matière organique restante peut alimenter les cycles d'humification (c.f. chapitre 6.2.3). La figure 25 illustre l'évolution des composants des boues lors de la digestion anaérobie.

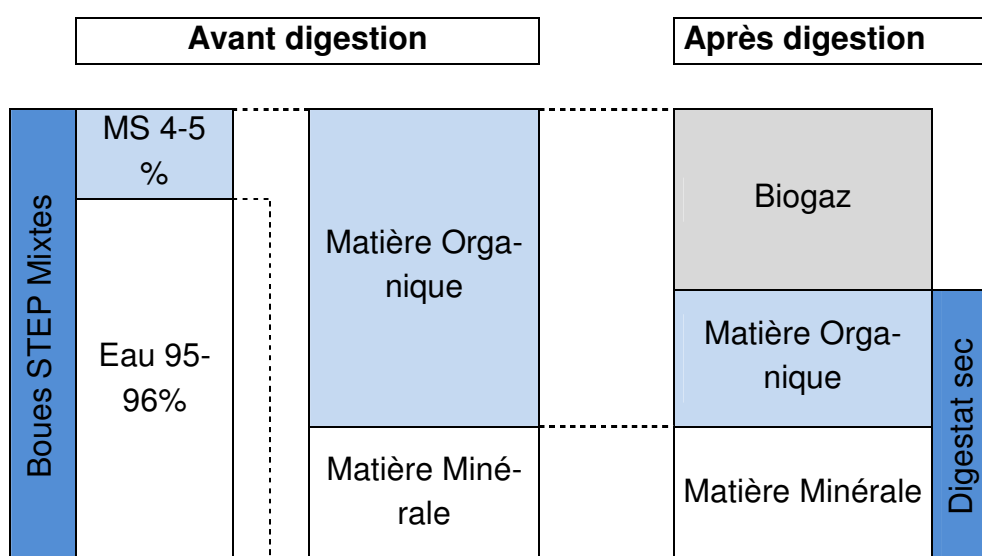


Figure 25 : Diminution de la fraction fermentescible des boues lors de la digestion anaérobie

6.2. Modification de la fraction fertilisante

6.2.1. Evolution des nutriments N, P et K

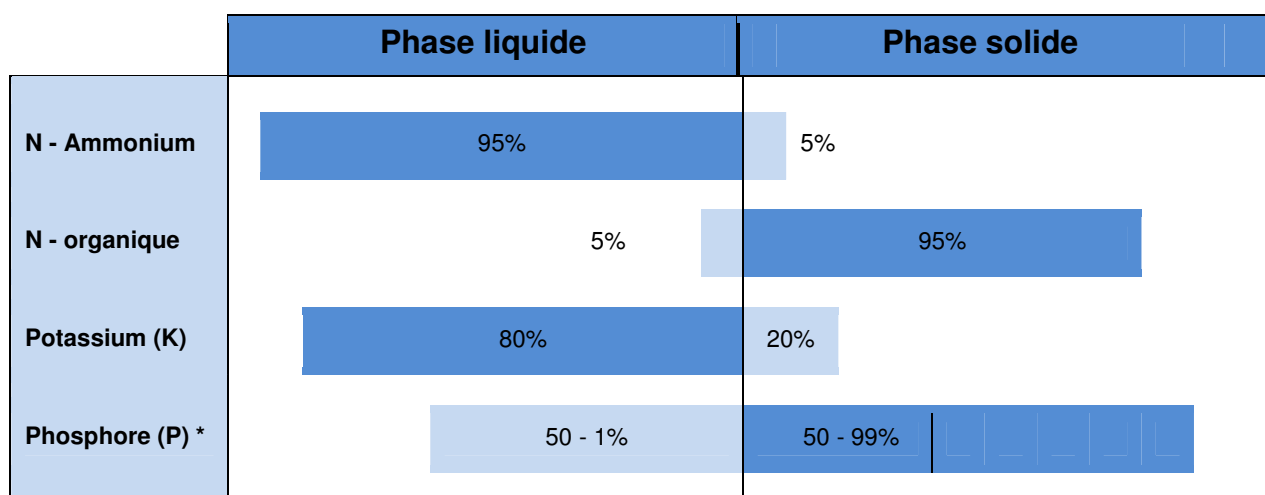
La fraction fertilisante des boues est modifiée par la digestion. Les concentrations en N, P, K solubles sont modifiées de la manière suivante (ADEME, 2003)⁴ (ADEME, 2011) :

- Concentration N_{tot} : multipliée par ~2,6 suite à une réduction de la MS
- Concentration $N\text{-}NH_4$: multipliée par ~3,2 suite à la production d'azote ammoniacal
- Concentration P_2O_5 : divisée par ~1,2 suite à la précipitation
- Concentration K_2O : divisée par ~2,6

Les quantités totales d'azote, de phosphore et de potassium, restent identiques au cours de la digestion.

6.2.2. Répartition N, P, K après traitement du digestat

Comme expliqué précédemment, pour faciliter le transport des boues, les STEP déshydratent le digestat. En revanche cette opération n'est pas sans conséquence sur la répartition en éléments fertilisant dans les phases liquide et solide du digestat :



* Dépend de l'utilisation des coagulants / floculants lors de déshydratation mécanique

Figure 26 : Répartition des teneurs en fertilisants entre les phases liquide et solide du digestat (OFEN et EREP SA, 2009)

La quasi-totalité de l'azote ammoniacal est contenue dans la phase liquide. C'est l'une des raisons pour lesquelles, la phase liquide issue de la déshydratation des boues digérées doit être renvoyée en tête de STEP pour traitement.

6.2.3. Amélioration du processus d'humification

Une fois le digestat entreposé à l'air libre ou épandu, le processus d'humification se met en place. C'est un processus aérobie, pendant lequel l'humus se forme. En accélérant l'hydrolyse de la MO nécessaire à l'humification, la digestion favorise ce mécanisme.

La digestion ne produit pas d'humus, mais facilite le processus d'humification.

Dans l'exemple de deux boues identiques qui doivent être épandues, celle qui subit une digestion anaérobie sera plus rapidement humifiée qu'une boue directement épandue au champ.

6.3. Simplification de l'élimination et valorisation

6.3.1. Réduction des volumes

La dégradation de la matière organique pendant la digestion conduit à une réduction du volume des boues. La masse de la MO étant réduit d'environ 50%, la matière sèche (MO + MM) se réduit de 20 à 30%. En fonction du degré de déshydratation, la réduction de la masse finale des boues peut donc atteindre environ 30%.

La diminution du volume et donc de la masse des boues facilite leur traitement de valorisation ou d'élimination : les quantités à déshydrater, sécher et à épandre sont diminuées. Si une boue subit une déshydratation thermique, la STEP réalise un gain de volume de l'ordre de 30%, ce qui lui permet de diminuer ses coûts liés à l'évacuation des boues (transport, taxe épandage, taxe incinération...).

Cas concret : La STEP de Morges, Suisse

Soit 1 tonne de boues épaissie à 6% de MS composée de 68% de MO et de 32% de MM. On admet un taux d'abattement sur la MO de 50%. Il est possible pour une STEP d'estimer le gain de masse induit par la mise en place de la digestion :

	Masse
Boue d'épuration	1000 kg
MS (6%)	60 kg
MM (32% MS)	19,2 kg
MO (68% MS)	40,8 kg
MO digérée (34% MS)	20,4 kg

Tableau 14 : Estimation de la part de boues volatilisée lors de la digestion

Une tonne de boue avant digestion contient 60kg de MS, après digestion elle ne contient plus que 39,6 kg de MS. La digestion anaérobie a réduit de 34% la MS contenue dans les boues, cette fraction est convertie en biogaz, soit 20,4 kg par tonne de boue fraîche à 6% de MS.

6.3.2. Réduction des pathogènes

La digestion mésophile (37°C) détruit 99% des germes pathogènes, la digestion thermophile des boues (environ 55°C) abat 99,99% des germes pathogènes (Doublet et al., 2004). La digestion a donc un pouvoir hygiénisant très important sur les boues.

En revanche, ces résultats sont très variables selon le TRH des boues dans le digesteur. Plus le temps de séjour est long plus le facteur de réduction est important. A noter que des agents infectieux particulièrement résistants ne sont pas affectés par la digestion. Les Clostridium (sporulés) et les bacillus cereus résistent même aux conditions thermophiles. Les entérovirus, les parvovirus résistent à la digestion mésophile (Doublet et al., 2004). En définitif, la digestion n'apporte pas de pathogène supplémentaire, elle ne fait que les réduire fortement sans pouvoir les éliminer totalement. Cette réduction permet de limiter les risques auprès des opérateurs lors de la manutention du digestat ou de son épandage en agriculture.

7. Effets énergétiques

7.1. Production d'énergie

La quantité de biogaz produit par équivalent habitant est une question centrale pour les STEP intéressées par la digestion. En revanche, la production de biogaz varie en fonction des traitements subis par les boues :

		Production de biogaz (L.EH ⁻¹ .j ⁻¹) TRH 30 jours (compter -10% pour une durée de digestion de 15 jours)			
Type de traitements	Temps de passage dans le décanteur I ^{ère} (pointe de débit par temps sec)	Sans décantation primaire	30 min	1h	2h
	Traitements I ^{ère} + II ^{ère}	/	23 - 26	25 - 29	27 - 31
	Traitements I ^{ère} + II ^{ère} + III ^{ère} (âge des boues avant digestion 13 jours environ)	13 - 15	19 - 22	22 - 25	25 - 29
	Traitements I ^{ère} + II ^{ère} + III ^{ère} (âge des boues avant digestion 25 jours environ)	10 - 13	18 - 21	20 - 23	23 - 26

Tableau 15 : Production de biogaz selon les traitements effectués par la STEP, conditions mésophiles (sur base de Müller et al., 2008).

Plus la boue est âgée et moins la production de biogaz est élevée. Plus la décantation est forte plus les matières fermentescibles sont concentrées et plus la production de biogaz augmente. La STEP qui produit potentiellement le plus de biogaz effectue une forte décantation primaire, un traitement secondaire mais pas de traitement tertiaire. Dans ce cas la production journalière est de 27 à 31 litres de biogaz par EH soit 174 à 200 Wh/EH.j. La production annuelle d'une STEP de 100'000 EH pourra donc s'élever à 7,31 GWh/an (sur base d'un biogaz de STEP avec une teneur raisonnable de 65% de CH₄ (SOLAGRO, 2001) (Club Biogaz, 2011)). A noter que l'étape de digestion anaérobie est plus économe en énergie que d'autres méthodes de stabilisation des boues, comme il est montré dans le tableau 16.

Une STEP de 100 000 EH peut produire jusqu'à 7,31 GWh/an par la digestion des boues.

	Energies consommées par kg de MS et par m ³ de boues		Energie consommée par EH	
	Electricité KWh/m ³	Chaleur KWh/m ³	Electricité kWh.EH ⁻¹ .an ⁻¹	Chaleur kWh.EH ⁻¹ .an ⁻¹
Digestion (stabilisation anaérobie méso- phile)	1,6 - 2,3	24 -30	0,9 - 1,3	13 – 17
Stabilisation à froid avec apport d'oxy- gène (stabilisation aérobie psychrophile)	10 -20	/	5,0 - 11	/
Oxydation par voie humide	5 + 40 1)	> 0	25,0	> 0

Tableau 16 : Comparaison énergétique avec d'autres méthodes de stabilisation (sur base de Müller et al., 2008).

La digestion anaérobie mésophile consomme très peu d'électricité par rapport aux autres procédés de stabilisation, en revanche elle nécessite de gros besoins en chaleur qui pourront s'élever à 46,5 Wh/EH.j.

7.2. L'utilisation de l'énergie en STEP

Les STEP sont généralement équipée d'un gazomètre, d'un CCF, d'un cumulus d'eau chaude et d'une chaudière d'appoint au biogaz. La figure 27 met en évidence la configuration classique observée en STEP. Le CCF produit l'essentiel de l'électricité et de la chaleur nécessaire au fonctionnement de la STEP. Une chaudière d'appoint est installée pour couvrir les pics de demande de chaleur.

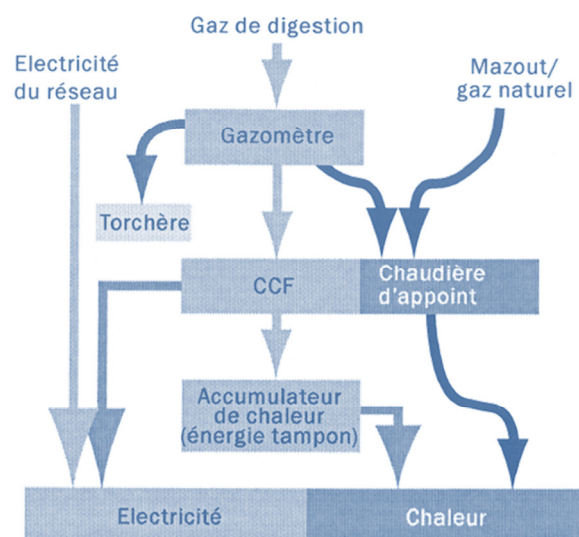


Figure 27 : Production énergétique à partir du biogaz de STEP (Müller et al., 2008).

7.3. Bilan énergétique des filières boues

Il s'agit d'identifier les postes producteurs et consommateurs d'énergie dans la filière de traitement des boues de STEP. Le bilan énergétique de la filière boue s'améliore si les boues sont digérées, comme il est illustré dans le tableau 17.

Le tableau prend comme exemple une STEP modèle de 100 000 EH. Le bilan total est présenté en énergie primaire et est pondéré de 2,9 pour les flux électriques et de 1,2 pour les flux thermiques (dernière ligne) (Müller et al., 2008).

Les trois filières ont un bilan énergétique positif. La filière boues digérées avec incinération en UIOM a le bilan le plus favorable en produisant 4 754 GWh/an. La même filière avec une incinération en cimenterie produit légèrement moins d'énergie 4 084 GWh/an. Sans digestion, l'incinération des boues fraîches en UIOM produit 63% d'énergie en moins. Le bilan énergétique de ces 3 filières est donné dans la figure 28.

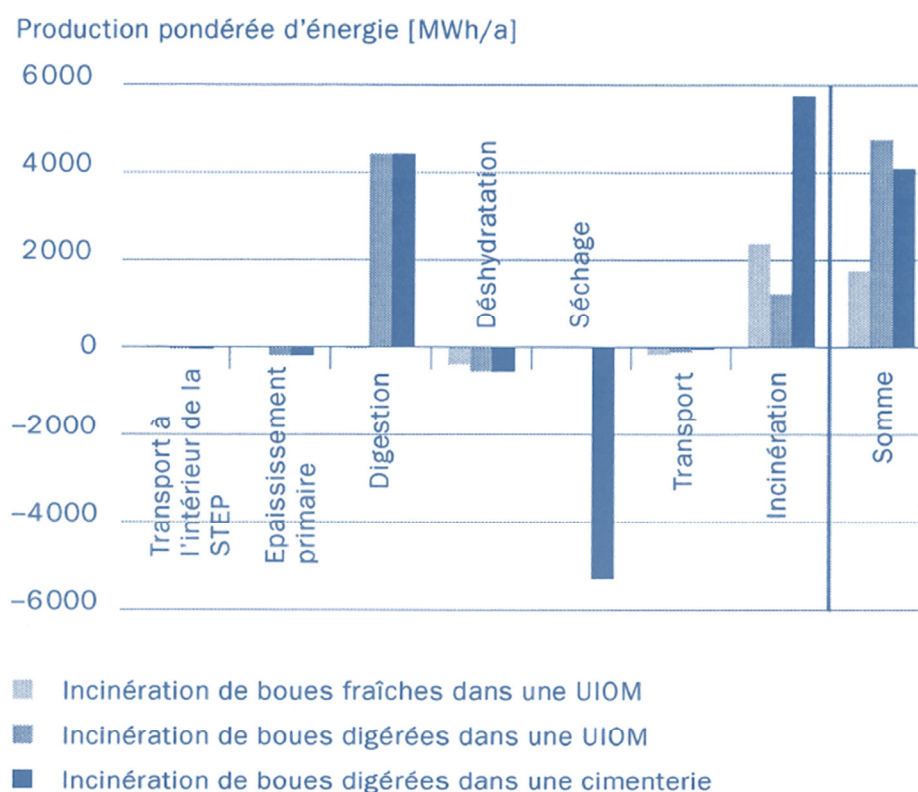


Figure 28 : Bilans énergétiques filière de traitement des boues de STEP, énergie primaire (Müller et al., 2008)

MWh/an	Incinération boues fraiches en UIOM				Incinération des boues digérées en UIOM				Incinération des boues digérées en Cimenterie			
	Electricité		Chaleur		Electricité		Chaleur		Electricité		Chaleur	
	Prod.	Conso.	Prod.	Conso.	Prod.	Conso.	Prod.	Conso.	Prod.	Conso.	Prod.	Conso.
Transport boues STEP		8				11				11		
Prétraitements												
Epaississement boues en excès						67				67		
Digestion												
Chauffage								1851				1851
Brassage						113				113		
Production électrique					1638				1638			
Utilisation chaleur							1876					
Chauffage des locaux				25				25				25
Déshydratation												
Déshydratation boues		131				100				100		
Traitement du filtrat						89				89		
Séchage												
Consommation finale chaleur												3689
Consommation finale électrique										416		
Traitement eau évapo-rée										9		
Transport (base 50 km)				160				101				34
Incinération												
Production électrique	458				236							
Utilisation chaleur			943				485				5240	
Somme	458	139	943	185	1874	380	2362	1978	1638	805	7116	5599
Consommation (-) / Production (+)	+ 319		+ 758		+1 494		+ 384		+ 833		+ 1517	
Production pondérée d'énergie (% de la variante "incinération boues digérées dans UIOM")	+ 1760 (37%)				+ 4754 (100%)				+ 4084 (86%)			

Tableau 17 : Bilans énergétiques filières boues digérées STEP modèle 100'000EH, comparaison avec la filière classique « boues fraiches incinérées » (Müller et al., 2008)

Ce sont les procédés de déshydratation et de séchage qui consomment le plus d'énergie. Les forces et la chaleur nécessaires lors de ces étapes expliquent cette forte consommation. Si la STEP effectue une déshydratation thermique (séchage), son bilan énergétique est négatif. En revanche le bilan global de la filière est positif si les boues séchées sont incinérées en cimenterie.

Par extension, la filière agricole, avec digestion des boues et déshydratation mécanique suivit d'un épandage, présente un bilan énergétique positif.

7.4. Focus sur le bilan thermique

Pour évaluer le bilan thermique, l'exemple de la STEP de Bad Ragaz (Suisse) a été analysé. Deux types de CCF sont étudiés :

- Moteur à gaz avec récupérateurs de chaleur supplémentaires des gaz d'échappements et chaleur contenue dans les eaux usées.
- Microturbine avec récupérateurs de chaleur supplémentaires des gaz d'échappements et chaleur contenue dans les eaux usées.
- Moteur à gaz
- Microturbine à gaz

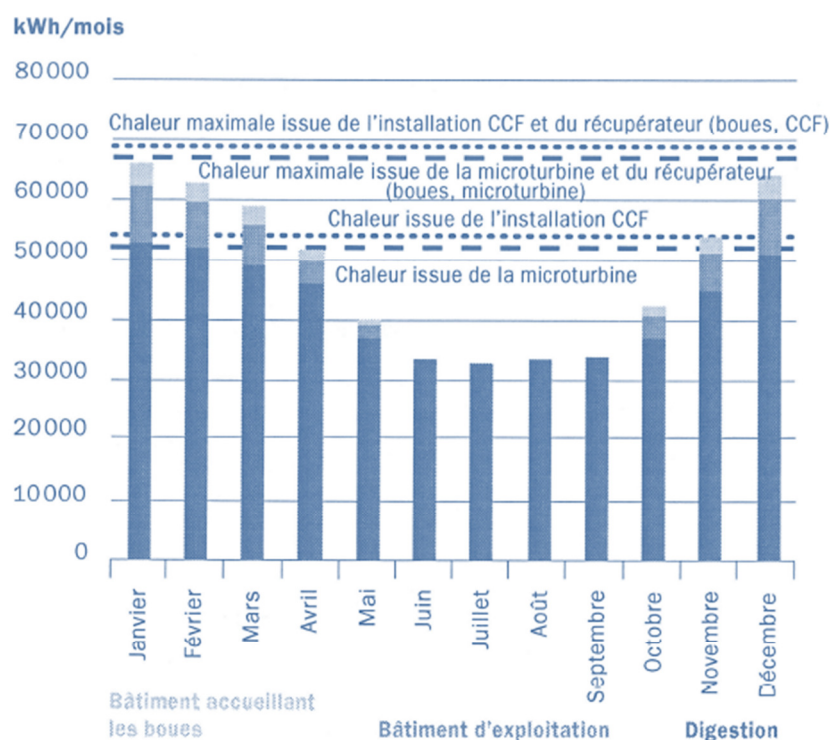


Figure 29 : Bilan thermique annuel, STEP de Bad Ragaz, Suisse (Müller et al., 2008)

Les besoins thermiques prennent en compte la digestion, les bâtiments de la STEP et le bâtiment qui accueille les boues. La STEP subit une grande variabilité saisonnière pour ses besoins en chaleur. Les besoins en énergie thermique doublent entre les mois de juillet et de

janvier. Le moteur à gaz équipé des récupérateurs de chaleur offre le meilleur bilan thermique. Dans ce cas la STEP de Bad Ragaz peut en moyenne utiliser 100% de sa production électrique et couvrir 100% de ses besoins thermiques. Environ 17% de l'énergie thermique est dissipée durant l'année (Müller et al., 2008).

7.5. Préconisations énergétiques

7.5.1. Trois pistes d'amélioration

Si une STEP souhaite optimiser les performances énergétiques de son installation de biogaz, elle doit mettre un place un plan d'action méthodique. Il s'agit, en priorité, d'analyser le taux de valorisation du biogaz, la consommation d'énergie de l'unité de digestion et le rendement de biogaz à partir des boues, éventuellement des cosubstrats. Des mesures sont proposées ci-après pour chacune des trois pistes :

- **Augmenter le taux de valorisation du biogaz**
 - **Entretien préventif CCF (vidanges, révisions) :** cette précaution évite l'arrêt intempestif du cogénérateur et la perte de revenu liée au biogaz torché.
 - **Garantir une épuration du biogaz performante :** c'est l'assurance de préserver l'outil de valorisation du biogaz et d'éviter les pannes qui diminuent le revenu de l'installation.
 - **Envisager deux systèmes de valorisation :** les STEP de plus de 30 000 EH doivent envisager deux systèmes de cogénération pour éviter de torcher lors des entretiens. L'idéal est de faire fonctionner alternativement deux cogénérateurs pour éviter d'utiliser des machines à faibles puissances et donc à faibles rendements. Cette organisation n'engendre pas de frais d'entretien supplémentaire puisque les cogénérateurs sont deux fois moins sollicités. En dessous de 30 000 EH cette option n'est pas envisageable, les coûts d'investissements peuvent augmenter de 20 à 60% (Müller et al., 2008). Ces STEP peuvent envisager d'installer, en parallèle du cogénérateur, une chaudière d'appoint au biogaz.
 - **Renouveler les systèmes de valorisation :** les évolutions des constructeurs sur les chaudières et les CCF sont nombreuses, les rendements sont régulièrement augmentés. Un matériel vieillissant voit son rendement diminuer avec le temps. Il ne faut pas hésiter, lorsque la trésorerie le permet, à changer les appareils de valorisation.
 - **Envisager un réseau de chaleur :** toutes les STEP ne sont pas isolées, des industries, des habitations ou des complexes sportifs peuvent être à proximités et bénéficier des excédents de chaleur.
 - **Tous les 5 ans identifier les fuites de biogaz:** une fuite, même minime, a des conséquences de plusieurs milliers de francs par an. Des caméras infrarouges peuvent détecter le méthane avec précision, ces appareils sont disponibles en location. Il faut examiner prioritairement les joints, les raccords de conduites, l'insertion du brasseur et de la trémie d'alimentation en cosubstrats, le digesteur et le gazomètre.

▪ Diminuer les consommations

- **Éliminer le dépôt de calcaire** : la montée en température de l'eau, favorise le dépôt de calcaire dans les conduites. Un détartrage périodique est nécessaire pour garantir l'efficacité des échangeurs de chaleur pour le chauffage du digesteur.
- **Prévenir la corrosion** : même après épuration (pas le cas de l'enrichissement) le biogaz contient encore une infime quantité de particules qui, au fil des années, oxydent les CCF et les brûleurs des chaudières à biogaz. Les performances énergétiques des systèmes de valorisation diminuent. Cette usure peut être évitée avec une maintenance préventive régulière (vidanges, révision des brûleurs etc.).
- **Épaissir les boues avant digestion** : l'épaississement des boues, sans dépasser la charge organique maximale du digesteur, est indispensable. En plus d'augmenter la production de biogaz, la quantité d'eau chauffée inutilement dans le digesteur est fortement réduite. On préconise un épaississement avant digestion entre 5 et 8% de MS pour les digesteurs en voie liquide.
- **Ne pas excessivement brasser le digesteur** : le système de brassage du digesteur ne doit pas être sur- ou sous-dimensionné ce qui entraînerait une surconsommation. On préconise en STEP une puissance installée de 4 à 6W/m³ brassés (SOLAGRO, 2001). Il faut donc changer le moteur du brasseur pour correspondre à cette gamme de puissance.
- **Vérifier l'isolation thermique** : en période estivale les besoins en chaleur pour la digestion chutent de 40% (Müller et al., 2008). L'hiver les consommations peuvent être beaucoup plus importantes si la structure du digesteur favorise les ponts thermiques. Il faut également vérifier les déperditions de chaleurs depuis le CCF (ou la chaudière) et tout le long des conduites. Des appareils infrarouges sont également disponibles à la location pour détecter les fuites thermiques. A noter que le CCF peut être enfermé dans une enceinte qui assure une isolation thermique et acoustique en favorisant la récupération de chaleur.
- **La chaleur des gaz d'échappement** : en plus de la récupération de chaleur issue du refroidissement du CCF, il est également possible d'installer un échangeur en contact avec les gaz d'échappement. En combinant ce système avec un système de récupération de chaleur dans les eaux usées, la STEP est en mesure d'assurer son autonomie thermique (Müller et al., 2008).
- **Désensabler périodiquement le digesteur** : on préconise une fois par an une vidange du digesteur (idéalement un transfert de la biomasse vers le post digesteur) pour retirer le sable accumulé. Cette masse inerte ne produit pas de biogaz, elle occupe une partie du volume utile et le sable est chauffé inutilement.

▪ Augmenter la production

- **Augmenter la sensibilité du régulateur de température** : le chauffage du digesteur est déclenché par un régulateur, plus sa sensibilité est fine moins les écarts de températures dans la biomasse sont importants et la production de biogaz augmente. Il faut entreprendre les réglages nécessaires ou envisager de remplacer le module de régulation.
- **Brasser ni trop, ni trop peu** : Un brassage adapté assure une température homogène dans le digesteur, favorise le contact MO-microorganismes et la remontée du biogaz. En

plus d'une consommation énergétique inutile, un brassage excessif stresse la biomasse et diminue la production de biogaz. Dans le cas d'une digestion à 6% de MS et un TRH de 30 jours, on préconise une consommation énergétique de 70 à 110 kWh/tMS (SOLAGRO, 2001).

- **Fixer la ration** : le changement des paramètres de digestion est une source de stress pour la biomasse microbienne qui se traduit par une baisse plus ou moins forte de la production de biogaz. Il faut éviter, autant que possible, de modifier la quantité et la qualité des substrats introduits dans le digesteur.
- **Fractionner les apports** : la boue doit être introduite dans le digesteur le plus régulièrement possible et en faibles quantités. Cette précaution est d'autant plus importante en cas de codigestion. Le fractionnement des apports évite une chute de la température dans le digesteur et favorise l'ensemencement des substrats en microorganismes anaérobies. Cette précaution permet d'augmenter la production de biogaz en diminuant le risque d'acidose (cas de codigestion). Une capacité de stockage suffisante des cosubstrats avant digestion permet de mieux gérer le fractionnement des apports et d'amortir l'arrivée des cosubstrats sur la STEP.
- **Un TRH adéquat** : ce sont les archaebactéries responsables de la Méthanogénèse qui ont le temps de génération le plus lent. Le processus de digestion est donc limité par la vitesse de cette étape. Dans le cas de la digestion des boues à 6%MS on préconise un TRH de 25 jours (Club Biogaz, 2011) pour assurer une stabilisation suffisante de la MO et une production de biogaz optimale.
- **Optimiser la charge organique** : pour optimiser la production de biogaz on préconise une charge organique maximale de $5,5\text{kgMS/m}^3.\text{j}$ (Club Biogaz, 2011) ou de $3,0\text{kgMO/m}^3.\text{j}$. L'objectif de l'exploitant est de tendre vers ces valeurs, en ajoutant des cosubstrats ou en épaississant les boues, sans jamais dépasser ces consignes.
- **Codigestion** : une STEP qui met en place la codigestion des déchets verts et les biodéchets des habitants raccordés, triple sa production de biogaz (Müller et al., 2008).
- **Post digesteur** : la mise en place d'un digesteur secondaire non chauffé permet de récupérer jusqu'à 20% de biogaz supplémentaire. Si la place et les finances le permettent c'est un investissement à envisager fortement.

7.5.2. Prendre les bonnes décisions

▪ Est-ce vraiment pertinent de désintégrer les boues ?

Le rôle fondamental d'un prétraitement de désintégration est de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme, mais est-ce toujours le cas ? En fonction de leur consommation énergétique, ces prétraitements peuvent être classés selon 3 catégories :

Catégorie 1 : Les prétraitements gros consommateurs d'énergie, 18% de l'énergie produite par la digestion est utilisée pour la désintégration (homogénéisation à ultrasons, hydrolyse thermique).

Catégorie 2 : Les prétraitements consommateurs intermédiaires, 7,5% de l'énergie produite par la digestion est utilisée pour la désintégration (centrifugation lytique).

Catégorie 3 : les prétraitements faibles consommateurs d'énergie, 3,5% de l'énergie produite par la digestion est consommée pour la désintégration (pulvérisation à débit continu, oxydation, broyage par billes).

Selon ces 3 catégories il est possible d'estimer la production de biogaz pour l'ensemble des STEP Suisse qui pratiquent la digestion à ce jour. On fait l'hypothèse que toutes ces STEP valorisent le biogaz produit et que leurs boues subissent un prétraitement de désintégration :

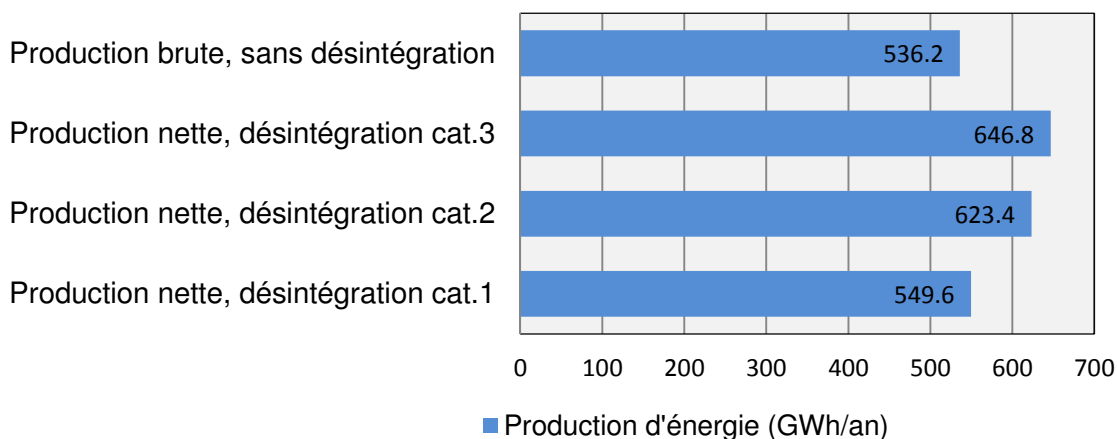


Figure 30 : Bilan énergétique des procédés de désintégration, estimation potentiel en Suisse (sur base de OFEN, 2007)

Ce graphique met en évidence la production brute de biogaz sans désintégration, cela correspond à la production d'énergie en Suisse si toutes les STEP qui pratiquent la digestion à ce jour valorisaient le biogaz. Il met également en évidence la production d'énergie nette estimée suite à la mise en place de la désintégration sur ces STEP. Les consommations énergétiques des 3 catégories de désintégrateurs sont prises en compte.

En faisant l'hypothèse que toutes les STEP qui digèrent leurs boues en Suisse valorisent le biogaz, la production d'énergie pourrait être augmentée jusqu'à 134,1 GWh/an, soit 25%, en mettant en place un prétraitement de désintégration.

Ces résultats montrent que les systèmes de désintégration les plus gros consommateurs d'énergie conservent un bilan énergétique positif en produisant 2,5% d'énergie supplémentaire. On constate donc que, dans le cas du traitement des boues, tous les procédés de désintégration produisent en théorie tous plus d'énergie qu'ils n'en consomment.

Dans le cas de la monodigestion de boues, il ne semble pas pertinent de choisir un système de désintégration gros consommateur d'énergie comme l'homogénéisation à ultrasons, ou l'hydrolyse thermique qui n'augmentent que de 2,5% l'énergie nette de l'installation. En revanche la désintégration des boues est très pertinente dans le cas de la pulvérisation à débit continu, de l'oxydation ou du broyage par billes qui sont capables d'augmenter la production de biogaz jusqu'à 25%.

A noter que les effets de la désintégration sont décuplés en cas de codigestion de substrats très structurés (graines, déchets fibreux etc.), dans ce cas, la désintégration augmente la production de biogaz de façon encore plus nette. A noter que les consommations énergétiques des procédés de désintégration dépendent de la résistance mécanique des substrats et du degré de désintégration souhaité. En effet un faible apport énergétique permet de dissoudre les floccs, une énergie plus importante lyse les membranes cellulaires. (Müller et al.,

2008). La dissolution des floccs apparaît comme un objectif raisonnable et suffisant pour les STEP.

La désintégration offre d'autres avantages comme l'augmentation de la dégradation des boues ce qui se traduit par un degré de stabilisation plus élevé après digestion. La désintégration favorise également la déshydratation et le séchage du digestat en déstructurant la matière. Cette technique sera donc particulièrement intéressante si les boues sont évacuées en cimenterie (voir ci-dessous). En revanche, après digestion, le pouvoir calorifique des boues est amoindri et la valorisation thermique en incinération est moins avantageuse (problème d'auto-combustibilité du digestat).

▪ La codigestion est-elle pertinente ?

La codigestion des boues avec des ordures ménagères digestibles et des déchets verts est une source énergétique importante. Chaque habitant constitue un gisement potentiel de biogaz :

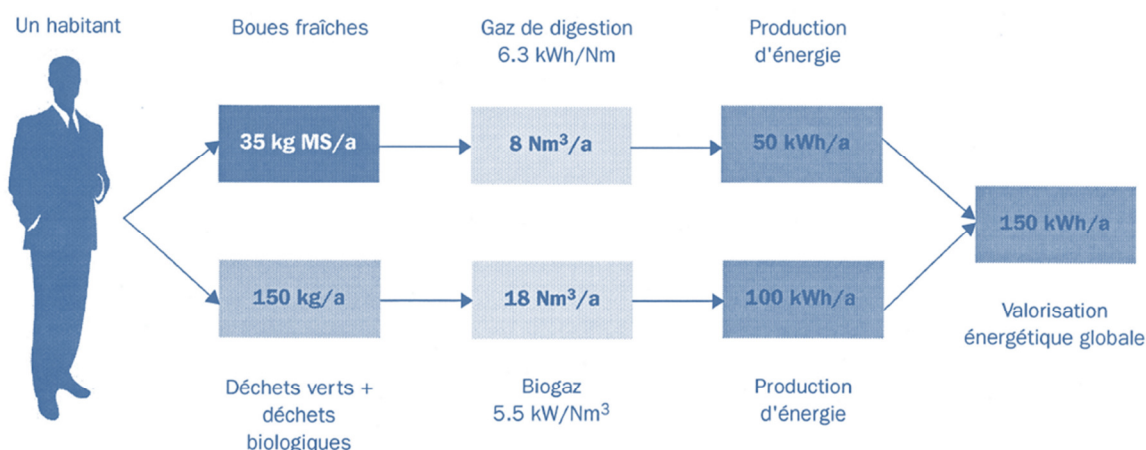


Figure 31 : Production annuelle de déchets fermentescibles par habitant (Müller et al., 2008)

La codigestion des biodéchets ménagers et des déchets verts des habitants raccordés à la STEP permet de tripler la production de biogaz. 81% des déchets fermentescibles produits par un habitant sont des déchets verts et des biodéchets. Il représente donc une source conséquente d'énergie pour les STEP. La codigestion des boues est une opportunité énergétique qui doit être saisie par les STEP qui disposent des moyens humains et financiers pour garantir une bonne gestion des matières fermentescibles. A noter que des économies d'échelles peuvent être réalisées en construisant une installation en STEP plus importante, au lieu de deux installations pour traiter séparément les boues et les déchets fermentescibles d'un territoire. Dans le cas où l'épandage des boues est interdit, il n'est pas forcément pertinent de codigérer les boues pour ensuite les incinérer. Pour une valorisation agronomique de la MO, une digestion séparée des cosubstrats suivit d'un épandage est souhaitable.

7.6. Evaluation des performances énergétiques

7.6.1. Objectifs

Un outil pour évaluer la performance énergétique de la digestion en STEP a été élaboré. Il s'adresse en priorité aux exploitants de STEP et aux conseillers en énergies désireux d'optimiser la digestion anaérobie en STEP. Cet outil répond à 6 objectifs :

- ✓ Etre adapté à toutes les STEP
- ✓ Etre adapté aux différentes informations présentes sur les STEP
- ✓ Etre utilisable par l'exploitant de façon autonome
- ✓ Calculer les indicateurs de performances de la digestion et fournir des éléments de comparaisons
- ✓ En fonction des performances, proposer des actions correctives concrètes avec des actions à court, moyen et long termes
- ✓ Garantir un meilleur bilan énergétique de l'installation de digestion

7.6.2. Présentation

Cet outil prend la forme d'une plaquette dépliant au format A4 (A3 plié en deux). Elle comporte 2 parties. Sur la première page, la personne est invitée à renseigner les paramètres de digestion. Dans un second temps (2ème page), les données précédentes sont utilisées pour calculer des indicateurs de performances. Si la personne dispose de données supplémentaires elle peut également les renseigner dans la rubrique « Pour aller plus loin... ». Dans un dernier temps (3ème page), en fonction des résultats précédents, des actions d'optimisation sont proposées à l'exploitant. Trois objectifs sont retenus dans cet ordre :

- Augmenter la part de biogaz valorisée
- Garantir une digestion économe en énergie
- Augmenter la production de biogaz

La plaquette est présentée en annexe 4.

8. Impacts environnementaux

Une dichotomie « avantages-inconvénients environnementaux » est délicate. Cela dépend du contexte ciblé et du point de vue adopté. Ces différents impacts ont été abordés tout au long de cette étude, une synthèse est proposée :

▪ Général

- **Intégration paysagère délicate** : Insertion paysagère délicate de l'installation de digestion. Précautions particulières à prendre.

▪ Energie

- **Production d'énergie à partir d'un déchet** : valorisation d'une ressource inépuisable : les boues.
- **Economie d'énergie fossile** : Substitution des énergies fossiles au profit du biogaz pour le chauffage et la production électrique.
- **Energie stockable** : Energie renouvelable stockable, le biogaz peut être stocké en prévision des pics de consommation.
- **Codigestion** : Introduction possible de biodéchets ou de cultures énergétiques pour augmenter la production.

▪ Sol

- **Codigestion** : Au même titre qu'une culture classique, les cultures énergétiques participent à la dégradation des sols agricoles (tassement, érosion, pollutions liées à la fertilisation ou à la protection des cultures). Préférer l'utilisation de biodéchets.
- **Non destruction du substrat** : Les boues et les cosubstrats sont remaniés mais non éliminés. Ils peuvent être retournés au sol pour une valorisation agronomique ou être envoyés en incinération. Etape supplémentaire dans la gestion des boues sans modification de la filière préexistante.
- **Réduction de la MO** : 30 à 50% de la MO des boues sont convertis en biogaz et ne sont pas retournés au sol
- **Gestion locale de la MO** : La MO est traitée sur le territoire, dans le cas de l'épandage elle est retournée au sol. Gestion durable de la MO.
- **Minéralisation** : Minéralise les éléments fertilisants et accélère la mise à disposition pour les cultures.
- **Polluants organiques** : La digestion concentre les polluants organiques présents dans les boues (PCB, Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(a)pyrène) (ADEME, 2011). Les œstrogènes ne sont pas dégradés lors de la digestion des boues (ADEME, 2011).
- **Éléments Traces Métalliques** : Ils sont concentrés 1,7 lors de la digestion des boues (ADEME, 2011). Ceci s'explique par la perte de carbone sous forme de biogaz et d'une réduction de la MS lors de la digestion.

▪ Atmosphère

- **Limitation GES** : Organisation de la fermentation en enceinte close, capture du CH₄ (Pouvoir de Réchauffement Globale équivalent à 23 fois celui du CO₂). Une fois digérée,

aucune fermentation spontanée des boues n'est possible lors du stockage, pas d'émission de méthane dans l'atmosphère

- **Réduction odeurs** : Réduction des nuisances olfactives après digestion. La manipulation des cosubstrats nécessite des précautions pour éviter d'incommoder les riverains.
- **Production azote ammoniacal** : Conversion de l'azote en grande partie en azote ammoniacal volatile, concentrée dans la phase liquide du digestat. Précautions particulières pour éviter la volatilisation.

- **Sanitaire**

- **Hygiénisation** : Réduction du nombre de pathogènes présents dans les boues.

9. Synthèse des effets de la digestion des boues

La digestion anaérobie des boues implique des externalités positives et négatives complexes et variées qui peuvent être analysées selon la méthode « Forces - Faiblesses » et « Opportunité - Menaces » :

- **Forces** : Caractéristiques internes du projet de digestion qui favorisent sa réalisation
- **Faiblesses** : Caractéristiques internes du projet de digestion qui freinent sa réalisation
- **Opportunités** : Facteurs externes au projet de digestion qui favorisent sa réalisation
- **Menaces** : Facteurs externes au projet de digestion qui freinent sa réalisation.

Dans ce type d'analyse les faiblesses et les menaces s'opposent respectivement aux forces et aux opportunités. Le point de vue choisi pour conduire cette analyse est celui du projet de digestion dans sa globalité.

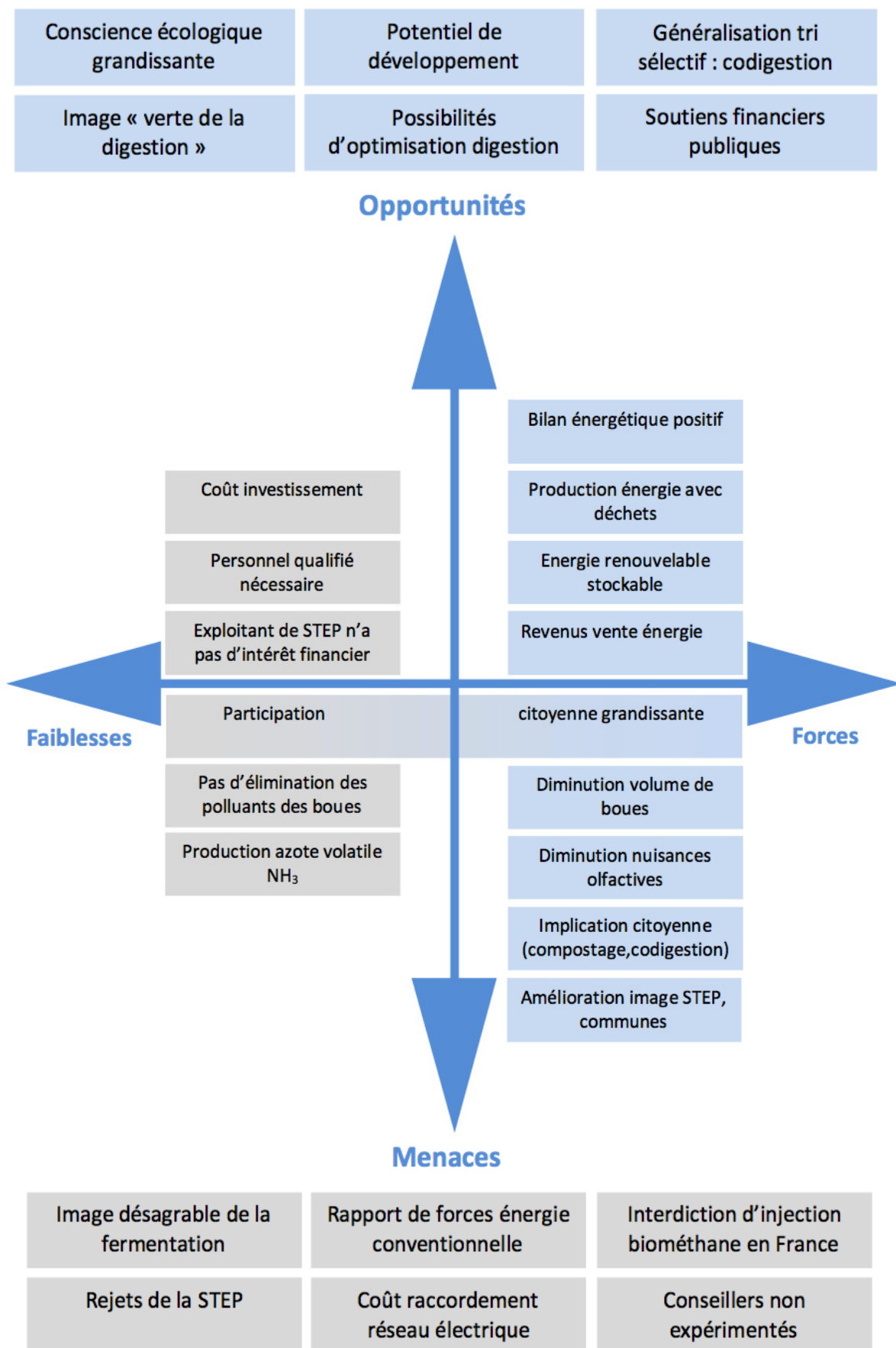


Figure 32 : Forces, faiblesses, opportunités et menaces d'un projet de digestion en STEP

Forces : La production d'énergie, la réduction des quantités des boues à évacuer et la diminution des nuisances olfactives sont les principales forces d'un projet de digestion en STEP. En mettant en place un tel projet les filières de traitement de l'eau et d'élimination des boues ont un bilan énergétique positif. Ces effets améliorent l'image de la STEP et de la commune auprès des citoyens. Dans le cas de la codigestion ou du compostage des boues digérées, ces derniers sont même actifs au projet.

Faiblesses : La nécessité d'un personnel qualifié sur site et l'investissement important d'un tel projet sont les principales faiblesses de la digestion. Les exploitants de STEP n'ont pas d'encouragement financier pour la mise en place d'une telle activité. La digestion ne permet pas d'éliminer les polluants contenus dans les boues et elle augmente la part d'azote volatil en le convertissant en ammoniac. Les citoyens prennent part de plus en plus à la conception des projets de digestion. Leur action ralentit souvent l'avancement des étapes. Mais c'est en réalité une véritable force pour les projets. Ils forcent les concepteurs à proposer une solution la plus adaptée au contexte local. Leur action permet d'avoir des installations intégrées à la STEP et au contexte local.

Opportunités : La prise de conscience autour de la raréfaction des ressources et du réchauffement climatique est une opportunité pour la digestion en STEP. Cette technique jouit d'une « image verte » auprès d'une partie de l'opinion publique. Aujourd'hui le potentiel de développement est encore important, il existe beaucoup de STEP qui ne pratiquent pas la digestion. Une grande partie de celles qui digèrent leurs boues ont des marges d'optimisation encore importantes. La codigestion est une véritable opportunité encouragée par la généralisation du tri sélectif des déchets. Les pouvoirs publics favorisent le développement de la digestion en soutenant financièrement les énergies renouvelables. La digestion bénéficie d'un contexte écologique favorable à son développement.

Menaces : La digestion porte également une image non séduisante liée à la fermentation des déchets. Les exploitants de la STEP peuvent rejeter le projet pour différentes raisons (absence d'intérêt personnel financier, peur des responsabilités etc.). La méthanisation se confronte aux rivalités entre les énergies conventionnelles et les énergies renouvelables. Les principaux acteurs du domaine freinent parfois le développement des énergies « vertes » en imposant des coûts de raccordement aux réseaux élevés. En France l'injection du biométhane de STEP reste interdite. Le secteur du biogaz est aujourd'hui en pleine expansion, beaucoup de gens proposent leurs services pour accompagner les STEP dans leur projet. Mais c'est engouement camoufle parfois une incompétence qui peut avoir des conséquences catastrophiques sur l'installation et sur l'image de la méthanisation.

Partie III :

France et Suisse, des motivations différentes pour la digestion en STEP

10. Développement en France et en Suisse

10.1. France

Le développement des installations de biogaz est influencé par de multiples facteurs technologiques, sociaux, politiques et législatifs. La figure 33 montre l'évolution du nombre d'installations en France et les événements susceptibles d'avoir influencé ce développement.

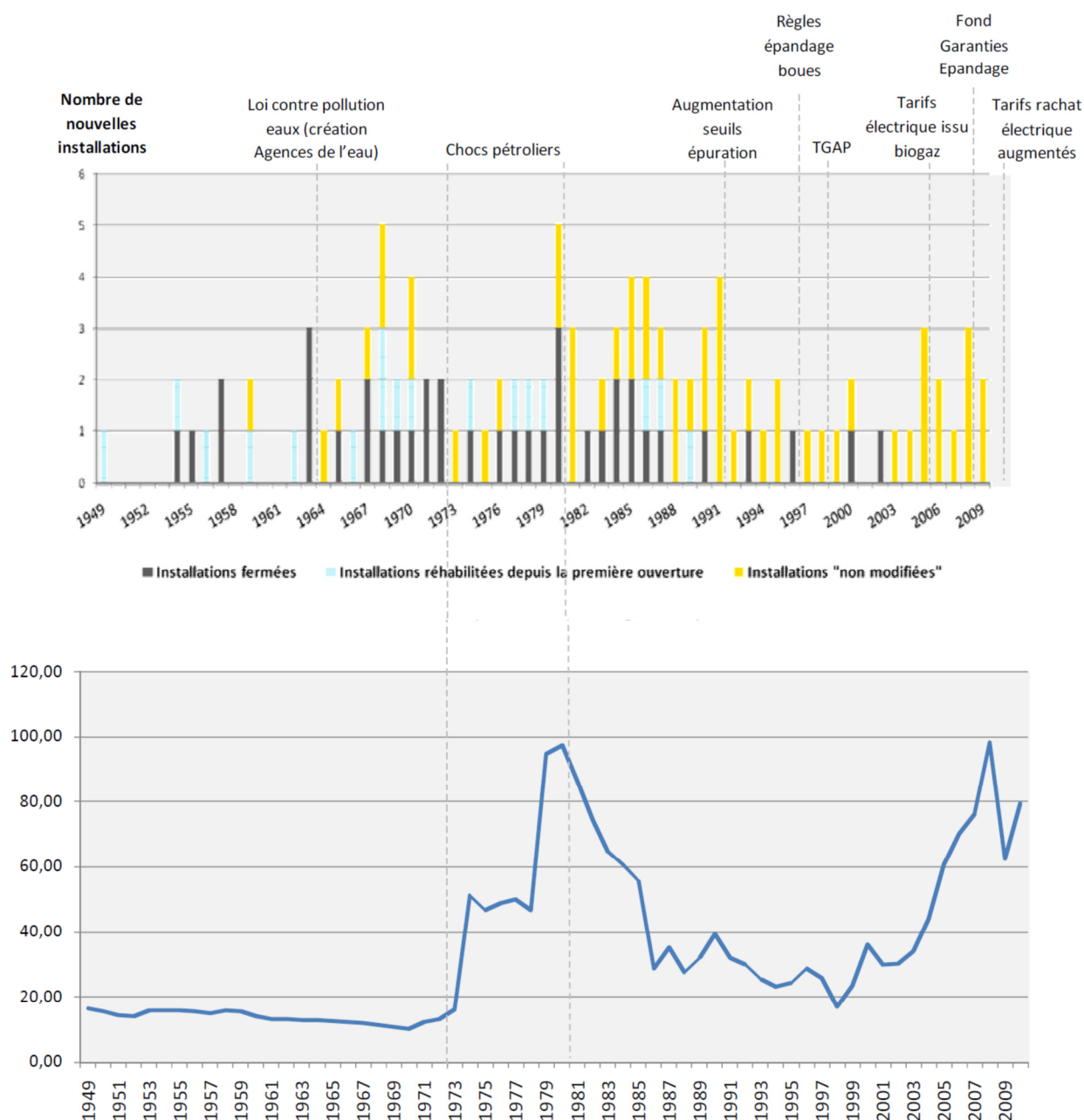


Figure 33 : Evolution du nombre de nouvelles installations de digestion en France (Ernst et Young, 2010) et évolution du cours Baril de pétrole brut (US \$ 2010), (British Petroleum, 2011)

La première figure montre le nombre de nouvelles installations chaque année. Les installations qui ne fonctionnent plus à ce jour sont en noir. Les installations qui ont subi une réhabilitation depuis leur mise en service sont en bleu clair. Les installations qui n'ont pas subi de modification jusqu'à ce jour sont en jaune.

- **Années 60, la première vague de développement**

En 1964, la loi « relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution » (Loi n° 64-1245 du 16/12/64) impulse une première vague de développement. Elle vise à protéger l'eau pour assurer un approvisionnement sain des populations, de l'agriculture et de l'industrie. Elle oblige les STEP à se moderniser pour respecter des seuils d'émissions plus stricts. Cette vague de modernisation conduit à la reconstruction complète de STEP. A cette occasion, sur la période 1964 - 1973, 20 STEP s'équipent d'unités de digestion.

- **Chocs pétroliers, un accélérateur**

Les chocs pétroliers successifs de 1973 et 1980 impactent les STEP, grosses consommatrices d'énergie. Ces événements les poussent à chercher d'autres solutions d'approvisionnements énergétiques. C'est le début de la deuxième vague de développement de la digestion en STEP. Entre 1980 et 1991, 36 installations de digestions sont construites.

- **1992 un tournant pour l'assainissement**

En 1992, la « loi sur l'eau » (Loi n° 92-3 du 03/01/92) augmente les seuils minimaux d'épuration, c'est un tournant dans le secteur de l'assainissement. De gros investissements sont nécessaires pour permettre aux STEP de respecter ces nouveaux objectifs. Les 15 années qui suivent cette réforme ne permettent pas à la digestion de se développer significativement. Les efforts financiers portent sur le traitement de l'azote et du phosphore (Ernst et Young, 2010). Parallèlement une baisse du coût des énergies s'observe sur cette période, cela expliquerait le ralentissement du développement sur cet intervalle.

- **Années 90 à nos jours : l'usage délicat des boues en agriculture**

Les années 90 sont marquées par la multiplication des conflits autour de l'épandage agricole des boues. Des associations environnementales, des riverains s'élèvent contre l'utilisation des boues en agriculture (Arcimoles et Al., 2003). La réforme de 1992 entraîne une hausse mécanique du volume des boues produites (meilleure épuration, plus de boues). Ces deux éléments expliquent le recyclage de plus en plus délicat des boues en agriculture. La recherche s'intensifie pour vérifier l'innocuité de cette pratique sur la santé et l'environnement. En 1997 le texte relatif à l'épandage des boues (Décret n° 97-1133 du 08/12/97) encadre plus fermement l'usage en agriculture. En 1999 la loi de finance instaure une taxe sur les déchets incinérés et les STEP soumises à autorisation. Elle vise à faire diminuer les quantités de déchets incinérées et mis en décharges (Taxe Générale sur les Activités Polluantes, TGAP, Loi 98-1266 1998-12-30 Finances pour 1999). Les Installations de traitement sont forcées d'améliorer la qualité des boues pour favoriser l'acceptation en agriculture. Ce climat tendu sur la question de l'usage agricole des boues persiste toujours. En 2009 le Fond de Garantie des Risques liés à l'Épandage est mis en place (Décret n°2009-550 du 18 mai 2009 relatif à l'indemnisation des risques liés à l'épandage agricole des boues d'épuration). Les STEP payent une taxe de 0,5€/t de boues évacuée en agriculture. Cet argent constitue une assurance d'indemnisation dans le cas d'un éventuel préjudice causé par l'épandage. La méthanisation est l'une des solutions pour pallier à ces contraintes (nuisances, volumes).

▪ **2006 à 2012 : Le dernier élan de développement**

En 2006 le prix des énergies augmente, les pouvoirs publics mettent en place un tarif de rachat préférentiel de l'électricité issue du biogaz (Arrêté du 10 juillet 2006 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz). C'est le premier soutien direct au développement de la digestion anaérobie en France. En 2006, c'est la 3ème vague de développement de ce secteur qui débute. L'Europe encourage cet élan en 2009 en autorisant les pays membres de l'UE à mener une politique d'incitation à la production de biogaz (Directive 2009/28/CE). La France se saisit de cette opportunité et augmente les tarifs de rachats électriques issus du biogaz en 2011 (Arrêté du 19 mai 2011 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz). Cet événement marque un tournant dans le développement de ce secteur. En 2010, le régime ICPE « d'enregistrement » a spécialement été conçu pour les installations de biogaz. C'est un régime intermédiaire entre « déclaration » et « autorisation », il permet de mieux correspondre aux spécificités des installations de biogaz. Il facilite les démarches pour les STEP. (Décret n° 2010-875 du 26 juillet 2010 modifiant la nomenclature des installations classées).

▪ **Subventions publiques**

Des programmes nationaux d'appels à projets sont régulièrement lancés par la Commission de Régulation de l'Energie. Ces appels sont spécifiques aux projets énergétiques valorisant la biomasse. La digestion des boues s'inscrit dans ces programmes (2004 ; 2007 ; 2007 ; 2011). En 2012 l'Agence de l'Eau effectue un état des lieux de la digestion en STEP. L'objectif est de lancer un appel à projets de digestion des boues en 2013 (communication Lales Joseph, Agence de l'Eau, Paris 2012). L'ADEME finance des études de faisabilité à hauteur de 50 à 70%. Elle propose des aides à l'investissement (Ernst et Young, 2010). Les Agences de l'Eau, les régions et plus rarement les départements apportent un soutien financier aux projets de digestion des boues (Ernst et Young, 2010).

▪ **Le bilan du développement français**

Au cours des 60 dernières années, la digestion en STEP a connu 3 vagues de développement successives. Les années 90 est une période délicate pour l'élimination des boues. La contestation sociale est grandissante. Aujourd'hui les citoyens s'emparent du débat énergétique et les politiques prennent des mesures qui permettent le développement des énergies renouvelables. Depuis 2006, c'est la 3ème vague de développement qui s'opère, elle devrait s'intensifier les années futures.

Les fermetures d'installations de digestion se font la plupart du temps « par défaut ». Lors du renouvellement de la STEP les offres des constructeurs qui n'incluent pas de digestion anaérobie étaient par le passé privilégiées car l'investissement était moins important (Ernst et Young, 2010). Historiquement, la digestion était proposée pour les STEP avec une capacité supérieure à 80 000 - 100 000 EH. En dessous cela relevait de la volonté de l'exploitant de la STEP (Ernst et Young, 2010). Depuis l'augmentation du tarif de rachat électrique de 2006, la digestion est incluse dans la majorité des appels d'offres (Ernst et Young, 2010).

10.2. Suisse

Selon les Offices Fédéraux de l'Energie, de la Statistique et de l'Environnement suisses, il n'existe pas d'observation statistique concernant la digestion en STEP avant 1990. L'Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA) ne dispose pas d'information supplémentaire. Il n'est donc pas possible de faire une étude aussi approfondie que pour la France. Depuis 1990, les événements historiques ont influencé le développement en Suisse, comme la figure 37 le montre.

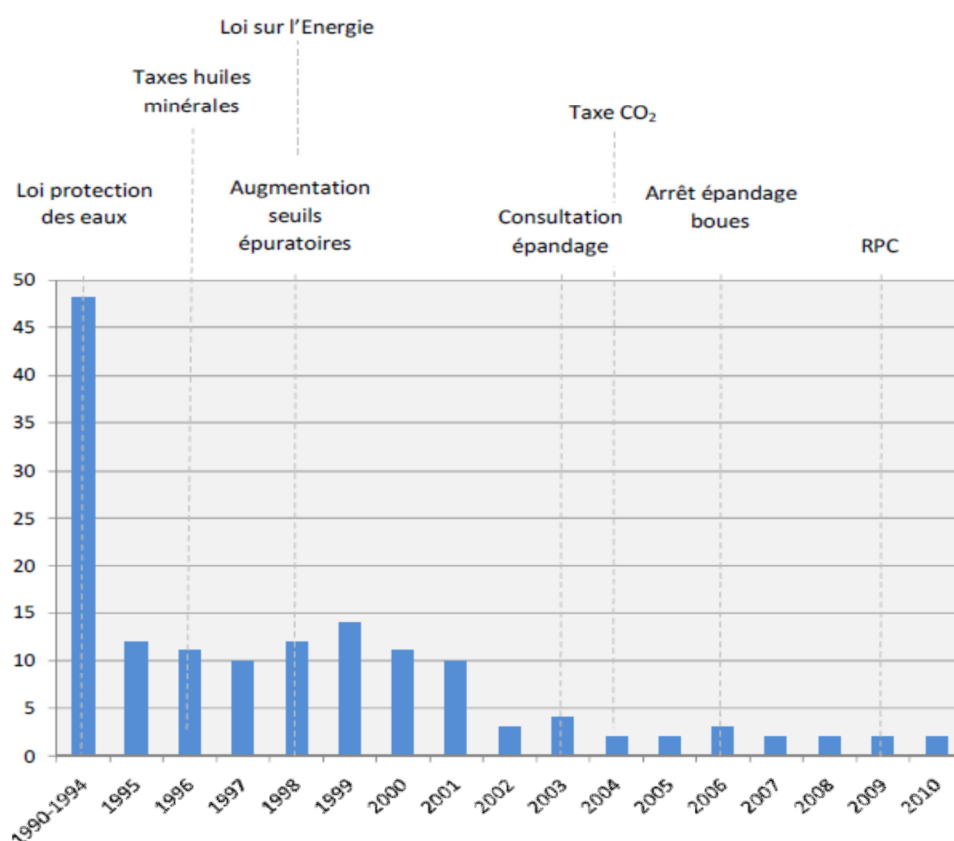


Figure 34 : Evolution du nombre d'installations de digestion en STEP en Suisse (OFEN, 2011)

▪ Période 1990 à 1994

48 installations de digestion ont vu le jour en Suisse. En 1991, la Loi fédérale sur la protection des Eaux (LEaux) renforce les exigences en matière d'épuration. Des subsides fédéraux sont alloués pour moderniser les STEP. Sur cette période la digestion anaérobie n'est pas une priorité pour les STEP, moins de 10 installations par an sont construites pendant ces 5 années.

En Suisse, 74% des installations de biogaz en STEP ont été construites avant 1994, soit 406 unités de digestion (OFEN, 2011).

- **1996 à 2001 la dernière vague de développement**

Cette période est marquée par une augmentation des nouvelles installations. Chaque année plus de 10 unités de digestion sont mises en service. Cet essor peut s'expliquer par la Loi de 1996 sur l'imposition des huiles minérales (Limpmin) qui prévoit un impôt sur la fabrication et l'extraction des produits pétroliers (300 CH/1000 L). Les utilisateurs de ces produits sont également visés, c'est le cas des STEP. La digestion est une solution pour s'affranchir de cette taxe. En 1998 la Loi sur l'Energie (LEne), fixe des objectifs de développement des énergies renouvelables. Des subventions sont accordées à hauteur de 40% du montant des projets. Les effets de ces 2 lois se ressentent en 1999 avec un pic de nouvelles installations, 13 unités de digestion sont mises en service cette année. Cette dynamique poursuit ses effets jusqu'en 2001.

- **1998 un nouvel objectif pour les STEP**

L'Ordonnance sur la protection des Eaux (OEaux) fixe des seuils d'épuration plus sévères. Les STEP doivent investir pour améliorer leurs performances épuratoires. Même si des subventions fédérales sont accordées aux STEP pour atteindre ces objectifs, leur capacité d'investissement se réduit et la digestion n'est plus la priorité. Les effets de cette modernisation se font ressentir en 2002 avec une chute des mises en service, seulement 3 nouvelles installations cette année. C'est un tournant dans le développement de la digestion, cette année marque la fin de la dernière vague de développement.

- **2002 à nos jours, un parc équipé**

Durant cette période, le secteur de l'épuration subit de grands bouleversements. En 2003 une consultation des acteurs de la filière boue est lancée pour délibérer sur l'utilisation agricole des boues. En 2006, l'Ordonnance sur le Traitement des Déchets (OTD) est amendée, l'interdiction d'épandage est proclamée, toutes les boues doivent être incinérées. La qualité agricole du digestat ne se justifie plus, la digestion anaérobie ne sert plus à faciliter l'acceptation des boues en agriculture. La Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ (Loi sur le CO₂) de 1999 met en place en 2004 la taxe sur le CO₂. Cette mesure vise à diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Les STEP sont touchées par cet impôt à hauteur de 210 CHF par tonne de CO₂. Une partie du produit de la taxe est consacré au développement des énergies renouvelables, comme la digestion. En 2009, la Rétribution à Prix Coutant de la production d'électricité est un dispositif fort qui soutient la digestion anaérobie. Elle garantit un tarif de rachat aux producteurs d'électricité renouvelable qui couvre les coûts de production. Aujourd'hui ce dispositif est victime de son succès et la liste d'attente pour bénéficier de la RPC (Rétribution à Prix Coutant) s'allonge. Malgré la contrainte de la taxe CO₂ et les soutiens pour le développement de la digestion en STEP le nombre de nouvelles installations reste faible sur la période 2002- 2010 avec environ 2 mises en service par an.

- **Le bilan du développement suisse**


Sur la période 1990 – 2010, il n'existe pas de lien direct entre le prix des énergies fossiles et le développement de la digestion en STEP. Sur cette même période, il n'existe pas de corrélation forte entre les événements politiques et l'évolution du nombre d'installations. En Suisse, 74% des installations de biogaz en STEP ont été construites avant 1994 (OFEN, 2011). Les ¾ du développement s'est effectué avant cette date, malheureusement aucune donnée n'est disponible pour comprendre cette évolution. Il semble probable que l'envolée du

prix des énergies dans la décennie 70 ait encouragé le développement en Suisse, comme c'est le cas en France. Les années 2000 marquent certainement la fin du développement massif de la digestion en STEP en Suisse. Aujourd'hui 75% des boues suisses sont digérées par voie anaérobie (OFEV, 2007); (OFS, 2010). Le déploiement de la technologie sur le territoire est déjà effectué. Il reste peu de STEP qui peuvent encore bénéficier de la digestion.

La France accuse un retard important de développement de la digestion en STEP contrairement à la Suisse qui a quasiment terminé d'équiper son parc. Les événements historiques et politiques n'expliquent pas à eux seuls le déploiement de cette technologie dans ces pays. C'est aussi le fruit d'un jeu d'acteurs complexe, qui se matérialise par des visites d'installations, des témoignages entre STEP et la construction d'une confiance entre investisseurs et porteurs de projets.


10.3. Structures des parcs de digestion en 2012

La structure des parcs de digestion dans ces deux pays peuvent être comparées :



Capacités de traitement France	
Capacités STEP (EH)	94 000 000
Capacité STEP avec digestion (EH)	24 764 413
Part des boues traitées par digestion anaérobie	26%
Production biogaz valorisée STEP	637 GWh/an

Tableau 18 : Capacités de digestion anaérobie des boues en France
(MEDDTL, 2012 ; Reverdy, Baudez, Dieude-Fauvel, 2011)



Capacités de traitement Suisse	
Capacités STEP (EH)	17 009 533
Capacité STEP avec digestion (EH)	12 837 633
Part des boues traitées par digestion anaérobie	75%
Production biogaz valorisée STEP	288 GWh/an

Tableau 19 : Capacités de digestion anaérobie des boues en Suisse
(OFEV, 2007 ; OFS, 2010)

En termes de quantités, la France produit 5 fois plus de boues que la Suisse. Actuellement les $\frac{3}{4}$ des boues produites en Suisse subissent un traitement anaérobie alors qu'en France les $\frac{3}{4}$ des boues ne sont pas digérées. Les STEP françaises digèrent 1,9 fois plus de boues que la Suisse et elle produit 2,2 fois plus d'énergie à partir des boues que la Suisse.

En 2010, la digestion en STEP a produit 37,4 kWh/hab en Suisse contre 9,8 kWh/hab en France.



					
Taille STEP	Nombre STEP avec digestion	Part	Taille STEP	Nombre STEP avec digestion	Part
<2000EH	0	0%	<2000EH	165	29%
2001-10 000 EH	0	0%	2001-10 000EH	170	30%
10 001-50 000 EH	13	20%	10 001-50 000 EH	181	32%
50 001-100 000 EH	18	28%	50 001-100 000 EH	36	6%
>100 000 EH	34	52%	>100 000 EH	20	3%
TOTAL	65	100%	TOTAL	567	100%

Tableau 20 : Structure parc digestion France (Reverdy, Baudez, Dieude-Fauvel, 2011)

Tableau 21 : Structure parc digestion Suisse (OFEV, 2007)

La France ne possède aucune installation de digestion dans les STEP de moins de 10'000 EH. 20% des STEP avec digestion ont une capacité de traitement comprise entre 50'001 et 100 000 EH. 80% de la digestion se réalise dans les STEP de grandes tailles, supérieures à 50 000 EH. Plus de la moitié des STEP qui digèrent ont une capacité de traitement supérieure à 100 000EH et 4 STEP ont une capacité qui dépasse 1 million d'habitant.

En Suisse, plus de 90% des boues digérées sont traitées dans des petites STEP ne dépassant pas 50 000 EH. 29% ont une capacité inférieure à 2 000 EH, 30% sont comprises entre 2 001 et 10 000 EH et 32% sont comprises entre 10 001 et 50 000 EH. Seulement 6% des STEP avec digestion ont une capacité comprise entre 50 001 et 100 000 EH. Seules 3% des STEP dépassent les 100 000EH, mais aucune n'a une capacité supérieure à 1 million d'EH.

Les parcs de digestion des boues en Suisse et en France sont très différents, comme le montre la figure 35. La France réserve ce traitement aux STEP de grandes tailles. La Suisse met en place la digestion sur les petites STEP. Ces différences s'expliquent en partie par la topographie et la répartition démographique des deux pays.

La Suisse possède une densité de 186hab/km² pour une population totale de 7,7 millions d'habitants. C'est un pays très montagneux, les Alpes occupent plus de $\frac{2}{3}$ de la Suisse et le Jura 12% de la surface du territoire (Département Fédéral des Affaires Etrangères, 2012). Dans ces régions les petites STEP permettent de traiter les eaux des villages. Les $\frac{2}{3}$ de la population vit en plaine, sur « Le Plateau ». Il s'étire du Lac Léman jusqu'au Lac de Constance, c'est le cœur économique du pays. Du fait de la petite taille du pays, de son dynamisme et des contraintes topographiques la densité de population est élevée dans cette

zone 450hab/km² (Département Fédéral des Affaires Etrangères, 2012). Mais les habitants ne se concentrent pas uniquement dans les grandes agglomérations de la zone (BERNE, ZURICH, BALE, GENEVE, LAUSANNE). Même si 1/3 de la population vit dans l'une de ces 5 villes, un tissu urbain villageois dense s'est développé sur le Plateau. (Département Fédéral des Affaires Etrangères, 2012) Aujourd'hui beaucoup de petites STEP sont nécessaires pour traiter les eaux de cette région. En 2012, La France compte plus de 65 millions d'habitants, elle est plus vaste et la densité de population est moins élevée avec 114hab/km² (INSEE, 2012). En 2008, 6 aires métropolitaines possèdent plus d'un million d'habitant avec en tête l'agglomération parisienne : 12 millions d'habitants (INSEE, 2012). Aujourd'hui, 77,5% de la population vit en zone urbaine. La concentration de la population dans des espaces restreints a conduit à la construction de STEP de grandes envergures. La France est sensible au coût des procédés de digestion. Elle a fait le choix de réserver cette technique aux grosses unités pour des questions d'économies d'échelles. Moyennant un coût épuratoire plus élevé la Suisse adapte cette technologie sur l'ensemble de ses STEP et plus largement sur les petites unités. Son choix renforce l'autonomie énergétique de ses installations.

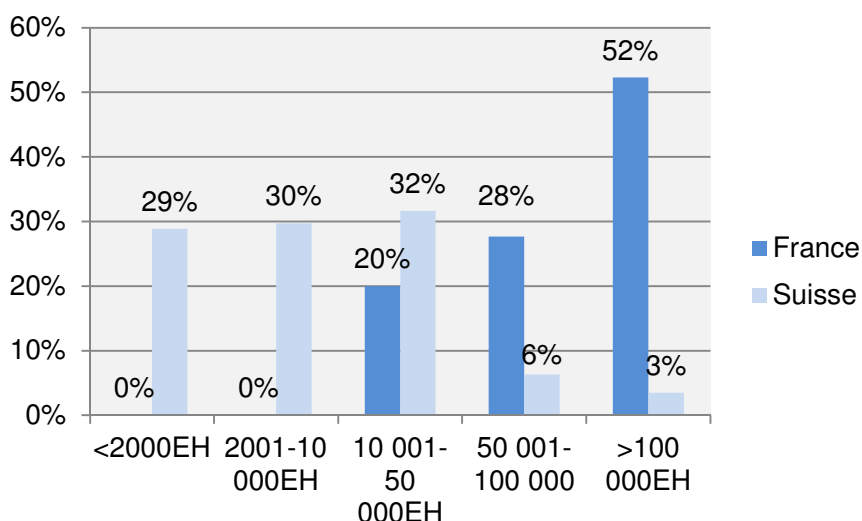


Figure 35 : Répartition des STEP avec digestion anaérobie en France et Suisse
(Reverdy, Baudez, Dieude-Fauvel, 2011 ; OFEV, 2007)

11. Visions des exploitants suisses et français

Cette partie compare les visions suisses et françaises des exploitants de STEP qui digèrent leurs boues. Il s'agit de mettre en évidence :

- Leurs motivations pour cette technique
- Les facteurs qui encouragent ou non le développement de la digestion des boues

Comme expliqué au début de ce rapport (cf. Méthodologie), les informations concernant la Suisse sont issues de l'enquête postale réalisée auprès des STEP.

11.1. Motivations des exploitants



			
Motivations des exploitants	Rang priorité	Motivations des exploitants	Note
Réduction volume des boues	1	Réduction volume des boues	2,7
Economie d'énergie	2	Production d'énergie	2,5
Qualité agricole digestat	3	Traitement odeurs	2,5
Image et communication	4	Réglementation environnemental	2,0
Réglementation environnementale	5	Image et communication	1,9
Nécessité économique	6	Qualité agricole du digestat avant 2006	1,8
Autonomie énergétique	7	Intérêts économiques	1,8
Traitement des odeurs	8		
Vente d'énergie	9		

Tableau 22 : Motivations des exploitants de STEP pour la digestion en France (Club Biogaz, 2011)²

Tableau 23 : Motivations des exploitants de STEP pour la digestion

Les exploitants français de STEP ont classé par ordre d'importance les raisons de leur motivation. Ils ont choisi la digestion anaérobie pour réduire le volume de boues à évacuer, les économies d'énergie et la qualité agricole du digestat.


Les exploitants suisses de STEP ont noté de 1 à 3 les raisons de leurs motivations : 1 peu important, 2 important, 3 très important. Ils ont choisi la digestion anaérobie pour réduire le volume de boues à évacuer, la production d'énergie et le traitement des odeurs

Les deux principales motivations des exploitants sont communes aux deux pays. Premièrement, les STEP ont choisi la digestion pour réduire le volume de boues à évacuer, c'est l'objectif principal. La seconde raison est « l'économie et la production d'énergie ». L'énergie produite est soit consommée sur place soit revendue sur le réseau. Dans les deux cas cela permet des économies, le résultat annuel de la STEP augmente. Même si les deux pays ont mis au dernier rang « l'intérêt économique de la digestion », leur engouement pour la production d'énergie traduit cet attrait économique. Le 3ème critère les distingue. En France ce procédé est choisi pour la qualité agricole du digestat, alors qu'en Suisse c'est le traitement

des odeurs qui a été déterminant. En 2008 la France épandait 73% des boues urbaines (Ministère de l'Alimentation, de L'agriculture et de la Pêche, 2009). Les conflits des années 90 autour de l'utilisation agricole expliquent la volonté de proposer un amendement de qualité au monde agricole. Les boues digérées sont plus rapidement disponibles pour les cultures, elles sont stabilisées, la fermentation n'est plus possible et l'odeur est fortement limitée. C'est certainement pour une meilleure acceptation des boues dans les filières d'élimination agricoles que les STEP françaises ont choisi la digestion anaérobie. Cet objectif se confirme par le 4^{ème} critère retenu par les exploitants français « L'image et la communication ». En Suisse l'épandage est interdit depuis 2006, mais d'autres contraintes existent. La densité de population élevée oblige les STEP à s'adapter pour ne pas nuire aux riverains. La réduction des odeurs est donc le 3^{ème} critère pour les STEP suisses. La digestion facilite les filières d'élimination des boues en diminuant les nuisances olfactives lors du transport. La « réglementation environnementale » est le 4^{ème} critère retenu par les exploitants suisses, et « l'image et la communication » n'est qu'en dernière position.


La France est marquée par un souci de reconnaissance auprès des populations. Elle souhaite correspondre aux attentes agricoles pour écouler à moindre coût ses boues. L'image et la communication engendrées par l'activité de digestion tentent d'apaiser les débats sur l'usage agricole des boues. En Suisse les enjeux sont différents, les filières d'élimination sont plus restreintes. Les STEP ont le souci de diminuer le volume à éliminer et réduire la pollution olfactive générée par l'élimination des boues.

11.2. Facteurs de développement selon les exploitants



Leviers positifs du développement	Fréquence réponses exploitants
Efficacité du procédé	95%
Image pour les collectivités	81%
Image de la méthanisation	81%
Leviers négatifs du développement	Fréquence réponses exploitants
Coût investissement	52%
Subventionnement	20%
Difficultés d'exploitation	18%

Tableau 24 : Facteurs de développement selon les exploitants français
(Sur base de AND international, 2003)



Leviers positifs du développement	Fréquence réponses exploitants
Technique (volume, odeurs)	83%
Energie	50%
Politique, législatif	33%
Leviers négatifs du développement	Fréquence réponses exploitants
Economiques	83%
Difficultés d'exploitation	32%

Tableau 25 : Facteurs de développement selon les exploitants suisses

95% des enquêtés français déclarent que l'efficacité du procédé de digestion est un atout pour le développement de cette technique. 81% pensent que le développement est porté par l'image positive de la méthanisation. Avec la même proportion, ils affirment que la digestion des boues peut se développer en sensibilisant les élus à l'amélioration de l'image de la collectivité. Ils sont 52% à déclarer que l'investissement freine le développement. Le manque de subventionnement et les difficultés d'exploitations sont perçus comme des freins à hauteur de 20 et 18%.

En Suisse, 83% des exploitants enquêtés affirment que l'efficacité technique du procédé est un atout pour son développement. Ils sont la moitié à indiquer que la production énergétique encourage le développement et un tiers à penser que les décisions politiques et la législation participent positivement au développement de la digestion. 83% des enquêtés affirment que le l'investissement est un frein à l'implantation du procédé et 32% pensent que les difficultés d'exploitation entravent le développement.

L'efficacité technique de la digestion fait l'unanimité dans les deux pays. C'est le facteur clé du développement selon les exploitants interrogés. La France met en avant l'image positive véhiculée par le procédé comme le moteur du développement de la digestion. Cette information montre l'obligation des STEP à communiquer sur leurs bonnes pratiques pour favoriser l'évacuation des boues en agriculture. Cette notion d'image est absente chez les enquêtés suisses. Selon eux, La production d'énergie, les décisions politiques et législatives sont les piliers du développement de la digestion. Les deux pays s'accordent pour dire que l'investissement est le principal frein au développement. L'exploitation d'une unité de digestion nécessite des compétences spécifiques, c'est le deuxième point qui entrave le développement en Suisse et en France.

Les évènements historiques et politiques n'expliquent pas à eux seuls le développement de la digestion en STEP. L'implantation de cette technique dans ces pays est le fruit d'une multitude d'interactions entre acteurs qui donnent confiance aux investisseurs (recherche scientifique, offre des constructeurs, visites d'installation etc.). L'Allemagne est leader mondial de la méthanisation. La Suisse alémanique a facilement pris exemple sans souffrir de la barrière de la langue sur son voisin allemand. La technique a ensuite largement diffusé en Suisse Romande. La barrière de la langue entre la France et l'Allemagne n'a sans doute pas facilité les constructeurs germanophones à pénétrer le marché français. Un autre enjeu du développement est l'acceptation du procédé par les exploitants de la STEP et les riverains. C'est ce qui sera abordé dans la suite de ce rapport.

12. Les freins à la digestion en STEP

12.1. Les cinq freins des projets

Chaque projet de digestion en STEP est particulier puisque les acteurs qui y participent sont différents. Il est quand même possible d'identifier 5 sources d'inquiétudes souvent évoquées par les citoyens et les exploitants en France et en Suisse :

▪ **Préoccupations odeurs**

La peur des nuisances olfactives peut découler d'un manque de connaissance sur les techniques de digestion. Il est important de vulgariser les techniques et les moyens mis en œuvre pour les éviter. Ce temps d'explication est encore plus important s'il s'agit d'un projet de codigestion. Chaque individu possède un seuil de tolérance différent aux odeurs. Certaines personnes sont rapidement incommodées par un faible niveau d'émission. Dans le cas de la digestion des boues de STEP, les MO préexistent à l'installation et sont déjà présentes sur le site. L'installation de digestion ne produit pas de MO fermentescibles, elle les traite. Elle ne peut pas être considérée comme la source de nuisances potentielles, au contraire elle réduit fortement les odeurs.

▪ **Préoccupations paysagères**

Une des principales raisons d'opposition des riverains à un projet de digestion est la nuisance paysagère. Une installation de méthanisation s'apparente à une petite usine, elle se compose de cuves et de bâtiments. Elle est donc confrontée aux problèmes d'intégration paysagère. Son implantation doit faire l'objet d'une concertation auprès des riverains. Des techniques simples permettent de faciliter l'intégration de l'installation : haies brise-vue, entassement partiel des digesteurs, bardage de bois sur les cuves et les bâtiments etc. Dans le cas d'une STEP, le site est déjà impacté par les installations d'épuration de l'eau, les mesures visant à intégrer la STEP dans le paysage peuvent déjà être mises en place.

▪ **Préoccupations vis-à-vis du trafic**

Les projets de méthanisation font l'objet d'inquiétudes vis-à-vis du trafic routier de camions. Le Club Biogaz a estimé le trafic dans le cas de l'alimentation d'une installation de digestion de 1MW (approvisionnement total des substrats et exportation du digestat). Le trafic routier correspond au passage de 10 camions par jour (Club Biogaz, 2011). Dans le cas de la digestion des boues, les boues arrivent à la STEP par les canalisations d'eaux usées. Seule une faible part peut être acheminée par camion en cas de codigestion. Avant mise en place de l'installation de digestion les boues étaient obligatoirement évacuées par camion ou par tracteur hors du site. Grâce à la digestion, les volumes de boues sèches sont réduits de l'ordre de 26% ce qui diminue le nombre de camions.

▪ **Préoccupations sanitaires**

Les riverains sont généralement préoccupés par les éventuels risques sanitaires que pourraient provoquer une installation de biogaz. Comme expliqué précédemment la digestion a pour effet d'abaisser la charge de pathogènes présents dans le digestat. Dans le cas de la codigestion, les substrats ajoutés aux boues sont soumis à la réglementation et un traitement d'hygiénisation est obligatoire en fonction du type de cosubstrat (pasteurisation : 70 °C pendant plus d'une heure (Club Biogaz, 2011)). Les microorganismes cultivés dans le digesteur sont présents à l'état naturel. La digestion ne produit pas d'agent pathogène supplémentaire, si un risque sanitaire existe, il est lié à la composition des boues.

▪ **Préoccupations liées à un risque d'explosion**

L'implantation d'une unité de digestion sur une STEP implique la production, le stockage et la valorisation de biogaz. Le biogaz est inflammable et un risque potentiel d'explosion existe.

Ces sites sont soumis à une réglementation qui vise à faire respecter des règles de sécurité, telles que (Club Biogaz, 2011):

- L'obligation d'étanchéité des équipements de circulation et de stockage du biogaz
- La surveillance du taux de méthane dans les espaces confinés avant intervention
- La mise en place de détecteurs de fumées
- La mise en place d'une zone ATEX (Atmosphères Explosives)

Une zone ATEX fait l'objet d'une surveillance particulière et représente une zone autour du digesteur dans un périmètre d'environ 4 mètres (Club Biogaz, 2011). Le risque d'explosion est heureusement faible puisque 3 conditions doivent être réunies simultanément (Club Biogaz, 2011):

- Une atmosphère confinée permettant l'accumulation du méthane
- La mise en contact d'oxygène et de méthane avec une teneur en méthane comprise entre 5 et 15%
- Une source d'ignition (flamme, étincelle).

Sur 6000 sites en Allemagne 5 accidents ont été recensés (Club Biogaz, 2011). Tous ont eu lieu lors de la montée en charge du digesteur (remplissage et démarrage de la production de biogaz) (Club Biogaz, 2011). L'air présent dans le digesteur doit être progressivement chassé par le biogaz et aucuns travaux ne doivent être effectués dans la zone ATEX, ce qui n'a pas été respecté dans ces cas. Une fois l'air chassé du digesteur la 2nd condition nécessaire à l'explosion n'est plus possible et le risque est écarté.

Même si chaque installation est particulière, la transparence est un gage de confiance auprès des populations, c'est une règle qui doit s'appliquer à tout projet de biogaz. Les citoyens apparaissent aux yeux des porteurs de projets comme une contrainte. En réalité c'est l'occasion pendant la phase de réflexion de comprendre les points de blocages évoqués par ces personnes. C'est le moment où il est encore possible d'adapter l'installation aux attentes locales. Si ces opinions ne sont pas prises en compte à cette étape, ces personnes exerceront des pressions sur les représentants publics pour obliger la fermeture de l'installation. Il est beaucoup plus simple techniquement et économiquement de modifier un projet lors de sa conception que plus tardivement. Le dernier paragraphe de cette étude analyse l'intérêt des exploitants de STEP dans un projet de digestion.

12.2. Intérêt de la digestion pour l'exploitant

La méthanisation en STEP est un cas particulier de la digestion. C'est le seul cas où les porteurs de projets ne retirent pas de bénéfice de l'installation. En mettant en place la digestion des boues, l'exploitant de STEP voit sa charge de travail augmenter sans compensation de salaire. Ces personnes n'ont pas d'intérêt personnel à développer de tels projets sur leur STEP. Dans un projet agricole les exploitants réalisent un bénéfice en revendant l'électricité produite. Dans un projet industriel l'entreprise est intéressée par le bénéfice lié à la revente énergétique.

Un exploitant de STEP est employé pour épurer l'eau. C'est pour cette tâche qu'il a choisi ce métier. La production d'énergie est un autre domaine, ses compétences ne lui permettent pas de gérer de façon autonome une installation de digestion. Une formation est nécessaire.

L'engagement d'un exploitant de STEP dans un projet de digestion relève du défi personnel. L'âge de la personne détermine parfois cet engouement. En début de carrière l'envie d'apprendre et de découvrir est souvent plus forte. Ces éléments doivent être pris en compte pour proposer une solution de digestion offrant également des avantages à ses exploitants. Il est possible d'imaginer une prime au salaire initial, modulée en fonction de la production de biogaz et du degré de satisfaction du voisinage de la STEP. En fonction des capacités et des envies de la personne, l'encouragement peut prendre la forme d'une promotion au sein de la STEP accompagnée d'une prise de responsabilités plus importante.

La France comme la Suisse pratiquent tous les deux la digestion mais ces deux pays ont des schémas de développement très différents. Jusqu'aujourd'hui, la France réserve cette technologie majoritairement aux STEP de plus de 100 000 EH alors que la Suisse l'applique couramment aux STEP de moins de 10 000 EH. Ces différences s'expliquent en partie par les politiques de soutiens, la topographie et la répartition géographique des populations sur ces territoires. Des facteurs sociaux et culturels influencent également le déploiement de cette technique dans les deux pays. L'analyse des motivations des exploitants a révélé également des différences entre les deux pays liées à l'histoire de l'usage des boues.

Conclusions

La digestion anaérobie offre une solution intéressante aux stations d'épuration voulant optimiser leur fonctionnement. L'utilisation des boues pour la production d'énergie renouvelable s'accompagne de nombreux avantages, comme la réduction du volume, la diminution des odeurs, la production d'électricité, de chaleur ou de biométhane, mais également la qualité agricole du digestat dans les pays où l'épandage est autorisé.

En 2012, les options technologiques sont vastes et il est important pour une STEP de choisir des procédés adaptés et d'évaluer judicieusement la technologie qui sera appliquée.

Pour une STEP déjà équipée d'une unité de digestion, il est intéressant d'étudier les possibilités d'optimisation. Trois pistes principales ont été identifiées (listées par ordre de priorité):

1. Augmenter le taux de valorisation du biogaz
2. Réduire les consommations énergétiques
3. Augmenter la production de biogaz.

Dans les STEP en particulier, le biogaz n'est souvent pas valorisé de manière optimale. Il est fréquent que des quantités importantes de biogaz soient brûlées à la torchère ou que les technologies en place sur la STEP soient obsolètes et moins efficaces.

Avant de se focaliser sur l'augmentation de la production de biogaz, la STEP doit garantir une digestion économe en énergie. Souvent l'équipement vieillissant implique une baisse de rendement et une surconsommation d'énergie. Un plan d'entretien régulier des équipements limite le gaspillage énergétique sur l'installation.

La production de biogaz peut être augmentée par la mise en place d'un prétraitement des boues. Une unité de désintégration peut augmenter la production de biogaz jusqu'à environ 18% ; en plus, cela réduit la quantité des boues résiduelles (jusqu'à environ 20% de la matière sèche). La codigestion est une autre solution offerte aux STEP pour augmenter significativement la production de biogaz. Cette technique reste rarement pratiquée en STEP alors que son potentiel est conséquent.

La Suisse et la France montrent des schémas de développement opposés : seulement 26% des boues d'épuration françaises sont digérées (9,8 kWh/hab) contre 74% en Suisse (37,4 kWh/hab). Ceci s'explique en partie par des décisions politiques et des orientations environnementales différentes dans les deux pays.

Les marges de développement françaises sont donc importantes. Cependant, les clés du développement restent prioritairement politiques. En Suisse, le développement de la filière se fera principalement sur l'optimisation et la réhabilitation des installations déjà construites.

Bibliographie

Citation texte	Référence Bibliographie
ADEME, 2002	ADEME, 2002. Risques sanitaires liés aux unités de compostage des déchets: présentation de deux études. http://www.fnade.org/sites/fnade/-upload-/2010_17067_20060819174910.pdf , page consultée le 21 février 2012
ADEME, 2003	ADEME, 2003. Les différents types de boues d'épuration et leurs traitements. http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f15.htm , page consultée le 1 février 2012.
ADEME, 2003 ²	ADEME, 2003. L'assainissement: l'origine des boues d'épuration. http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/chap14.htm , page consultée le 15 mars 2012
ADEME, 2003 ³	ADEME, 2003. Mise en décharge et incinération : techniques et contraintes réglementaires. http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f53.htm Page consultée le 15 mars 2012.
ADEME, 2003 ⁴	ADEME, 2003. La valeur agronomique des boues d'épuration. http://www.ademe.fr/partenaires/Boues/Pages/f22.htm , page consultée le 21 mars.
ADEME, 2004 ²	ADEME, 2004. Séchage thermique des boues urbaines et industrielles, Etat de l'art. http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/mediatheque/Collectivite/Technologie/S_chage_boue_sBD.pdf , page consultée le 15 février
ADEME, 2010	ADEME, 2010. Méthanisation dans la filière porcine Séparation de phases, séchage et normalisation d'un digestat. http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=1DD96C0A6FFD4533274D25152715179B_tomcatlocal1308054874731.pdf , page consultée le 9 février 2012.
ADEME, 2012	ADEME, 2012. L'énergie solaire photovoltaïque. http://www.ademe.fr/midi-pyrenees/a_2_08.html , page consultée le 29 mars 2012.
ADEME, 2011	ADEME, 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats. http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=79519&p1=30&ref=12441 , page consultée le 6 mars 2012

AFITE, 2010	AFITE, 2010. La valorisation des boues à quel prix? Société FFE, Paris, 66p.
Agence locale de l'Energie des Ardennes, 2009	Agence locale de l'Energie des Ardennes, 2009. Etude sur la valorisation du biométhane agricole: l'option bioGNV. http://www.ale08.org/IMG/pdf/EtudeGNV7finale-2.pdf , page consultée le 19 mars 2012.
AND international, 2003	AND International, 2003. Le marché de la méthanisation en France: hypothèses d'évolution à 5 et 10ans, synthèse. http://biogaz.atee.fr/news/categoryfront.php/id/17/Etudes,_rapports.html , page consulté le 30 avril 2012.
Arcimoles et Al., 2003	Arcimoles M, Borraz O, Salomon D, 2003. Les Mondes des Boues, La difficile institutionnalisation des filières d'épandage des boues d'épuration urbaines en agriculture. http://www.ademe.fr/partenaires/boues/Documents/MondeDesBoues.pdf , page consultée le 26 avril 2012
Bertholon J, 2002	Bertholon J, 2002. <i>Les déchets solides de l'incinération des ordures ménagères</i> . Université de Cergy-Pontoise, France, 38 pages.
British Petroleum, 2011	British Petroleum, 2012. Statistical Review of World Energy 2011 BP. http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481 , page consultée le 25 avril 2012
Club Biogaz, 2011	ATEE Club Biogaz, 2011. Guide de bonnes pratiques pour les projets de méthanisation. http://biogaz.atee.fr/news/fullstory.php/aid/291/Guide_de_bonnes_pratiques_pour_les_projets_de_m_E9thanisation.html , Page consultée le 21 février 2012
Club Biogaz, 2011 ²	ATEE Club Biogaz, 2011. Etat des lieux de la filière de méthanisation France. http://biogaz.atee.fr/news/fullstory.php/aid/271/Etat_des_lieux_de_la_fili_E8re_m_E9thanisation_en_France.html , page consultée le 7 mars 2012.
Département Fédéral des Affaires Etrangères, 2012	Département Fédéral des Affaires Etrangères, 2012. Espaces de vie, http://www.swissworld.org/fr/geographie/urbanisme/espaces_de_vie/ , page consultée le 14 mai 2012.
Deublein et Steinhauser, 2008	Deublein D, Steinhauser A, 2008. Substrates. In : Deublein D. <i>Bio-gas from Waste and Renewable Resource</i> . WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, p57-65.

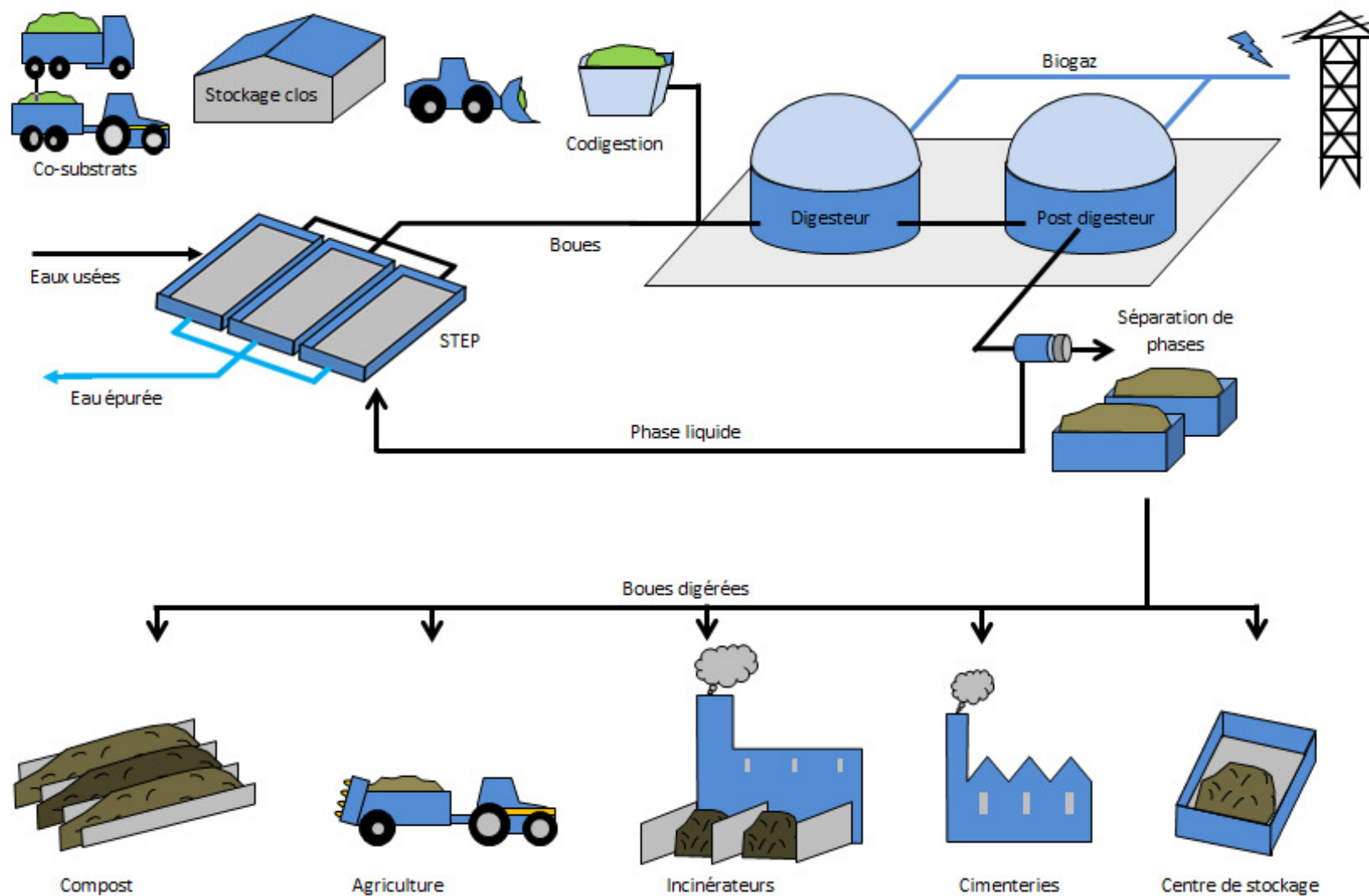
Doublet <i>et al.</i> , 2004	Doublet S, Leclerc C, Couturier C, Berger S, 2004. La qualité agromonomique des digestats. Solagro, Angers, 181 pages.
Eder et Schulz, 2006	Eder B & Schulz H, 2006. Biogas Praxis. Ökobuch Verlag Versand GmbH, Staufen Allemagne, 238 pages.
Ernst et Young, 2010	Ernst et Young, 2010. Etude de marche de la méthanisation et des valorisations du biogaz. http://bibliotheque.grdf.fr/fileadmin/user_upload/images/Etude_de_Marche_Biogaz_Rapport.pdf , page consultée le 14 mars 2012
FAO, 2005	FAO_Food and Agriculture Organization, 2005. Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. http://ftp.fao.org/agl/agll/docs/lwdp2_f.pdf , page consultée le 21 février 2012
INSEE, 2012	INSEE, 2008. Les 30 premières aires urbaines métropolitaines en 2008. http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATTEF01203 , page consultée le 13 mai 2012
Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, 2009	Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, 2009. Bilan de dix années d'application de la réglementation relative à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/cgaaer_1771_epandage_boues.pdf , page consultée le 20 février 2012
MEDDTL, 2012	Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement (MEDDTL) 2012. L'assainissement collectif. http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-directive-sur-les-eaux,12217.html , page consultée le vendredi 11 mai 2012.
Müller <i>et al.</i> , 2008	Müller E, Graf E, Schmid F, Kobel B, Roth Y, Andri Levy G, Kind E, Moser R, Brügger R, 2008. Energie dans les stations d'épuration, guide de l'optimisation énergétique des stations d'épuration des eaux usées. VSA, Association Suisse des professionnels de la protection des eaux, OFEN-Office Fédéral de l'ENergie, Zurich, 326 pages.
OFEN et EREP SA, 2009	OFEN, EREP SA, 2009. État de l'art des méthodes (rentables) pour l'élimination, la concentration ou la transformation de l'azote pour les installations de biogaz agricoles de taille petite/moyenne. http://www.bfe.admin.ch/forschungbiomasse/02390/02720/03175/index.html?lang=fr&dossier_id=02917 , page consultée le 5 mars 2012
OFEN, 2007	OFEN, 2007. Comparaison des technologies de pré-traitement des boues d'épuration pour l'augmentation de la production de biogaz.

<http://www.bfe.admin.ch/org/index.html?lang=fr>, page consultée le 7 mars 2012

OFEN, 2011	OFEN, 2011. Statistique Globale Suisse de l'énergie en 2010. http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr&dossier_id=00763 , page consultée le 08/05/12
OFEV, 2007	OFEV. Liste STEP Suisse [courrier électronique à Adèle Mottet]. Communication personnelle le 2 mai 2012.
OFS, 2010	Office fédéral de la Statistique, 2010. Nouvelles énergies renouvelables, production. http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/08/22/lexi.html , page consultée le 14 mai 2012
RECORD, 2003	RECORD-REseau COopératif de Recherche sur les Déchets, 2003. Méthanisation des déchets organiques Etude Bibliographique. http://www.record-net.org/record/etudesdownload/record01-0408_1A.pdf , page consultée le 7 février 2012.
RECORD, 2009	RECORD, 2009. Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse. http://www.record-net.org/record/etudesdownload/record07-0226_1A.pdf , page consultée le 23 janvier 2012.
Reverdy, Baudez, Dieude-Fauvel, 2011	Reverdy al, baudez jc, dieude-fauvel e, 2011. La digestion anaérobie des boues de stations d'épuration urbaines Etat des lieux – Etat de l'art. http://cemadoc.cemagref.fr/exl-php/util/documents/accede_document.php , page consultée le 30/04/2012
SOLAGRO, 2001	SOLAGRO, 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines. Etat des lieux, état de l'art. http://www.solagro.org/site/430.html , page consultée le 1 février 2012 Toulouse France, 36p.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Schéma de la codigestion en STEP



ANNEXE 2 : Questionnaire pour l'enquête en STEP

Questionnaire EREP SA: Enquête sur les motivations des STEP suisses à engager la digestion anaérobie des boues:

Présentation du contexte de la STEP

Quand l'installation de digestion a-t-elle été construite?	
Quelle est la taille du (des) digesteur(s)?	
Quelle est la température de digestion ?	
L'installation de digestion rencontre-t-elle des problèmes de fonctionnement? Si oui, lesquels ?	
Votre STEP est-elle à proximité de résidences, habitations, bureaux? (oui/non)	

Motivations pour la digestion des boues :

Quels sont les raisons qui vous ont poussé à mettre en place la digestion anaérobie des boues?	Veuillez cocher pour renseigner l'ordre de priorité:		
	Peu important	Important	Très important
Réglementation environnementale à respecter			
Traitement des odeurs			
Réduction du volume des boues			
Qualité agricole du digestat avant 2008			
Production d'énergie (autonomie énergétique)			
Intérêts économiques (vente d'énergie)			
Image et communication			
Autres raisons:			

Veuillez citer brièvement les 2 principaux leviers et freins au développement de la filière méthanisation pour les STEP (facteurs politiques, législatifs, économiques...)

Levier 1:	
Levier 2:	
Frein 1:	
Frein 2:	

Types de substrats digérés :

Quelles sont les quantités de boues digérées? (t/an) et (% MS)

Si codigestion : Quelles sont les quantités de cosubstrats digérées? (t/an)

Quels sont les types de cosubstrats utilisés et leur teneur en MS (%).

Procédés de prétraitements des boues avant digestion:

Avant digestion, pratiquez-vous un prétraitement des boues ? Si oui, lequel ?

Si codigestion : Avant digestion, pratiquez-vous un prétraitement des cosubstrats ? Si oui, lequel ?

Quels sont les motifs qui ont poussé à mettre (ou ne pas mettre) en place un prétraitement?

Production de biogaz et valorisation énergétique:

Quelles sont les quantités de biogaz produites? (kWh/an)

Comment est valorisé le biogaz? (chaudière, CCF, microturbine, injection...)

Quelle est la part de biogaz dédiée à chaque mode de valorisation (%) ou la production de chaque procédé de valorisation (kWh/an)?

Quelle est la part de biogaz torché par an? (kWh/an) ou (%). Si aucune donnée disponible, une estimation serait appréciée.

Le biogaz subit-il un traitement avant d'être valorisé, et si oui le(s)quel(s)?

Dans le cas où le biogaz serait valorisé en chaleur (CCF/turbine/chaudière), comment est utilisée la chaleur?

Valorisation et devenir des boues digérées:

Une fois digérées, quels sont les traitements que vous réservez aux boues (décantation, centrifugation, séchage...)?

Quelle est la teneur moyenne en MS des boues en sortie de STEP?

Comment les boues sont-elles élimi-

nées?	
Dans le cas d'une séparation de phases : Quel est le devenir de la fraction liquide et quels sont les traitements appliqués ?	
Souhaitez-vous ajouter un commentaire au sujet de la digestion anaérobie des boues ?	

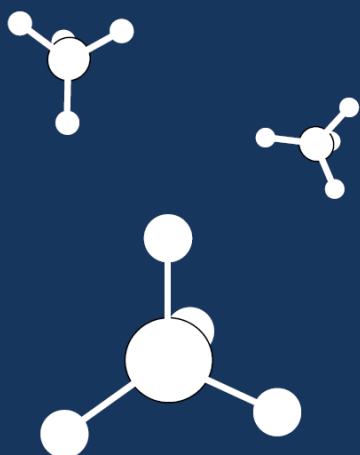
ANNEXE 3 : Etudes de cas - STEP Morges (Suisse) et de Morillon (France)

Présentation	Morges (2010)	Morillon (2011)
Mise en service	1974	2009
Capacité	56 000 EH	50 000 EH
Substrats	Boues	Boues + lavures de restaurant
Digesteurs	Primaire chauffé, secondaire froid (2*1000m ³)	Primaire chauffé
Brassage	Recirculation biogaz dans le I ^{ère} , brassage à hélice dans le II ^{ème}	/
Température	Mésophile	Mésophile
TRH	50 jours (sur les 2 digesteurs)	/
Traitements des matières		
Prétraitement 1	Epaississement, table égouttage	Epaississement boues I ^{ère} et II ^{ème}
Prétraitement 2	/	Criblage et hygiénisation des lavures
Post traitements	Centrifugation avec floculant (32%MS, liquide renvoyé en tête de STEP, la nuit)	Centrifugation avec floculant (31%MS, liquide renvoyé en tête de STEP)
Valorisation		
Biogaz	Cogénération (180 kWelec : 37,5% élec et 52,5% therm)	Cogénération + chaudière dual fuel
Utilisation Electricité	Injection dans le réseau	Injection dans le réseau
Utilisation chaleur	Chauffage digesteur et locaux	Chauffage digesteur et locaux, hygiénisation.
Digestat	Incinérateurs de Vidy-Lausanne et Posieux-Fribourg	Compostage Normé NFU 44-095 Vente de composte, offert aux résidents du SIVOM, dans la limite de 50kg/an
Production énergie		
Electricité	942 480 kWh	226 513kWh (2011)
Chaleur	673 200 kWh	/
Rendement biogaz	2091 kWh/tMO	/
Temps service CCF	5416 h	/
Biogaz torché	1,70%	/
Revenu électrique	RPC 2012	27411€ (0,12€/kWh)
Autres		
Coût collecte cosubstrats	/	320€/t
Consommation él. STEP	1 009 935 kWh	/
Autonomie électrique	0,93	/

ANNEXE 4 : Plaqueette – Diagnostic énergétique de la digestion anaérobie en station d'épuration



Diagnostic de la Digestion Anaérobie en Station d'Epuration



Cet outil s'adresse à toute personne désireuse d'optimiser les performances énergétiques d'une installation de biogaz en STEP. Il suffit de renseigner les informations dont vous disposez, de les comparer aux valeurs indicatives et de mettre en place les actions proposées.

1

Paramètres de digestion

ID	Unités		Valeurs indicatives				Réponse
A	-Température annuelle moyenne du digesteur	[°C]	Mésophile 37 - 42°C		Thermophile 55 - 60 °C		.....
	-Ecart entre Tmin et Tmax (<i>par an</i>)		Optimum ± 0,5°C		Maximum ± 1°C		.....
B	-pH annuel moyen du digesteur	[pH]	Minimum 6,5		Optimum 7,0		.....
	-Ecart entre pH min et pH max (<i>par an</i>)		± 0,2 pH		Maximum 7,5		.....
C	TRH (<i>Volume digesteur [m³] / Volume boues introduit par jour [m³/j]</i>)	[jours]	19 - 25 jours				.....
D	-Part de la production de biogaz valorisée par an (<i>électricité, chaleur etc.</i>)	[%]	5 000 - 10 000 EH 97%		10 000 - 30 000 EH 98%		.....
	-Part de la production de biogaz torchée par an (<i>non valorisée</i>)		<3%		<2%		.....
E	Cogénération	[%]	5 000 - 10 000 EH 29%		10 000 - 30 000 EH 33%		.....
	-Rendement électrique CCF (<i>indiqué par le constructeur</i>)		Minimum 45%		Maximum 55%		.....
F	-Rendement thermique CCF (<i>indiqué par le constructeur</i>)						.....
G	Rendement thermique chaudière (<i>indiqué par le constructeur</i>)	[%]	Minimum 95%				.....
	-Quantité MS entrée en digestion par jour	[tMS/jour]	/				.....
-Pourcentage MS entrée en digestion	[%]	Minimum 3,5%					.....
H	-Quantité MS sortie de digestion par jour	[tMS/jour]	/				.....
	-Pourcentage MS sortie de digestion	[%]					Moyenne 4,7%
I	-Quantité MO entrée de digestion par jour	[tMS/jour]	/				.....
	-Pourcentage MO entrée de digestion (<i>En pourcentage de la MS</i>)	[%]					Moyenne 2,8%
J	-Quantité MO sortie de digestion par jour	[tMS/jour]	/				.....
	-Pourcentage MO sortie de digestion (<i>En pourcentage de la MS</i>)	[%]					Maximum 3,8%
K	-Quantité MO entrée de digestion par jour	[tMS/jour]	/				.....
	-Pourcentage MO entrée de digestion (<i>En pourcentage de la MS</i>)	[%]					Maximum 78%
L	-Quantité MO sortie de digestion par jour	[tMS/jour]	/				.....
	-Pourcentage MO sortie de digestion (<i>En pourcentage de la MS</i>)	[%]					Maximum 64%
M	Production journalière de biogaz (<i>en volume ou puissance</i>)	[Nm³/jour] [kWh/jour]	/				.....

2

Indicateurs de performances

ID	Opérations	Unités	Valeurs indicatives			Réponse
L	Charge Organique	G ou l / volume digesteur [kg MS/m ³ .j] [kgMO/m ³ .j]	Minimum 0,35 kgMS/m ³ .j 1,0 kgMO/m ³ .j	Moyenne 2,0kgMS/m ³ .j 1,5kg MO/m ³ .j	Maximum 5,5 kgMS/m ³ .j 3,0 kgMO/m ³ .j	.....
M	Taux d'abattement de la MS	(G-H)/G [%]	Minimum 36%		Maximum 48%	.....
N	Taux d'abattement de la MO (cas de codigestion)*	(I-J)/I [%]	Minimum 48%(62%)*		Maximum 70%(78%)*	.....
O	Production de biogaz par tonne de MS (cas de codigestion)*	K/G [Nm ³ /tMS] [kWh/t MS]	Minimum 141 Nm ³ /tMS 911 kWh/t MS	Moyenne 347 (456,5)*Nm ³ /tMS 2 242 (2 627)*kWh/t MS	Maximum 560 Nm ³ /tMS 3 618 kWh/t MS	.....
P	Production de biogaz par tonne de MO (cas de codigestion)*	K/I [Nm ³ / t MO] [kWh/t MO]	Traitement I^{ère}, II^{ère}, III^{ère} 475 (561)*Nm ³ /tMO 3 069(3 228)* kWh/tMO		Traitement I^{ère}, II^{ère} 525Nm ³ /tMO 3 379kWh/tMO	.....

3

Pour aller plus loin...

ID	Unités	Valeurs indicatives			Réponse
Q	Concentration NH ₄ -N [g/L]		Maximum 4 g/L		.....
T	Concentration AGV / Concentration carbonates /		Maximum 0,5		.....
U	Consommation pour chauffage du digesteur par tonnes de MS [kWh/tMS]	Minimum 583 kWh/tMS		Maximum 666,7 kWh/tMS	.....
V	Puissance du brasseur par m ³ de digesteur (indiquée par le constructeur) [W/m ³]	Minimum 4 W/m ³		Maximum 6 W/m ³	.....
W	Consommation pour brassage digesteur (fonction de la siccité boues et du TRH) [kWh/tMS]	MS 4% ; TRH 35 jours 50 - 70 kWh/tMS	MS 6% ; TRH 30 jours 70 - 110 kWh/tMS	MS 8% ; TRH 35 jours 130 - 190 kWh/tMS	.....
X	Teneur en CH ₄ du biogaz brut (après condensation) [%]	Minimum 56%	Moyenne 65%	Maximum 69%	.....

*Pour valeur d'exemple : 70% boues 5%MS ; 30% déchets communaux 19%MS (feuilles + herbes + biodéchets)

Actions

Augmenter le taux de valorisation du biogaz

Vitesse intervention	Actions	Effets
Court terme	-Entretien préventif CCF (vidanges, révisions) -Tous les 5 ans identifier les fuites de biogaz (trémie insertion, raccords canalisations etc.)	-Diminution des pertes de biogaz
Moyen terme	-Garantir une épuration du biogaz performante -Envisager deux systèmes de valorisation -Remplacer les systèmes de valorisation par des systèmes avec meilleurs rendements	-Augmentation la disponibilité des équipements -Augmentation du taux d'utilisation des équipements
Long terme	-Envisager un réseau de chaleur avec les infrastructures environnantes	-Diminution du biogaz torché
ID concernés	D - E - F	

Diminuer la consommation d'énergie

Vitesse intervention	Actions	Effets
Court terme	-Ne pas excessivement brasser le digesteur -Nettoyer canalisation chauffage (détartrage) et surfaces de contact échangeur de chaleur -Réviser régulièrement la chaudière (oxydation brûleurs, tartre)	-Brassage et chauffage économes -Diminution du chauffage inutile (eau, sable dans digesteur)
Moyen terme	-Epaissir les boues avant digestion sans dépasser la charge organique maximale du digesteur -Vérifier l'isolation thermique du digesteur (casser les ponts thermiques) -Désensabler périodiquement le digesteur	-Diminution des déperditions de chaleur -Protection des équipements de chauffage
Long terme	-Remplacer le brasseur, les pompes, chaudière, en cas de sur- ou sous-dimensionnement	
ID concernés	C - U - V - W	

Augmenter la production de biogaz

Vitesse intervention	Actions	Effets
Court terme	-Augmenter la sensibilité du régulateur de température du digesteur -Brasser assez régulièrement, avec une puissance adaptée pour homogénéiser la température -Fractionner les apports de matières au maximum (surtout en codigestion : graisses) -TRH assez long pour abattre la MO	-pH digesteur équilibré, stable et pouvoir tampon élevé -Température fixe -Réduction des concentrations en AGV -Taux d'abattement MO > 50%
Moyen Terme	-Eviter de modifier la composition de la ration (quantité, qualité) -Isolation thermique performante du digesteur -Augmenter la charge organique du digesteur sans jamais la dépasser (déshydratation avant digestion, codigestion)	-Augmentation de la teneur en CH ₄ en biogaz -Flore microbienne stable et performante -Augmentation de l'autonomie énergétique de la STEP
Long Terme	-Mettre en place un stockage des coproduits pour lisser les pics d'alimentation du digesteur -Installer un prétraitement de désintégration	-Augmentation de la production de biogaz et des bénéfices
ID concernés	A - B - C - L - M - N - O - P - Q - R - T - X	