

LA DIGESTION ANAÉROBIE DES BOUES URBAINES

état des lieux, état de l'art





SOLAGRO est une association dont l'objectif est de « promouvoir des techniques et pratiques participant d'une gestion durable et solidaire des ressources naturelles ». Elle agit dans les domaines de l'énergie, de l'environnement et de l'agriculture.

Réunissant près de 150 adhérents de tous horizons professionnels et sociaux, elle est dotée d'une structure technique de 12 personnes aux compétences complémentaires : agronomie, énergétique, économie, écologie, journalisme.

Indépendante, elle agit dans un cadre contractuel avec des partenaires divers : collectivités locales ; administrations ; agences locales, régionales, nationales et européennes ; entreprises privées ; agriculteurs ; associations...

Ses actions portent sur :

- ◆ l'information, la formation et l'animation ;
- ◆ les études techniques, la réalisation d'opérations de démonstration ;
- ◆ l'analyse prospective, l'évaluation des filières ;
l'accompagnement de programmes de recherche.

La digestion anaérobie relève de problématiques énergétiques, environnementales et agricoles : elle est au cœur de l'action menée par SOLAGRO depuis plus de 15 ans.

Parmi les principaux travaux menés sur ce sujet :

- ◆ la valorisation du biogaz : programmes de démonstration de production de gaz naturel, de gaz carburant pour véhicules, d'électricité ;
- ◆ la gestion du gaz de décharge : programmes de recherche & démonstration sur des procédés « bioréacteur », études d'impact, conseil aux exploitants, expertise ;
- ◆ la digestion anaérobie des boues urbaines : études comparatives de filières ;
- ◆ la co-digestion : programmes de recherche, lancement d'opérations pilotes ;
- ◆ la méthanisation des déchets municipaux : conseil aux collectivités, expertise ;
- ◆ la valorisation agronomique du compost : réalisation d'outils de formation, diagnostics agri-environnementaux.

SOLAGRO

219 avenue de Muret - F 31300 Toulouse
Tél. 33 (0)5 61 59 56 16 - Fax 33 (0)5 61 59 98 41
E-mail : solagro@solagro.asso.fr

Rédaction :

**Christian Couturier, Sylvaine Berger,
Isabelle Meiffren (SOLAGRO)**

La digestion anaérobie des boues urbaines

**Co-édité par l'Agence de l'eau
Adour-Garonne et Solagro - 2001**

Dépôt légal 4^e trimestre 2001

Toute reproduction même partielle
est interdite sans l'accord des éditeurs

Conception :

**Irène Héroult
Réalisation
Studio Stephan Arcos**

Photogravure :
Quat'coul

Impression :
Imprimerie Ménard

Préambule

Agence de l'Eau Adour-Garonne

90 rue du Férétra
31078 TOULOUSE CEDEX 04
Tél : 05 61 36 37 38
Fax : 05 61 36 37 28
E-Mail : contact@eau-adour-garonne.fr

Contact : Émeline Colas

Sur le bassin Adour-Garonne une dizaine de stations d'épuration (de capacité comprise entre 30 000 EH et 300 000 EH) ont intégré la digestion anaérobie dans leur filière de traitement de boues. Ces dispositifs ont plusieurs années d'ancienneté, ce qui permet un retour d'expérience intéressant, mais concernent essentiellement des traitements de boues primaires ou de boues secondaires issues de filières de boues aérées de forte ou moyenne charge.

La tendance observée depuis plusieurs années de réaliser de nouvelles stations d'épuration fondées plutôt sur des filières de boues aérées de faible charge, donc mieux stabilisées, a freiné le développement des installations de méthanisation.

Depuis 1998 cependant les contraintes réglementaires encadrant les pratiques d'épandage et la mise en décharge des boues d'épuration urbaines, les préoccupations des usagers au regard des aspects sanitaires et des nuisances olfactives notamment ainsi que les avancées technologiques récentes (en particulier dans l'Europe du Nord et les États-Unis) redonnent à la digestion anaérobie un nouvel intérêt. Intérêt renforcé par la recherche de la production et de la valorisation de biogaz.

Il est donc apparu opportun à l'Agence de l'Eau Adour-Garonne de dresser un état des lieux et de l'art sur cette technologie afin de fournir aux collectivités maîtres d'ouvrage confrontées au difficile problème de traitement de leurs boues une information leur permettant d'ouvrir plus largement le choix des filières qu'elles peuvent mettre en œuvre dans un meilleur respect de l'environnement.

Ce document s'appuie sur les travaux engagés depuis 10 ans par SOLAGRO sur la méthanisation en France et en Europe, actualisés par des études et des visites sur des stations d'épuration qui pratiquent la digestion anaérobie. De nombreuses données sont plus particulièrement extraites de deux études réalisées en 2001 :

- La digestion anaérobie des boues urbaines : état des lieux sur le bassin Adour-Garonne, réalisée pour l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.
- La digestion anaérobie des boues urbaines en Île-de-France, réalisée pour l'ARENE Île-de-France, l'ADEME, Gaz de France, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

Avertissement

Méthanisation ou digestion anaérobie ?

Parce qu'elle évoque bien la nature de la dégradation de la matière organique, la digestion anaérobie est le vocable le plus fréquemment utilisé par les professionnels. Nous avons pour notre part indistinctement utilisé ici tantôt le terme de méthanisation, appellation qui fait davantage référence à la dimension énergétique du procédé, tantôt le terme de digestion anaérobie.

REMERCIEMENTS

Que soient vivement remerciés tous les exploitants de stations d'épuration présentées ici, pour leur accueil et la mise à disposition des données nécessaires à la réalisation de ce travail.

Quelques photos ont été gracieusement mises à notre disposition et nous remercions à ce titre la ville de Neuss en Allemagne, Michel Monsay (SIAAP Seine-Aval) et Anne-Béatrice Pernaud (Gaz de France) pour la photo p 27.

DÉFINITIONS ET ABRÉVIATIONS

AGV	Acides gras volatils. Produit de la phase d'acidogénèse de la digestion anaérobie.
DA	Digestion anaérobie.
DBO ₅	Demande biochimique en oxygène en 5 jours. Elle indique la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour réduire la fraction biodégradable en 5 jours d'incubation à 20°C.
DCO	Demande chimique en oxygène. Elle indique la quantité totale d'oxygène qui sera consommée par une attaque chimique avec un oxydant puissant.
CTO	Composés traces organiques : composés chimiques moléculaires issus de substances chimiques principales (pesticides, hydrocarbures, détergents...) ou de la dégradation de ces substances présentes en quantité infinitésimale.
EH	Équivalent-Habitant(s). Unité utilisée pour l'appréciation de la capacité d'une station d'épuration. Elle représente la charge polluante regroupant toutes les activités polluantes (humaine, industrielle, agricole, artisanale) et correspond à 150 litres d'eaux usées par jour et 60 g de DBO ₅ par jour.
ET	Éléments traces. Métal ou métalloïde présent en quantité infinitésimale. Sont pris en considération le cadmium, le chrome, le cuivre, le mercure, le nickel, le plomb, le sélénium, et le zinc.
ISD	Installation de stockage des déchets.
MS	Matière sèche : matières en suspension et sels dissous. Ce résidu sec est obtenu après passage dans une étuve. La teneur en MS est exprimée en g/l. Cette teneur est utilisée pour calculer la siccité (exprimée en %).
MV	Matière volatile : partie biodégradable de la MS, elle représente une évaluation approchée de la matière organique. La teneur en MV est exprimée en % de la MS.
NTK	Azote Kjeldahl. Il regroupe l'azote présent sous forme organique et minéral (N-NH ₄).
tep	Tonne équivalent pétrole.
TAC :	Titre alcalimétrique complet. Il détermine la teneur en hydrogène-carbonates.
STEP	Station d'épuration.
TRH :	Temps de rétention hydraulique : temps de séjour moyen des boues dans les digesteurs.

S o m m a i r e

Panorama sur la méthanisation des boues urbaines	6
Un procédé utilisé depuis un siècle	6
Un maillon en amont de la chaîne de traitement des boues	6
En France, un tiers des boues sont aujourd'hui « méthanisées »	8
Aptitude des effluents à la digestion anaérobie	9
Incidence de la chaîne de traitement	9
« Digestibilité » des boues	9
Un champ d'application qui s'élargit avec les contraintes d'évacuation des boues	13
Le parc de digestion anaérobie en France	13
Les atouts de la digestion anaérobie	14
La réduction des odeurs et des quantités	14
La production de méthane, une énergie valorisable	15
L'atténuation des risques sanitaires	15
Les destinations des boues digérées	16
Les valorisations agronomiques	16
L'incinération	17
Le stockage en « ISD »	17
Technologies	18
Les paramètres de la digestion	18
Les pré-traitements	18
Les digesteurs	19
Brassage	21
Chauffage	21
Contrôle et régulation	22
Produits et sous-produits	23
Incidences de la méthanisation sur le traitement des boues digérées	23
Le centrat ou filtrat : la question du phosphore et de l'azote	24
Le biogaz	25
Bilans énergétiques	28
Bilan énergétique de la digestion anaérobie seule	28
Bilan énergétique de la digestion anaérobie avec les traitements avals	29
Données économiques	31
Coûts de la digestion	31
Économies permises par la digestion	32
L'avis des exploitants	34
Perspectives	35
Pour les installations qui pratiquent la digestion	35
Quand envisager la digestion ?	35
Pour en savoir plus	36

Panorama sur la méthanisation des boues urbaines

Un procédé utilisé depuis un siècle

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé naturel de transformation de la matière organique en énergie par des bactéries en l'absence d'oxygène. Conduite dans des enceintes confinées – appelées digesteurs – à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, elle produit du biogaz composé majoritairement de méthane, tout en réduisant de moitié le taux de matières organiques de nombreux déchets ou sous-produits biodégradables. Le résidu de la digestion (ou digestat) est stable, désodorisé, débarrassé en majeure partie des germes pathogènes.

À la faveur d'une meilleure compréhension des mécanismes microbiologiques, les premiers digesteurs sont conçus dès la fin du XIX^e siècle, spécialement pour le traitement des eaux urbaines. Il s'agit de remédier aux odeurs pestilentielles générées par la simple décantation des eaux usées, pratiquée à l'époque.

La première référence connue concerne la Ville d'EXETER (Royaume-Uni) qui en 1895 valorise le biogaz produit pour l'éclairage urbain.

En France, les plus anciens digesteurs sont probablement ceux de la station d'épuration de Seine-Aval, à Achères. Certains, toujours en service, datent de 1940.

Après quelques années de développement, la digestion anaérobie n'échappe pas aux effets de mode : les tensions sur l'énergie liées aux chocs pétroliers des années 1975-1985 lui donnent un nouvel essor, puis elle tombe en désuétude, au point que son intérêt dans le traitement des boues reste sous-estimé et méconnu.

Pourtant, le parc de digestion anaérobie représente en France une capacité de traitement de l'ordre de 20 millions d'équivalent-habitants. Cette capacité semble être restée stable depuis 1985. Les quelques nouvelles réalisations – souvent de capacité importante – compensent les nombreuses unités qui ont été arrêtées, souvent de petite ou moyenne taille.

La digestion anaérobie connaît aujourd'hui un regain d'intérêt parce qu'elle constitue un outil performant de traitement des boues urbaines.

Un maillon en amont de la chaîne de traitement des boues

Premier maillon du traitement des boues après les phases de décantation, la méthanisation facilite le traitement des boues quelle que soit leur destination finale : valorisation agronomique, incinération, enfouissement en installation de stockage, et quels que soient les traitements intermédiaires appliqués : déshydratation, chaulage, séchage thermique, compostage.

En effet, la méthanisation :

- réduit de 40 % en moyenne les quantités de boues à traiter ;

- élimine fortement les nuisances olfactives ;
- produit un digestat stabilisé, débarrassé en grande partie des germes pathogènes (bactéries mais aussi virus et parasites) et présentant un pouvoir fertilisant ;
- réduit les teneurs en composés organiques volatils.

Par ailleurs, elle produit du biogaz, une énergie renouvelable et stockable, qui peut être convertie en toutes formes d'énergie utile : chaleur, électricité...

Gazomètre, Évry.



Stockage sous pression, Besançon.



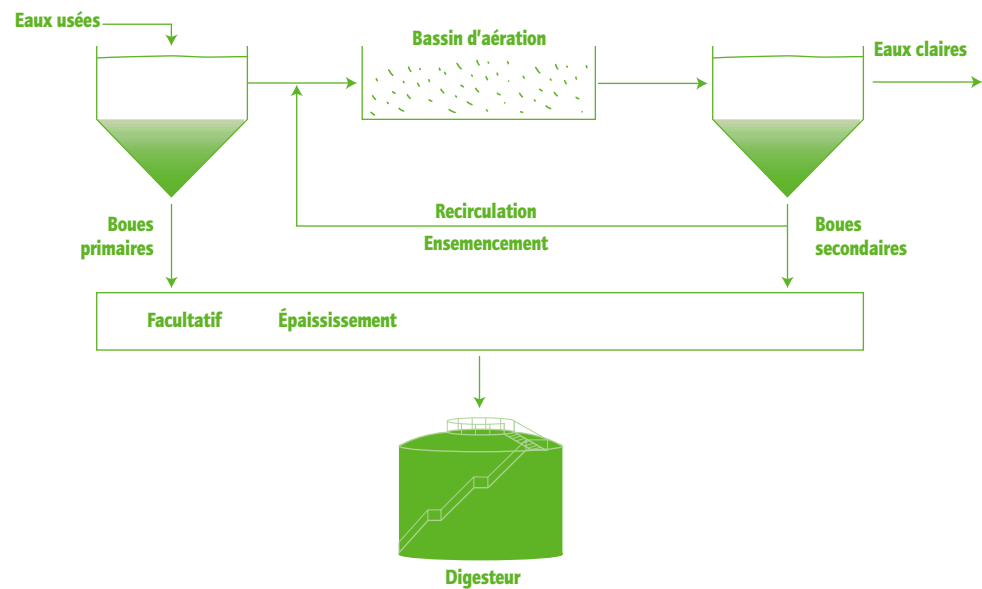
Une partie du biogaz est utilisée pour maintenir le digesteur à la température optimale de fermentation (35 à 37°C) et parfois pour sécher les boues. La digestion anaérobie est le seul procédé de traite-

ment des eaux usées qui permette de tirer parti du potentiel énergétique de la matière organique tout en préservant une large part de son potentiel fertilisant.



Torchère, Castres.

LA DIGESTION ANAÉROBIE DANS LA CHAÎNE DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS URBAINS



TEMPÉRATURE

La méthanisation dite « mésophile » se déroule classiquement à une température voisine de 35°C.

La méthanisation dite « thermophile » se produit à des températures plus élevées, de l'ordre de 55°C. La flore microbiologique en jeu possède une vitesse de croissance supérieure, ce qui permet de réduire les temps de séjour en digesteur. Cette flore est cependant réputée plus fragile.

Dans tous les cas, l'énergie produite par le biogaz est utilisée pour maintenir les boues à la température de « consigne » choisie.

En sortie des décanteurs, et le cas échéant des clarificateurs, les boues sont introduites dans les digesteurs. Elles y séjournent pendant 3 à 4 semaines. Les digesteurs sont chauffés à 35°C (ou 55°C) et brassés pour maintenir des conditions favorables au développement des micro-organismes. Plusieurs populations bactériennes vont se dévelop-

per et transformer des substrats organiques complexes (à longue chaîne carbonée) en molécules simples à un seul carbone : méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂). On distingue trois étapes – l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse – même si dans la réalité, elles tendent à se produire simultanément.

Digesteur et flottateur, Évry.

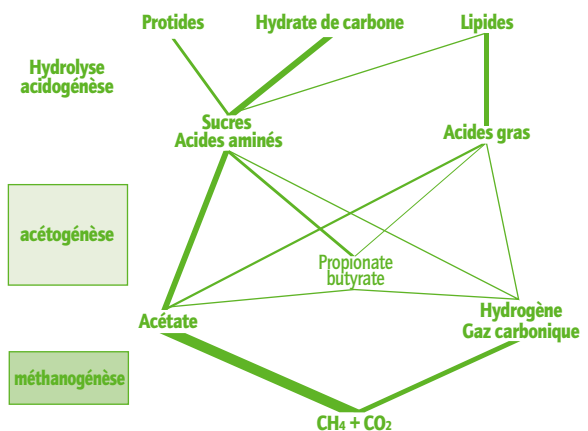


LES ÉTAPES DE LA DIGESTION ANAÉROBIE

■ **Hydrolyse et acidogénèse** : dépolymérisation des molécules complexes (protides, hydrates de carbone, lipides) en monomères puis transformation par fermentation en corps simples (acides gras, sucres, acides aminés), par des enzymes et bactéries acidogènes.

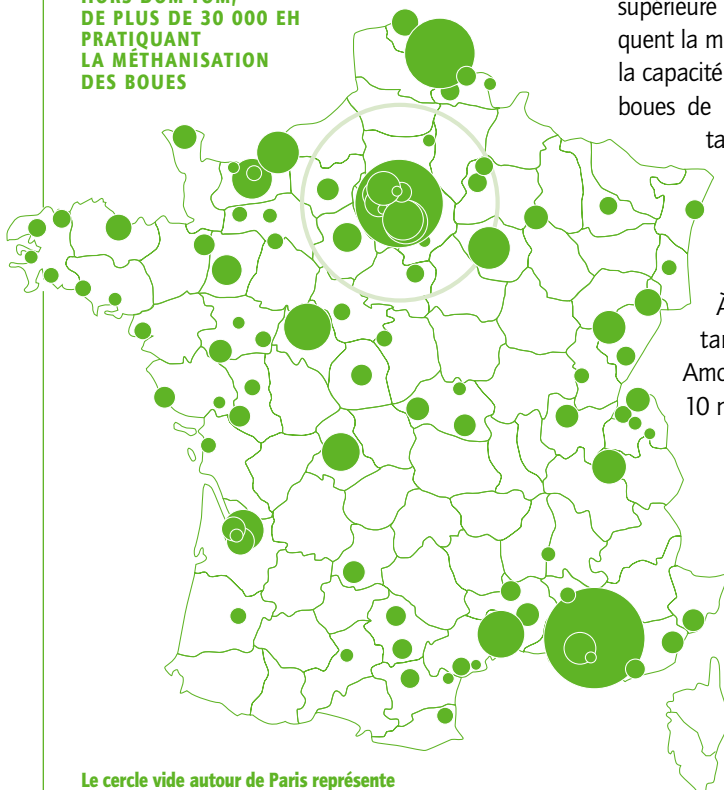
■ **Acétogénèse** : transformation des corps simples en acide acétique, hydrogène et dioxyde de carbone, par métabolisation bactérienne.

■ **Méthanogénèse** : formation de méthane soit par dégradation de l'acide acétique (70 % de la production), soit par réduction du CO₂ par l'hydrogène (30 % de la production). Cette étape est réalisée par une famille particulière de bactéries spécialisées, les archaéobactéries.



En France, un tiers des boues sont aujourd'hui « méthanisées »

STATIONS D'ÉPURATION URBAINES FRANÇAISES, HORS DOM-TOM, DE PLUS DE 30 000 EH PRATIQUANT LA MÉTHANISATION DES BOUES



Le cercle vide autour de Paris représente la station d'épuration SIAAP Seine-Aval (Achères).

Un peu plus d'une centaine de stations de capacité supérieure à 30 000 équivalent-habitants pratiquent la méthanisation. Elles représentent 30 % de la capacité totale du parc d'épuration et traitent les boues de quelques 20 millions d'équivalent-habitants.

Ces digesteurs éliminent de l'ordre de 170 000 tonnes de matières sèches par an, qui sont transformées en 94 millions de m³ de méthane.

À elles seules, les stations les plus importantes (SIAAP Seine-Aval, SIAAP Seine-Amont, Marseille, Lille-Marquette) totalisent 10 millions d'équivalent-habitants.

60 % de l'énergie produite sont valorisés sous forme d'électricité ou de chaleur, en premier lieu pour le chauffage et le brassage des digesteurs, parfois le chauffage des locaux techniques. Le développement de la cogénération depuis le milieu des années 80 permet, y compris pour des stations de petite capacité, de livrer de la chaleur à des utilisateurs proches ou de l'électricité sur le réseau. Le biogaz non valorisé est éliminé en torchère.

Digesteur et torchère, SIAAP Seine-Amont, Valenton.



LA DIGESTION ANAÉROBIE EN FRANCE : ÉTAT DES LIEUX

NOMBRE DE STATIONS DE CAPACITÉ SUPÉRIEURE À 30 000 EH PRATIQUANT LA DIGESTION ANAÉROBIE

➤ 108

Capacité totale	20 millions d'équivalent-habitants
Quantités de boues traitées	420 000 tonnes/an de matières sèches
Quantité de boues éliminées	170 000 tonnes/an de matières sèches
Production de biogaz	94 millions de m ³ /an de méthane
Énergie valorisée	33 000 tonnes équivalent pétrole /an (énergie thermique) 89 GWh/an (énergie électrique)

Aptitude des effluents à la digestion anaérobie

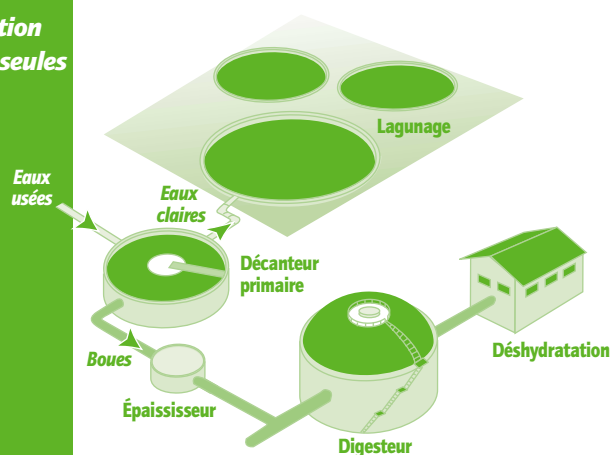
Incidence de la chaîne de traitement

En fonction du mode opératoire choisi par les exploitants de stations – choix du nombre de décantations et clarifications, recours ou non à des bassins d'aération, présence ou non de biofiltres, traitement spécifique de l'azote et du phosphore – les boues produites sont plus ou moins chargées en matière organique biodégradable et donc aptes à la méthanisation. Les boues primaires, qu'elles soient obtenues par décantation gravitaire ou lamellaire, ainsi que les boues mixtes (primaires + boues biologiques) qui

résultent d'une décantation primaire et d'une clarification (ou décantation secondaire) offrent les meilleures configurations compte tenu de leur forte charge en matière organique biodégradable. À ce jour, la digestion anaérobie est le plus fréquemment pratiquée sur des boues mixtes. Les stations reçoivent également d'autres résidus de l'assainissement (graisses, matières de vidanges) susceptibles d'être méthanisés.

« Digestibilité » des boues

■ Boues primaires



Digesteur, Rochefort.

■ Boues biologiques

Certaines stations pratiquent l'aération des boues. La production de boues biologiques qui en résulte est partiellement renvoyée vers les bassins d'aération, les boues excédentaires devant être traitées.

Leur aptitude à la méthanisation dépend de leur âge et de la charge organique. Les boues issues d'une aération « forte charge » sont plus aptes à la digestion anaérobie que des boues « faible charge ».

Rochefort

> 35 000 EH, digestion de boues primaires seules



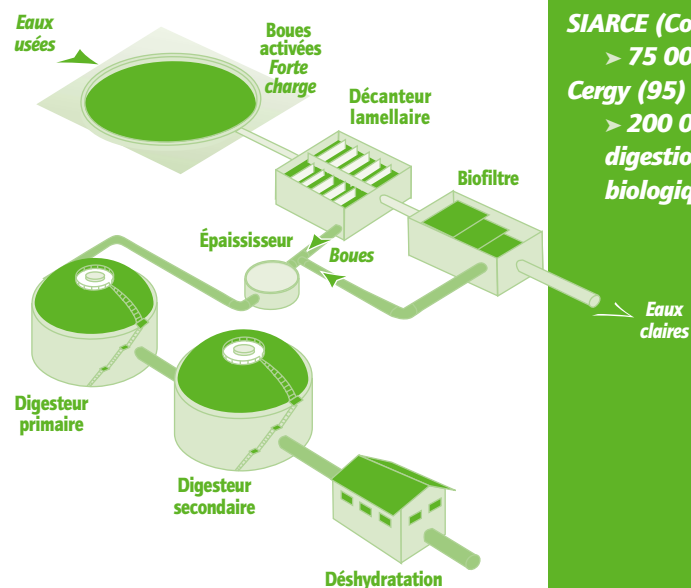
Digesteur et gazomètre, silo à boues (à droite), Cergy.

La méthanisation des boues biologiques seules est moins justifiée que celle des boues primaires, car elles sont davantage minéralisées du fait des réactions de dégradation aérobie qui se sont déroulées dans les bassins d'aération. Les taux d'abattement des matières organiques sont moindres, la productivité en gaz également. Cependant, il peut être judicieux de les digérer malgré tout pour obtenir une meilleure stabilisation.

Au cours des années 1990, nombre de stations d'épuration urbaines ont opté pour une filière de traitement des eaux consistant en une aération prolongée des eaux usées non décantées. Ce procédé ne génère pas de boues primaires, mais des boues biologiques dites d'« aération prolongée ». Bien que peu fermentescibles, elles ne sont pas nécessairement stabilisées pour autant.

Les boues d'aération prolongée seules sont évidemment moins aptes à la digestion que des boues pri-

maires et les avis sur l'intérêt de la digestion anaérobie de ce type de boues sont partagés. Plusieurs exemples montrent cependant que cette solution est tout à fait envisageable.



SIARCE (Corbeil-Essonnes)

> 75 000 EH

Cergy (95)

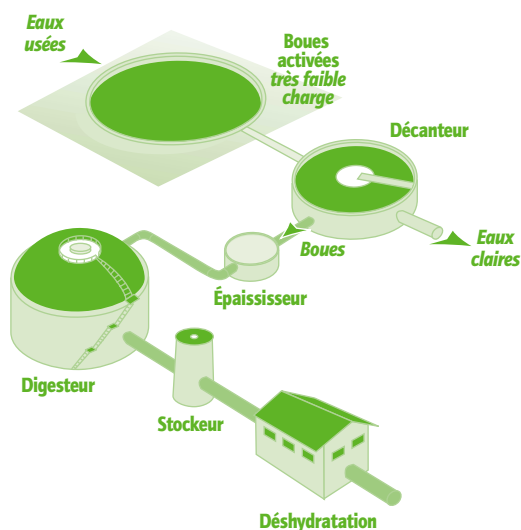
> 200 000 EH,

digestion de boues biologiques seules

STEP pratiquant la digestion anaérobie de boues d'aération prolongée seules

> **Limoges (87) - 285 000 EH**

> **Bourg en Bresse (01) - 130 000 EH**



Pont bascule et digesteur, Limoges.

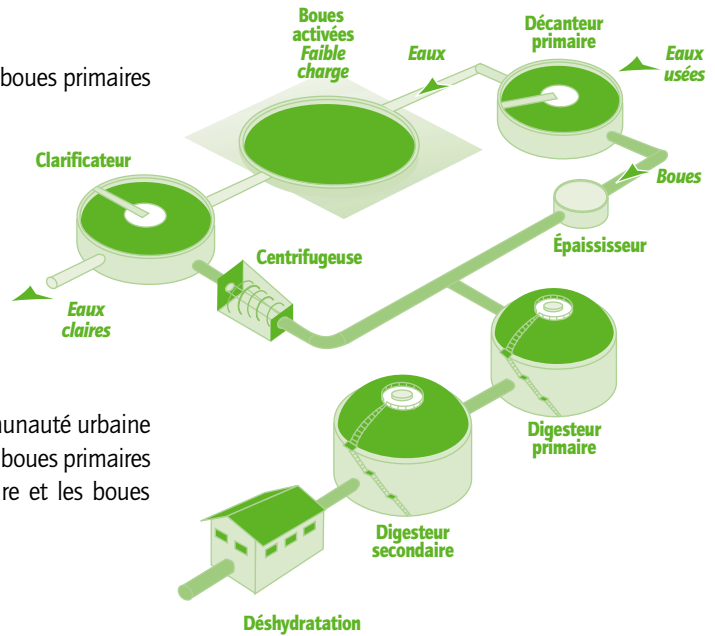
■ Boues mixtes

Il s'agit de la digestion conjointe de boues primaires et de boues biologiques.

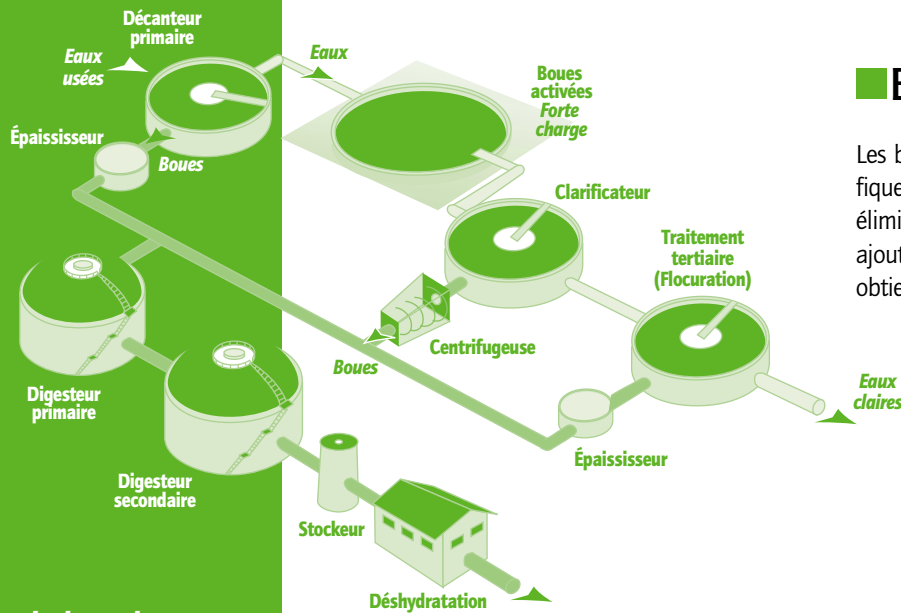
SIAAP Seine-Amont

SIAAP Seine-Amont (Valenton, 94) – 1,2 million EH : Sont traitées en digesteur, les boues primaires épaissies issues d'un décanteur, ainsi que les boues centrifugées issues d'une aération prolongée et clarifiées.

À la station de Clos de Hilde (Communauté urbaine de Bordeaux, 33) – 150 000 EH : les boues primaires sont issues d'un décanteur lamellaire et les boues biologiques issues d'un biofiltre.



Digesteur, Communauté urbaine de Bordeaux (Clos de Hilde).



Exemple de stations pratiquant la digestion anaérobie de boues tertiaires :
SIAAP Seine-Aval (Achères, 95)
 > 6,5 millions EH



SIAAP Seine-Aval, Achères.

■ Autres résidus de l'assainissement : graisses et matières de vidange

Les stations d'épuration génèrent des graisses (récupérées au niveau des dégraisseurs en tête de filière eau) ou en reçoivent (collecteurs de bacs à graisses des entreprises de restauration...). Il s'agit le plus souvent d'émulsions grasses, éventuellement chargées d'impuretés minérales. Les graisses sont généralement fermentescibles et se prêtent bien à la digestion anaérobie, en mélange avec les boues jusqu'à une certaine proportion. Sous réserve d'une séparation graisses/effluents adéquate au moment du dégraissage des eaux usées en tête de station, les graisses peuvent être traitées par digestion. La diges-

tion permet ainsi de s'affranchir du recours à un traitement spécifique des graisses.

Les stations d'épuration peuvent recevoir des matières de vidange collectées par des sociétés d'assainissement (fosses septiques, curage de réseaux...). Celles-ci sont en général dépotées en tête de station, et la fraction décantable suit le même circuit que celui des boues primaires. Des essais sont engagés pour injecter directement les matières de vidange dans les digesteurs, mais on ne dispose pas encore de réalisation en vraie grandeur.

■ Co-digestion

La co-digestion (ou méthanisation combinée) consiste à digérer dans un même ouvrage des boues d'épuration et d'autres déchets ou sous-produits fermentescibles : par exemple des biodéchets municipaux (déchets fermentescibles des ménages triés). Il existe plusieurs réalisations en Europe, mais aucune en France.

Soit les déchets sont traités au sein même de la station en mélange avec les boues, dans des digesteurs

adaptés, soit les boues sont livrées dans des usines de co-digestion, lesquelles peuvent traiter tous types de déchets organiques en mélange : lisiers, boues, déchets organiques municipaux...

La méthanisation combinée est intéressante du point de vue technique, la diversification de l'alimentation des digesteurs étant garante d'une meilleure stabilité des procédés de digestion.



Exemples de stations pratiquant la digestion anaérobie des graisses :
SIAAP Seine-Amont (94)

> 1,2 million EH
Saint-Brieuc (22)
> 100 000 EH

Exemple de station pratiquant la co-digestion :
> Högl (Allemagne)

Un champ d'application qui s'élargit avec les contraintes d'évacuation des boues

Pour des raisons principalement économiques, la méthanisation est pratiquée sur des stations pour lesquelles le devenir final des boues présente certaines contraintes : déshydratation, traitement complémentaire, stockage, transport...

Dans la pratique, les tailles rencontrées vont de 30 000 à 6,5 millions d'équivalent-habitants. Le « seuil de faisabilité » dépend de la situation locale. Les contraintes de gestion des boues augmentant, ce seuil tend à diminuer¹.

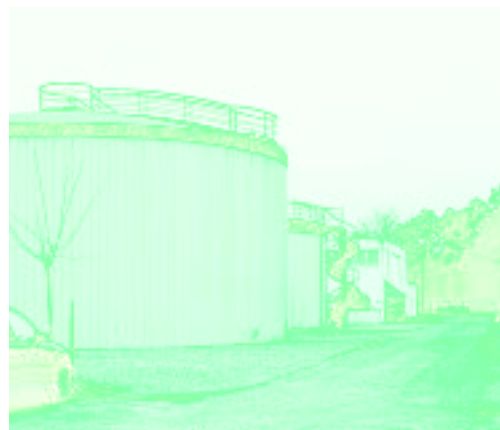
Le parc de digestion anaérobie en France

CAPACITÉ DES STATIONS D'ÉPURATION	MILLIERS D'ÉQUIVALENT-HABITANTS	NOMBRE DE STATIONS	MOYENNE MILLIERS D'EH/STATION
> 500 000 EH	10 000	4	2 500
100 à 500 000 EH	5 500	28	200
30 à 100 000 EH	4 200	76	55
TOTAL	19 700	108	180

Exemples de stations de moins de 50 000 équivalent-habitants pratiquant la digestion anaérobie

- Rochefort (17) - 35 000 EH
- Muret (31) - 33 500 EH
- Mont de Marsan (40) - 45 000 EH
- Asnières-sur-Oise (91) - 42 000 EH
- Plaisir (95) - 42 000 EH

Digesteur, Plaisir.



Digesteur primaire et secondaire, Mont-de-Marsan.



¹ En Suisse, des stations de moins de 10 000 EH pratiquent couramment la digestion anaérobie.

Les atouts de la digestion anaérobie

La réduction des odeurs et des quantités de boues

MATIÈRE SÈCHE ET MATIÈRE VOLATILE

La matière sèche (MS) représente l'ensemble des matières organiques et minérales en suspension, ainsi que les sels dissous. La matière volatile (MV) correspond à la fraction biodégradable de la matière

sèche, laquelle est transformée en méthane et gaz carbonique. Elle donne une évaluation approchée de la matière organique. Le taux de matière volatile contenue dans les boues est exprimé en % de la MS.

Les matières volatiles représentent en moyenne 70 à 80 % de la matière sèche pour des boues primaires fraîches et 50 % de la matière sèche pour des boues digérées.

Des boues moins odorantes

C'est la fraction de la matière sèche la plus biodégradable, riche en matières dites « volatiles » qui est

détruite en premier par la digestion, laquelle est responsable des nuisances, odeurs notamment. Une fois digérées, les boues sont peu fermentescibles et sont beaucoup moins malodorantes que des boues fraîches, même après stockage d'où une amélioration des conditions de travail des personnels d'exploitation et une réduction des nuisances pour les populations riveraines.

FERMENTESCIBILITÉ RELATIVE DE DIFFÉRENTS TYPES DE BOUES

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

Des boues moins abondantes

Le taux d'abattement des matières sèches donne des indications sur la réduction des quantités de boues permise par la méthanisation. Il est de 41 % en moyenne² pour des boues mixtes et de 20 % pour des boues d'aération prolongées.

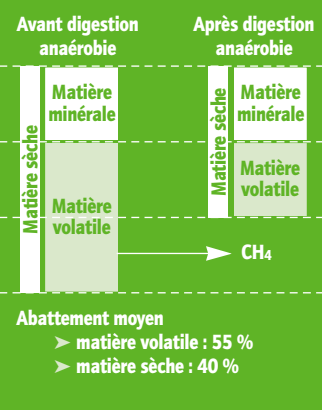
Après déshydratation le volume des boues se trouve réduit dans les mêmes proportions.

Abattement des matières volatiles : un indicateur des performances

La comparaison des concentrations en matières volatiles en entrée et en sortie des digesteurs, ou taux d'abattement des matières volatiles, est par excellence le paramètre qui permet d'évaluer les performances de la digestion. Ce taux dépend de plusieurs

paramètres - nature et fermentescibilité des boues, temps de séjour réel, brassage, température, mode d'exploitation du digesteur³. Pour des boues mixtes, il est en moyenne de 55 %. Il peut diminuer à 30 % pour des boues d'aération prolongées.

DÉGRADATION DE LA MATIÈRE SÈCHE AU COURS DE LA DIGESTION ANAÉROBIE



ÉVALUATION DE LA FERMENTESCIBILITÉ

La fermentescibilité ou la « stabilité » des boues ne fait pour l'instant l'objet d'aucune norme. Toutefois, l'émission de gaz sulfurés, gaz malodorants, permet de caractériser cette fermentescibilité. Il n'est en effet pas judicieux de se baser sur la teneur en matière volatile, car celle-ci peut contenir également des matières peu fermentescibles.

En tout état de cause, comparées à des boues d'aération, les boues digérées bénéficient de plus faible indice de fermentescibilité.

² Valeurs constatées : 32 à 53 %.

³ Dans la pratique, les valeurs constatées varient entre 47 et 71 %.

Source : « La digestion anaérobie des boues urbaines sur le bassin Adour Garonne, État des lieux », 2001.

LE BILAN MATIÈRE

Ce bilan mesure les performances de la dégradation au cours de la digestion des matières organiques, ainsi que les performances énergétiques liées à la transformation de la matière organique en énergie. Il s'agit de données réelles d'exploitation issues d'enquêtes auprès de

20 stations pratiquant la digestion anaérobie de boues mixtes (primaires + biologiques moyenne charge). Les minimum et maximum sont basés sur les écart-types. On observe des valeurs au-dessus de ces maximum ou au-dessous de ces minimum dans des cas particuliers.

	MINIMUM	MOYENNE	MAXIMUM
Entrée digestion			
Teneur initiale MS	3,5 %	4,7 %	5,9 %
Taux initial MV (% MS)	72 %	75 %	78 %
Sortie digestion			
Concentration finale MS	1,8 %	2,8 %	3,8 %
Concentration finale MV (% MS)	50 %	57 %	64 %
Taux abattement			
Sur matières volatiles	48 %	56 %	64 %
Sur matières sèches	36 %	41 %	48 %
Productivité en méthane			
m ³ CH ₄ /t de matière volatile dégradée	240	550	780
m ³ CH ₄ /t de matière sèche introduite	120	225	320

PRODUCTION DE MÉTHANE

En moyenne, la productivité est de 550 m³ CH₄/tMV dégradée, soit 225 m³CH₄/tonne de MS introduite en digestion, ou encore 11 m³ CH₄ par tonne de boues (à 5 % de siccité) introduites en digestion.

La production de méthane, une énergie valorisable

La productivité en méthane, principal constituant du biogaz, est exprimée en m³ par tonne de matière volatile dégradée. Elle varie sur une même station, comme d'une station à l'autre, en fonction de la composition des boues. Les lipides sont par exemple plus méthanogènes que la cellulose.

L'atténuation des risques sanitaires

■ Réduction des germes pathogènes

La digestion mésophile telle que pratiquée sur la plupart des digesteurs de boues urbaines en Europe, détruit une grande part des germes pathogènes contenus dans les boues – bactéries, mais aussi virus et parasites – généralement d'un facteur 10 à 100. La digestion thermophile est plus efficace et se caractérise par des taux d'abattement

nettement supérieurs pour des temps de séjour moindres.

La digestion est d'ailleurs considérée comme un moyen à part entière d'hygiéniser les produits comme les boues urbaines, par exemple en Suisse et en Grande-Bretagne (digestion mésophile), ainsi qu'au Danemark (digestion thermophile).

■ Réduction des risques de toxicité des éléments traces

Globalement, les boues produites en France ont des teneurs en éléments-traces nettement inférieures aux valeurs fixées par la réglementation et sont comparables à celles observées dans d'autres pays européens.

Différents mécanismes propres aux conditions anaérobies – précipitation par les sulfures, forma-

tion de complexes métaux/molécules organiques, adsorption à la surface des cellules... – piègent les métaux sous une forme non disponible pour les organismes vivants. La digestion anaérobie ne réduit pas la concentration en métaux dans les boues, mais réduit les risques de toxicité à certaines concentrations.

■ Réduction des teneurs en contaminants organiques

Les conditions particulières à l'anaérobiose permettent d'ôter les atomes halogènes, de rompre le cycle benzénique et de dégrader la chaîne carbonée restante en biogaz, totalement ou en grande partie. Lors de la digestion anaérobie, de nombreux micropolluants organiques sont ainsi transformés en bio-

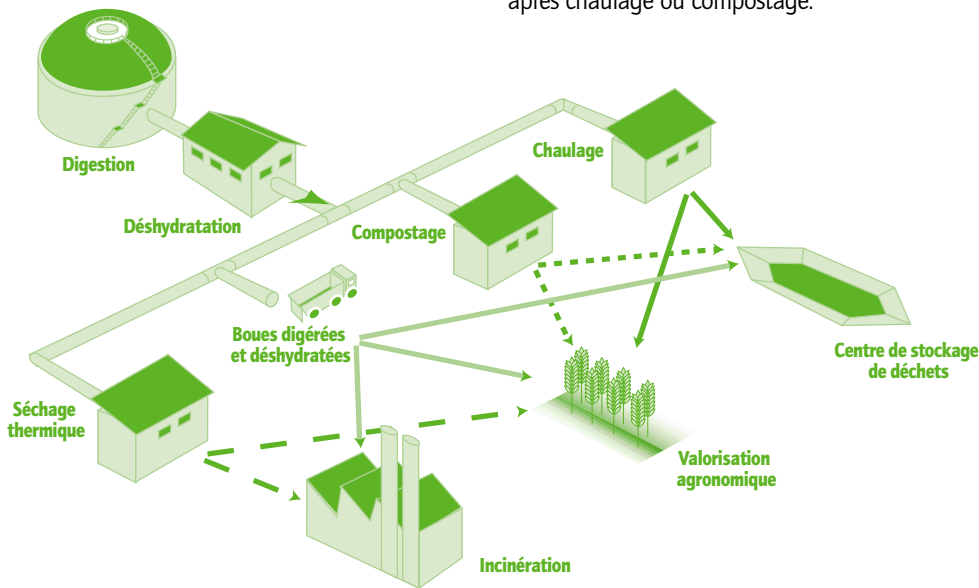
gaz ou en composés non toxiques. Les hydrocarbures polycycliques (HAP) sont plus résistants, même s'ils perdent en partie leur toxicité (notamment les HAP halogénés du fait des réactions de déhalogénéation qu'ils subissent).

Le terme de « contaminants » ou « micropolluants organiques » englobe de nombreux types de molécules à base de carbone et d'hydrogène, naturels ou synthétiques. Lorsqu'une molécule contient en outre un ou plusieurs atomes de chlore ou de fluor, on parle d'hydrocarbures halogénés : les plus toxiques et les moins biodégradables sont en général des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) halogénés : pesticides, PCB, dioxines...

Les destinations des boues digérées

Les boues digérées peuvent être :

- utilisées comme amendement organique et participer ainsi à la reconstitution de l'humus des sols. Elles peuvent être épandues directement, ou être au préalable chaulées, compostées ou séchées ;
- éliminées par incinération, avec le cas échéant, une valorisation énergétique. Elles sont alors séchées thermiquement ;
- enfouies en installation de stockage des déchets, après chaulage ou compostage.



Compost de boues d'épuration.

Les valorisations agronomiques

La digestion des boues avant épandage :

- réduit les quantités de boues à déshydrater, transporter, stocker et épandre ;
- réduit les nuisances olfactives ;
- réduit les agents pathogènes, l'épandage parachevant le travail d'élimination amorcé par la digestion. Sous l'effet de la température, du rayonnement solaire, des conditions physico-chimiques du sol, de la compétition entre micro-organismes, les pathogènes résiduels disparaissent rapidement ;
- produit des boues plus homogènes ;
- augmente la proportion d'azote sous forme ammoniacale, d'où une assimilation plus rapide par les végétaux.

Propriétés agronomiques des boues digérées déshydratées

Les boues digérées sont généralement assez riches en phosphore, en calcium et moyennement riches en azote. La concentration en éléments fertilisants des boues digérées dépend du degré de déshydratation.



Exemples de station pratiquant l'épandage de boues digérées déshydratées :

- SIAPP Seine-Aval (95)**
 - > 6,5 millions EH
- Asnières-sur-Oise (95)**
 - > 42 000 EH
- Albi (81)**
 - > 65 000 EH
- Muret (31)**
 - > 33 500 EH
- Tours (37)**
 - > 350 000 EH

Boues à 65 % de siccité.

**COMPOSITION
DES BOUES MIXTES
DIGÉRÉES DÉSHYDRATÉES
NON CHAULÉES
EN G/KG DE MATIÈRES
SÈCHES**

	MOYENNE	PLAGE DE VARIATION
Azote total	45	30 à 60
N-NH ₄	4	0,5 à 6
P ₂ O ₅	50	40 à 80
K ₂ O	3	1 à 4
MgO	6	4 à 9
CaO	80	60 à 120
Na ₂ O	1	0,4 à 1,3
SO ₃	20	19 à 22
Rapport C/N	8	6 à 12

**Exemples de stations
pratiquant l'incinération
de boues digérées**

- **Incinération spécifique :**
SIAAP Seine-Amont (94)
➤ 1,2 million EH
- **Co-incinération :**
Bonneuil en France (95)
➤ 300 000 EH
- CUB-Clos de Hilde (33)**
➤ 150 000 EH
- CUB-Louis Fargue (33)**
➤ 300 000 EH
- CUB-Ambarès (33)**
➤ 90 000 EH

**Exemples de stations
pratiquant le stockage
en ISD de boues digérées :**

- Bonneuil en France (95)**
➤ 300 000 EH
- Cergy (95)**
➤ 200 000 EH
- Castres (81)**
➤ 85 000 EH

L'incinération

La digestion des boues avant incinération :

- réduit les quantités de boues à déshydrater et incinérer ;
- réduit les quantités d'eau à évaporer et de ce fait la consommation d'énergie nécessaire à l'évaporation ;
- réduit le volume de fumées à traiter.

Toutefois, la digestion diminue le pouvoir calorifique des boues et peut les rendre non auto-combustibles. Cependant, ce pouvoir calorifique initial se retrouve dans le biogaz combustible, et le bilan énergétique global peut être positif.

Pour limiter ces contraintes, il convient, en cas de co-incinération avec des déchets municipaux, d'équilibrer le mélange « boues + déchets » de façon à maintenir un pouvoir calorifique suffisant.

En cas d'incinération spécifique des boues, l'unité d'incinération est généralement à proximité immédiate de la station d'épuration, et le biogaz issu de la digestion peut être utilisé comme combustible d'appoint si nécessaire.

Le stockage en « ISD »

Comparée à l'enfouissement de boues fraîches, la digestion des boues avant leur enfouissement :

- réduit les quantités de boues à déshydrater, transporter et stocker en ISD ;
- diminue la production de biogaz et lixiviats en ISD.

De plus, du point de vue énergétique, la valorisation du biogaz est plus aisée en station d'épuration, qu'en ISD.



*Ci-contre, silo à boues.
À droite, boues déshydratées.*

Technologies

Les paramètres de la digestion

■ Le temps de rétention hydraulique

Le TRH ou temps de rétention hydraulique (temps de séjour moyen des boues) est le principal paramètre de dimensionnement d'un digesteur. Il est généralement de l'ordre de 20 à 30 jours, ce qui est

un compromis entre l'optimisation des performances de la dégradation de la matière organique et le volume du digesteur.

■ La température

La majorité des digesteurs de boues urbaines fonctionnent en mode mésophile (température de 35 à 37°C).

Pour améliorer l'hygiénisation des boues, réduire le temps de séjour, voire augmenter la production de biogaz, la digestion thermophile (autour de 55°C) est de plus en plus pratiquée en Europe. Il peut s'agir soit d'une phase thermophile unique, soit

d'une première phase thermophile de quelques jours suivie d'une phase mésophile. En Allemagne, une dizaine d'installations (de 14 000 à 1,6 million d'équivalent-habitants) fonctionnent en deux étapes : **une étape thermophile** (2-3 jours à 55-60°C) et **une étape mésophile** (12-15 jours à 37°C). Le taux d'abattement des matières volatiles est ainsi augmenté de 25 %.

■ La charge

La charge d'un digesteur est la quantité de matières volatiles admises par m³ de digesteur et par jour (kgMV/m³.j). La valeur constatée est de l'ordre de 1,5 ± 0,5 kgMV/m³.j. Cette donnée permet de réguler le débit des boues entrantes en digestion.

Les pré-traitements

■ L'épaississement

Les boues issues des décanteurs primaires et secondaires sont généralement épaissies par un épaisseur gravitaire pour les boues primaires, par flottation ou centrifugation pour les boues biologiques.



Centrifugeuse, Bonneuil.

L'objectif est d'envoyer des boues suffisamment concentrées vers la digestion pour réduire le volume des digesteurs.

Les concentrations obtenues sont de l'ordre de 40 à 50 g/l de matière sèche en moyenne soit une siccité de 4 à 5 %. L'optimum souvent préconisé est de 60 g/l, certains digesteurs fonctionnent à 80 g/l. Un épaisseur plus important (par exemple un épaisseur dynamique) s'avère parfois nécessaire en cas d'augmentation de la charge à traiter. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de réduire le temps de séjour, réduction qui pourrait minorer les performances de la chaîne de digestion.

Exemples de stations pratiquant la digestion thermophile (travaux de construction en cours) :
Montpellier (34)

➤ **470 000 EH :**
2 digesteurs thermophiles

Aix-en-Provence (13)

➤ **165 000 EH :**
1 thermophile
+ 1 mésophile

■ L'hydrolyse thermique

Si l'épaississement constitue généralement le seul traitement des boues avant l'introduction dans les digesteurs, de nouvelles techniques de pré-traitement sont développées, en vue essentiellement d'augmenter la digestibilité.

Appliquée depuis 1995 sur plusieurs stations de toutes tailles en Europe, l'hydrolyse thermique consiste à chauffer les boues préalablement déshydratées à 15 % de siccité et sous pression (150°C), ce qui les solubilise et en désintègre les cellules bio-

logiques. Comparée à une digestion classique, l'hydrolyse thermique réduit le volume de digesteur et la quantité de boues produites. Elle augmente également le taux d'abattement des matières volatiles, la siccité des boues déshydratées et la production de biogaz.

D'autres travaux portent sur la désintégration des cellules par broyage mécanique ou par ultrasons, ou encore sur des pré-traitements biologiques comme l'hydrolyse enzymatique.

Les digesteurs

■ La chaîne de digestion

Elle intègre plusieurs ouvrages en série

■ Dans tous les cas, un premier digesteur, chauffé, brassé, où se déroule l'essentiel des phénomènes biochimiques (de l'hydrolyse à la méthanogénèse).

■ Certaines stations sont équipées d'un digesteur « secondaire » (le premier est alors appelé « digesteur primaire ») non chauffé, brassé, avec récupération du biogaz résiduel. Ce digesteur secondaire fait parfois

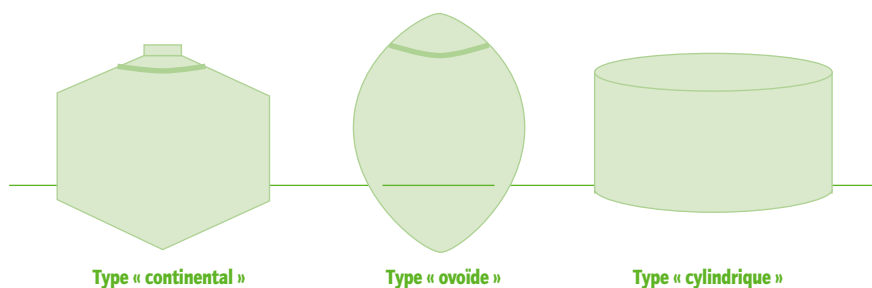
office de gazomètre (digesteur-gazomètre à virole ou à couverture souple).

■ Certaines stations comportent un stockeur de boues, non chauffé, parfois brassé mécaniquement, et non étanche à l'air. Le stockeur joue parfois – en partie – le rôle du digesteur secondaire, et inversement le digesteur secondaire peut suppléer à l'absence du stockeur.

■ Forme des digesteurs

Il existe plusieurs formes de digesteur. La plus répandue, en Europe continentale, est caractérisée par un rapport hauteur/diamètre = 1, un fond conique (pour faciliter l'évacuation des sédiments) et un dôme conique ou bombé (pour résister à la pression).

En Allemagne, les formes ovoïdes se sont développées pour les digesteurs de grande taille. Au Royaume-Uni et en Scandinavie, on trouve des digesteurs « cylindriques » avec toit et fond plat. Un autre modèle courant est le modèle « anglo-américain », digesteur-gazomètre plus large que haut.



De haut en bas
Digesteur cylindrique,
Perpignan.
Digesteur en construction,
Neuss (Allemagne).
Digesteur, Carrières-sur-Poissy.



**Échangeur et pompes,
Besançon.**

■ Les équipements

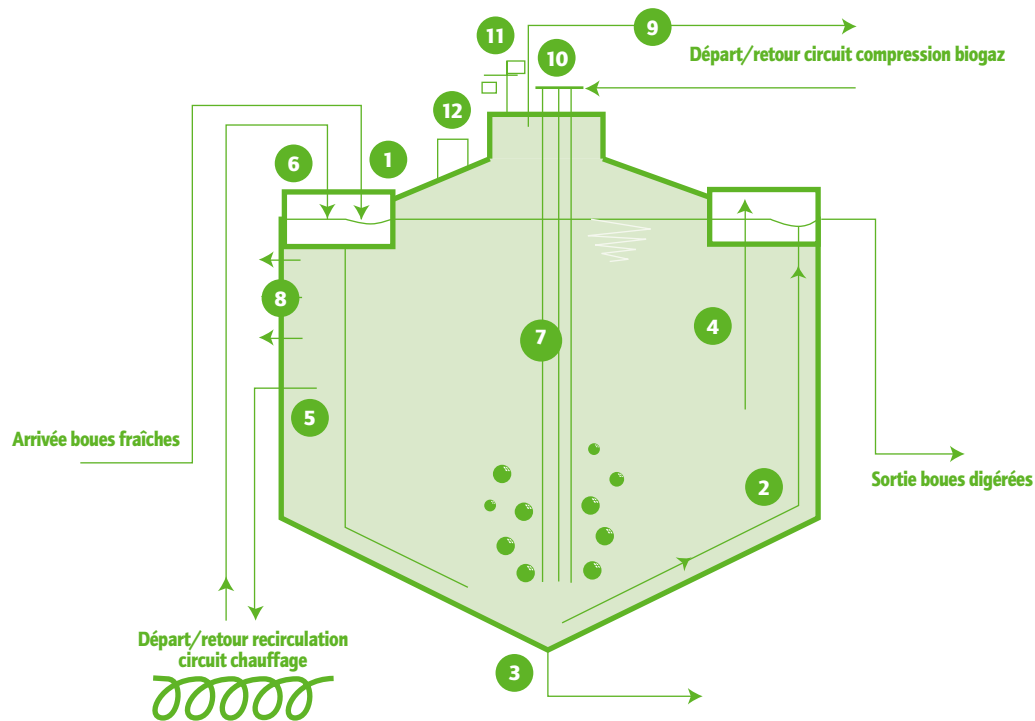
Un digesteur comprend très peu de pièces mécaniques internes. Il est équipé de différentes canalisations :

- 1 Amenée de boues fraîches
- 2 Extraction de boues digérées (surverse)
- 3 Vidange (ou extraction de boues digérées)
- 4 Canalisation de trop-plein
- 5 Extraction de boues pour le circuit de chauffage
- 6 Retour du circuit de chauffage
- 7 Cannes d'injection de biogaz pour le brassage des boues
- 8 Piquages pour prélèvements

Les digesteurs sont équipés en externe de plusieurs éléments :

- 9 Extraction du biogaz
- 10 Système de distribution de biogaz pour la recirculation
- 11 Soupape de sécurité dépression-surpression
- 12 Disque de rupture en cas de surpression

Les boues sont pompées depuis les ouvrages d'épaississement (parfois directement depuis le décanteur) vers la bache d'alimentation du digesteur. Les boues fraîches sont mélangées aux boues réchauffées et s'écoulent gravitairement vers l'intérieur du digesteur. Les boues digérées sont extraites par surverse.



■ Les matériaux utilisés

Les digesteurs sont généralement construits en béton, avec une protection interne en résine époxy. Pour les digesteurs de grande taille, l'acier vitrifié s'avère souvent plus compétitif même s'il est peu employé en France⁴. Seule la « zone de marnage » (zone de variation du niveau de boues) est sujette à corrosion, les parois en contact permanent avec les boues sont peu attaquées.

Les canalisations sont construites de préférence en acier inox, notamment celles soumises à des risques de corrosion (canalisations biogaz).

Les digesteurs sont isolés thermiquement, par 10 à 20 cm de laine de roche ou laine de verre, avec une protection par un bardage en acier. À noter que certains digesteurs anciens sont peu ou mal isolés (contre-paroi de brique, épaisseurs d'isolant plus faibles...).



De haut en bas
Soupape digesteur, Asnières-sur-Oise.
Entrée des boues dans le digesteur, Évry.
Dilacérateur à filasses, Versailles.

⁴ Exemple : Castres (81).



Dispositif pour brassage de digesteur par bullage.

Échangeur, Cergy.



Chaudière, Creil.

Brassage

Le brassage des digesteurs se fait majoritairement par injection de biogaz dans le digesteur. On parle alors de **bullage de gaz**.

- le gaz est comprimé (de 1 à 2 bars selon la hauteur du digesteur) ;
- puis injecté en fond de digesteur par des cannes de distribution situées au centre du digesteur ;
- il remonte vers la surface en entraînant la masse de boues, ce qui provoque un mouvement de convection important et le brassage de l'ensemble des boues.

Le débit recommandé est de $1\text{ m}^3/\text{h}$ par m^2 de surface de digesteur. Le fonctionnement des cannes

de distribution peut être visualisé par des indicateurs de débit.

La **re-circulation des boues** par le circuit de chauffage contribue également au brassage. Parfois, le brassage est réalisé uniquement par recirculation des boues, avec un débit plus important que pour le simple chauffage de manière à assurer un bon mélange.

Le brassage peut être **mécanique** (par hélice immergée par exemple). Il faut alors s'assurer de l'excellente tenue de l'équipement employé, inaccessible en fonctionnement normal.

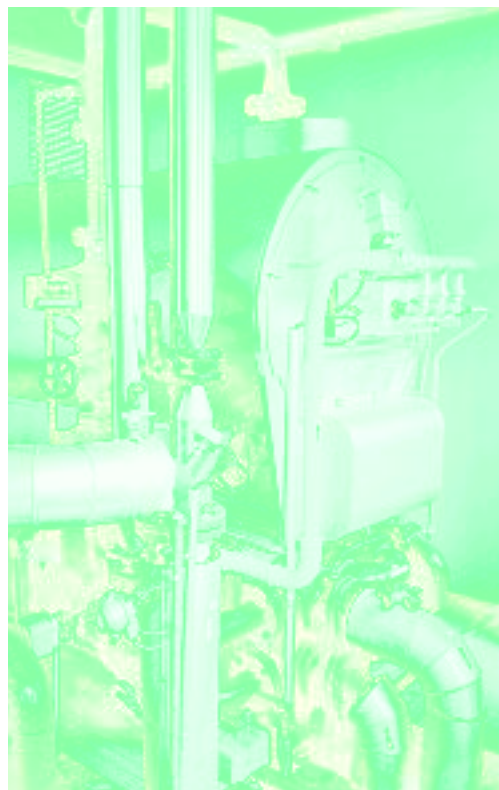
Chauffage

Le chauffage des digesteurs se fait le plus souvent par un circuit externe de re-circulation :

- les boues sont pompées depuis le fond du digesteur ;
- elles passent dans un échangeur « eau chaude/boues » ;
- puis retournent vers la bêche d'alimentation du digesteur où elles sont mélangées avec les boues fraîches, ce qui permet de réchauffer celles-ci et de les ensemercer en bactéries méthanogènes.

Les échangeurs thermiques sont en général de type tubulaire, ce qui facilite leur entretien. Ils sont alimentés, à contre-courant, par l'eau chaude provenant d'une chaudière biogaz, ou du circuit de refroidissement d'un moteur biogaz (cogénération).

On rencontre aussi parfois des échangeurs spirales. Pour améliorer le bilan thermique de la méthanisation, il est possible de préchauffer les boues fraîches avec les boues digérées extraites du digesteur par un échangeur boues/boues, en veillant aux risques de colmatage. Cette pratique, peu développée, peut permettre d'économiser plus de la moitié de la chaleur nécessaire au chauffage.



Chaudière, Besançon.

Contrôle et régulation

La principale consigne à maintenir – outre le régime d'alimentation – est la température, qui doit rester entre - 1 et + 1°C autour de la température de consigne. La plage conseillée est parfois moindre ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

Les principaux paramètres de surveillance indiquent un possible blocage de la phase méthanogène, visible par :

- l'accumulation d'acides gras volatils (AGV), qui ne sont plus consommés par les bactéries méthanogènes. Ce paramètre est contrôlé sur site, par des analyses ;
- la diminution de la concentration en méthane dans le biogaz. La teneur en méthane peut être mesurée en continu par un analyseur biogaz, et donc enregistrée et relayée par une téléalarme. Dans la pratique, les exploitants se basent souvent sur le débit de biogaz, soit par compteur, soit de visu lorsque l'on dispose d'un gazomètre à virole.

PRINCIPALES CONSIGNES (POUR UNE DIGESTION MÉSOPHILE)

PARAMÈTRE	PLAGE OU CRITÈRE OPTIMAL	DÉLAIS DE DÉTECTION EN CAS DE DYSFONCTIONNEMENT
Température	37°C \pm 0,5°C	-
AGV	< 500 mg/l	Très rapide
Teneur CH ₄	> 60 %	Rapide
pH	6,8 à 7,2	Très long
TAC	> 2 000 mg/l	Très long
Odeur des boues	Faible	Assez rapide
Homogénéité des boues	Bonne	Assez rapide
Taux de réduction des MV	(selon type de boues)	Long
Production de biogaz	(selon nature des MV)	2-3 jours

PROBLÈMES USUELLEMENT RENCONTRÉS ET ACTIONS PRÉVENTIVES OU CORRECTIVES

ORIGINE DES PROBLÈMES	ACTIONS POSSIBLES
<p>Apports trop rapides ou trop riches (graisses) => surcharge organique</p> <p>Sous-dimensionnement de l'installation => surcharge hydraulique ou organique</p>	<p>Séquencer l'alimentation du digesteur, répartir les boues entre les différents digesteurs</p> <p>Épaissir les boues fraîches</p> <p>Ajouter une nouvelle ligne de digestion</p> <p>Purger les sédiments, vidanger le digesteur, améliorer le dégrillage</p>
<p>Inhibition, surcharge organique => blocage en phase acide, non redémarrage après vidange</p> <p>Brassage insuffisant => dégradation des performances</p>	<p>Réduire la charge, voire court-circuiter le digesteur temporairement, corriger le pH, réensemencer le digesteur, contrôler la présence d'inhibiteurs et d'éléments toxiques</p> <p>Déboucher le circuit de brassage, augmenter le débit de brassage, contrôler les performances du compresseur, contrôler les fuites</p> <p>Réparer les canalisations corrodées.</p> <p>Modifier le système de brassage, augmenter le débit</p>
<p>Chauffage insuffisant => dégradation des performances</p>	<p>Contrôler les performances de digestion</p> <p>Entretien et nettoyer le circuit de chauffage : chaudière, échangeurs, adapter la régulation du circuit biogaz</p> <p>Isoler le digesteur et les tuyauteries, installer un économiseur thermique boues-boues</p> <p>Contrôler l'étanchéité du gazomètre, augmenter la capacité de stockage</p>
<p>Moussage, formation d'un chapeau, colmatage des conduites d'alimentation => risque de montée en pression du digesteur, problèmes mécaniques</p> <p>Moyens de contrôle insuffisants ou peu fiables => réaction tardive en cas de dysfonctionnement</p>	<p>Contrôler la présence de détergents, réduire la charge</p> <p>Évacuer le chapeau, installer un agitateur en surface</p> <p>Dégriller les eaux en entrée de station et les boues entrant en digestion pour éviter la formation de filasses</p> <p>Prévoir les équipements adaptés (débit-mètre gaz par organe déprimogène, analyseur de gaz, détection de niveau gazomètre, laboratoire d'analyse des AGV...)</p>
<p>Corrosion</p>	<p>Remplacer les matériaux par de l'inox ou de la fonte, protéger les ouvrages par résine époxy</p> <p>Traiter le biogaz (ajout de chlorure ferrique, oxydation de H₂S)</p>

RÈGLES DE SÉCURITÉ

La présence de biogaz nécessite le respect de règles de sécurité pour éviter les risques d'incendie, d'explosion ou d'intoxication. L'exploitant est responsable de la définition des zones à risque d'explosion (périmètres de sécurité autour du digesteur, du gazomètre, et des canalisations gaz) dans lesquelles s'appliquent des règles élémentaires de sécurité :

- flamme nue interdite (interdiction de fumer),
- appareillage électrique adapté (matériel dit « anti-déflagrant » ou « à sécurité intrinsèque » par exemple),
- aération des espaces confinés,
- équipements de protection du personnel : explosimètre et détecteur d'hydrogène sulfuré portables en cas d'intervention en zone à risque, masques,
- notice de sécurité, définition des procédures d'intervention en zone à risque, formation du personnel et sensibilisation.



Pompe pour le gazomètre souple, Creil.

Produits & sous-produits

Si la méthanisation des boues d'épuration produit avec le digestat (ou boues digérées) et le biogaz, des produits valorisables moyennant des traitements complémentaires, elle génère également une fraction résiduelle liquide, dénommée, selon le mode opératoire, centrat ou filtrat. En effet, toutes les stations qui pratiquent la digestion anaérobie déshydratent les boues digérées par centrifugation ou par filtration.

Incidences de la méthanisation sur le traitement des boues digérées

■ Des boues plus faciles à déshydrater



Bennes à boues digérées, Plaisir.

Parce que la digestion anaérobie réduit la teneur en matières volatiles, colloïdales et hydrophiles des boues, elle en facilite la déshydratation. Elle permet de gagner 1 à 3 points de siccité par rapport à des boues fraîches, lorsque la teneur en matières volatiles descend à moins de 50 %.

La digestion anaérobie des boues, avant déshydratation :

- réduit les quantités de boues à déshydrater et la consommation d'électricité, de polymères, de sels de fer ou de chaux ;
- réduit les odeurs dans l'atelier de déshydratation (surtout en cas d'utilisation de filtres-bandes ou de filtres-presses), améliore le confort de travail.

■ Un compost plus stable et davantage hygiénisé

Pratiqué en France sur des boues de préférence déjà déshydratées, le compostage des boues digérées est réalisé par mélange avec des déchets verts, des écorces..., les boues n'étant pas auto-compostables. Il achève la stabilisation et l'hygiénisation des boues et dégrade certaines molécules réfractaires à la digestion anaérobie.

Plus minéralisées que des boues fraîches, les boues digérées permettent d'économiser du matériau structurant, mais la montée en température du compost peut être affectée. Il convient donc de doser correctement l'apport de boues digérées et

de support carboné afin d'obtenir un mélange apte au compostage.

La digestion préalable des boues avant compostage :

- réduit les quantités de boues à composter, diminue l'emprise au sol de l'aire de compostage et les apports de co-produits ;
- réduit les nuisances olfactives spécifiques à la phase de compostage.

Par ailleurs, la digestion des boues dégrade certains polymères organiques, lesquels résistent aux traitements aérobies.

Exemples de stations pratiquant le compostage de boues digérées :

Rochefort (17)

> 35 000 EH

Mont de Marsan (40)

> 45 000 EH

Creil (60)

> 110 000 EH

■ Un séchage thermique plus efficace, sûr et économe

Très efficace pour réduire le volume final des boues, cette technique est peu développée compte tenu de son coût notamment en énergie. Mais le renchérissement des autres filières de traitement, incinération notamment, devrait favoriser son développement. Dans ce contexte, la méthanisation apparaît comme une étape permettant à la fois de réduire les coûts inhérents à la consommation d'énergie, tout en sécurisant le séchage proprement dit.

En effet, la digestion préalable des boues, avant séchage :

- réduit les teneurs en matières volatiles et de ce fait, limite le risque d'explosion lors du séchage ;
- réduit les quantités de boues à traiter et le volume d'eau à évaporer ;
- fournit l'énergie nécessaire au séchage. La méthanisation permet de produire une grande partie de l'énergie nécessaire pour le séchage voire la totalité si l'on récupère correctement la chaleur de condensation des buées pour chauffer le digesteur, d'où des économies importantes de combustible.

■ Un chaulage facilité

Les boues digérées peuvent être chaulées pour :

- répondre à la demande des utilisateurs (besoins agronomiques particuliers pour élever le pH des sols trop acides) si nécessaire (le chaulage peut s'appliquer par exemple sur une partie des boues seulement) ;
- améliorer la stabilité des boues ;
- augmenter la siccité des boues pour obtenir la

valeur réglementaire de 30 %, lorsque les boues sont envoyées en ISD.

La digestion des boues avant chaulage :

- facilite l'homogénéisation du mélange boues + chaux ;
- diminue d'environ 30 % les quantités de chaux à apporter par tonne de matière sèche « entrante ».

Le centrat ou filtrat : la question du phosphore et de l'azote

Le centrat ou filtrat est le liquide issu de la déshydratation des boues. Ce liquide résiduel, appelé aussi surnageant, retourne en tête de la filière eau, en général vers le bassin d'aération.

Dans le cas d'une digestion anaérobie, du fait d'une diminution du pH dans le digesteur, une partie du phosphore – 1/3 environ – est relargué dans le surnageant, le reste étant précipité dans les boues sous

forme de struvites ($MgNH_4PO_4$) et d'hydroxyapatites (phosphates de calcium).

Le surnageant est également plus chargé en azote ammoniacal (NH_4^+) du fait des conditions de dégradation de la matière organique en milieu anaérobie, laquelle ne permet pas une oxydation de l'azote et son relargage dans l'atmosphère sous forme gazeuse.

■ Les problèmes engendrés

Pour une station traitant le phosphore par voie biologique, le retour en tête de ce surnageant est à la source de deux problèmes :

- le colmatage possible des conduites transportant le surnageant par précipitation de struvites, lesquelles constituent par ailleurs d'excellents engrais minéraux ;
- une augmentation des concentrations en azote et

phosphore dans les eaux à traiter qui peut s'avérer problématique pour les stations vis-à-vis desquelles les normes de rejets sont contraignantes, en zone sensible par exemple.

Pour une station traitant le phosphore par voie physico-chimique, ces deux problèmes ne sont pas rencontrés, la quasi totalité du phosphore étant précipitée de manière stable dans les boues.

Exemples de stations pratiquant le séchage thermique de boues digérées :

- Saint-Brieuc (22)**
➤ 130 000 EH
- Nancy (54)**
➤ 300 000 EH
- Limoges (87)**
➤ 235 000 EH

Exemples de stations pratiquant le chaulage de boues digérées :

- Évry (91)**
➤ 250 000 EH
- Corbeil-Essonne (91)**
➤ 75 000 EH
- SIAAP Seine-Amont (94)**
➤ 1,2 million EH

Charge supplémentaire apportée à la filière eau par retour en tête du surnageant issu de la déshydratation de boues digérées

PARAMÈTRE	POURCENTAGE DES RETOURS EN TÊTE (SURNAGEANT)
Débit	6-10 %
DBO ₅	5-30 %
MES	2-17 %
NTK	15-25 %
P	1-10 %

D'après DEGREMONT, 1994.



La récupération des struvites et des phosphates de calcium est actuellement un thème très suivi par le CCEP (Centre européen d'études des polyphosphates), basé à Bruxelles.

Exemples :
SIAPP Seine-Aval (95)
 > 6,5 millions EH
Besançon (25)
 > 200 000 EH

⁵ Sous forme de phosphates métalliques : $FePO_4$, $AlPO_4$...

Gazomètre souple,
Communauté urbaine
de Bordeaux (Louis Fargue).



■ Les solutions envisageables

La récupération des struvites et des phosphates de calcium, de précieux engrais minéraux

Si la dissolution des struvites avec de l'acide sulfurique à 10 % est une solution envisageable à court terme pour nettoyer les canalisations, la récupération conjointe des struvites et des phosphates de calcium sous forme de cristaux et leur utilisation comme fertilisant agricole a fait l'objet de nombreux travaux et expérimentations sur plusieurs stations au Japon, Italie, Australie...

Les taux de récupération constatés (90 % du phosphore contenu dans le surnageant) selon divers procédés confirment la faisabilité technique et la pertinence économique de cette option. Les struvites sont en effet de qualité supérieure ou au moins aussi efficaces que les engrais chimiques et les phosphates de calcium sont comparables aux phosphates miniers utilisés par les producteurs d'engrais.

La valeur d'une tonne de struvite est estimée à 260 € (1 700 F) au Japon et entre 183-305 € (1 200-2 000) F en Australie.

Traitement physico-chimique du phosphore au niveau de la filière eau

Le phosphore est précipités par ajout de réactif (chlorure ferrique par exemple) dans le décanteur pri-

maire, le bassin biologique ou le clari-flocculateur tertiaire. Après digestion et déshydratation, le phosphore restera piégé dans les boues. À noter que le chlorure ferrique des boues de déphosphatation permet en outre d'abattre fortement la concentration en hydrogène sulfuré dans le digesteur.

TYPE DE TRAITEMENT	FRACTION SOLUBLE DU PHOSPHORE DANS LES BOUES DIGÉRÉES (P SOLUBLE/P TOTAL) EN %	PHOSPHORE PRÉCIPITÉ DANS LES BOUES DIGÉRÉES (g P/KG DE MS)
Physico-chimique	2,4	36
Biologique	19	11
Aucun	15	9

Source Wheatley, 1997.

Surcharge en azote soluble : une nitrification/dénitrification plus poussée au niveau de la filière eau

Dans le cas de stations devant mettre en œuvre un traitement poussé de l'azote, il sera donc nécessaire d'augmenter l'oxygénation des bassins biologiques pour compenser cette surcharge, ce qui se traduit par une surconsommation d'électricité. La filière eau doit alors être conçue pour supporter cette surcharge.

Des travaux portent sur la récupération de l'ammoniac du surnageant par adsorption sur zéolithes. Par ailleurs, au sein du digesteur, une faible partie de l'azote précipite avec le phosphore sous forme de struvites.

Le biogaz

■ Caractéristiques du biogaz

Le biogaz de station d'épuration est composé principalement de méthane (CH_4 , 65 % environ) et de gaz carbonique (CO_2 , 35 %).

Pouvoir calorifique Inférieur (PCI) du méthane

> 35,8 MJ/m³ (n)

PCI du biogaz à 65 % de méthane

> 23,3 MJ/m³ (n)

MJ : Méga-joule - m³ (n) : m³ normal (1 atm, 0°C)

Il contient également de l'hydrogène sulfuré (H_2S), gaz toxique, corrosif et nauséabond et est saturé en eau.

La teneur en H_2S est de 0,3 à 0,5 %, ce qui est trop élevé en général pour les moteurs à gaz (qui tolèrent

jusqu'à 0,15 %), ou use prématurément les chaudières.

Deux solutions peu onéreuses peuvent être utilisées pour réduire cette concentration :

- ajout de chlorure ferrique dans les boues admises en digestion (cas de boues de déphosphatation physico-chimique), qui provoque la précipitation de sulfure de fer (FeS) (SIAAP Seine-Aval, Besançon) ;

- ajout d'oxygène, qui provoque l'oxydation du soufre par l'action de bactéries. L'oxygène est mélangé au biogaz, soit directement dans le ciel gazeux du digesteur, soit dans un réacteur destiné à cet effet (techniques pratiquées au Danemark).

■ Équipements

Circuit biogaz

Le circuit biogaz conduit le gaz depuis le dôme du digesteur, vers le gazomètre, puis vers les différents équipements :

- compresseur de recirculation, pour le brassage au gaz des boues à l'intérieur du digesteur ;
- chaudière, moteur à gaz ;
- torchère pour l'élimination des excédents.

Pour limiter la corrosion due à la présence d'hydrogène sulfuré et d'eau, le circuit biogaz comporte des points de purge et les canalisations sont réalisées en inox.

Stockage du gaz

Le stockage du gaz s'effectue :

- soit dans un gazomètre à cloche, composé d'une structure béton et d'une cloche à virole qui monte ou descend en fonction de la quantité de biogaz ;
- soit dans un gazomètre à membrane souple constitué par une double membrane. Un compresseur d'air assure une pression constante entre les deux membranes et donc une pression de biogaz constante ;
- les gazomètres sous pression (sphères) sont utilisés pour les stations les plus importantes.

■ Utilisations du biogaz

Principales voies de valorisation

Le biogaz est généralement utilisé :

- en chaudière (cas général ; la chaudière est généralement une chaudière mixte biogaz + fioul) ;
- en cogénération par moteur à gaz (Rocheftort, Besançon, Marseille), turbine à gaz (SIAAP Seine-Aval), moteur dual-fuel (biogaz + fioul : SIAAP Seine-Amont).

Cogénérateur, Besançon.

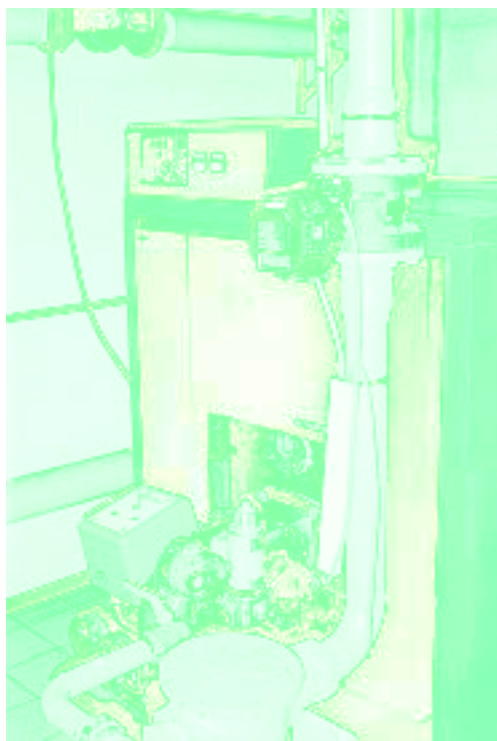


Gazomètre souple, Creil.

Comptage du biogaz

L'un des meilleurs systèmes de comptage du biogaz consiste à utiliser des organes de mesure de pression différentielle (type sonde à pression différentielle ou orifice calibré). Il offre l'avantage de ne comporter aucune pièce sujette à corrosion ou grippage, contrairement aux compteurs à turbine ou palettes, encore souvent employés.

Chaudière et compteur de biogaz, Rocheftort.



Chaudière biogaz, Fontainebleau.



Dans les deux cas, la chaleur est utilisée pour chauffer le digesteur, et parfois les locaux. L'électricité produite est consommée par la station d'épuration.

Des modes de valorisation complémentaires peuvent être recherchés :

- séchage thermique des boues (Nancy, Saint-Brieuc, Limoges) ;
- conditionnement thermique des boues digérées,

ce qui assure une forte siccité des boues après déshydratation (SIAAP Seine-Aval, Marseille) ;

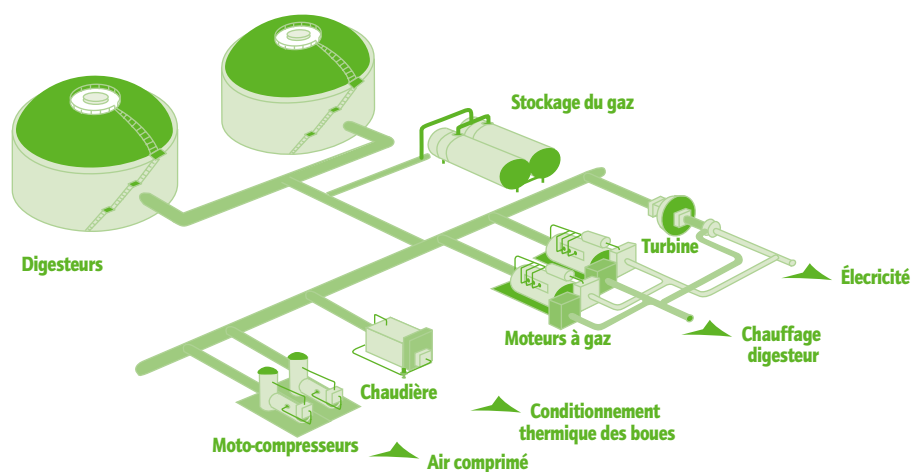
- utilisation externe de la chaleur : chauffage de piscine par exemple (Bayeux) ;
- combustible d'appoint pour l'incinération des boues (SIAAP Seine-Amont) ;
- production d'air comprimé par un groupe moto-compresseur (CUB Louis Fargue, SIAAP Seine-Aval).

FILIÈRES MATURES

Il s'agit des filières largement développées en Europe, pour lesquelles existent de nombreuses références

Technique	Stade de développement	Intérêt	Inconvénient
Production de chaleur pour le chauffage du digesteur uniquement, avec élimination de l'excédent en torchère ou par aérothermes	Cas général en France		Faible proportion d'énergie valorisée
Production de chaleur pour le chauffage des locaux . Cet usage ne représente généralement que quelques pourcents de la production de biogaz.	Cas fréquent	Meilleure valorisation de l'énergie	Faible proportion d'énergie valorisée
Utilisations du biogaz pour des besoins thermiques sur la station d'épuration : séchage des boues, conditionnement thermique avant déshydratation, combustible d'appoint pour l'incinération des boues	Assez fréquent	Utilisation optimale de l'énergie	Applications généralement réservées aux plus grandes stations
Cogénération (production combinée d'électricité et de chaleur) par moteur à gaz (cas général), turbine à gaz, moteur dual-fouil (avec injection de gasoil)	Cas général dans les pays bénéficiant de tarifs attractifs d'achat d'électricité renouvelable	Utilisation quasi-optimale de l'énergie	Surplus thermiques à valoriser
Moto Compresseurs pour l'aération des bassins	Cas rare, peu pratiqué aujourd'hui		Pas de récupération de chaleur

Un panorama des modes d'utilisation du biogaz :
 > SIAAP Seine-Aval
 Schéma de principe



FILIÈRES ÉMERGENTES

Ces technologies testées en pilotes industriels ne font pas encore l'objet d'une diffusion à large échelle.

TECHNIQUE	RÉALISATIONS EN EUROPE	INTÉRÊT	INCONVÉNIENT
Pile à combustible	1 en Allemagne (Cologne)	Utilisation optimale de l'énergie	
Gaz carburant	1 à Lille, plusieurs en Suède (Eslöv, Trollhättan, Göteborg)	Complémentaire des autres applications	Contraintes logistiques (flotte de véhicules)
Gaz naturel injecté sur réseau public	Quelques-unes en Allemagne (Stuttgart), Pays-Bas (Tilburg)	Complémentaire des autres applications	



Uppsala (Suède), gaz carburant issu de biogaz de station d'épuration. Remplissage des bus.
 Photo Anne-Béatrice Pernaud.

Bilans énergétiques

Le bilan énergétique de la digestion anaérobie quantifie la différence entre l'énergie produite et l'énergie consommée par le process.

On distingue le bilan énergétique de la digestion anaérobie seule et le bilan énergétique global de la chaîne de traitement des boues, lequel permet d'évaluer les économies d'énergie générées par la digestion sur les traitements aval.

Bilan énergétique de la digestion anaérobie seule

■ Énergie produite

La production d'énergie est directement proportionnelle à la quantité de matière volatile dégradée : 550 m³ de méthane par tonne de matière volatile dégradée (tMVd) soit 5 470 kWh/tMVd.

1 tonne de matière volatile dégradée :

55 m³ CH₄ (méthane)
> 5 470 kWh/tMVd



Selon la fermentescibilité :
140 à 220 m³ CH₄ par tonne de matière sèche
> 1 400 à 2 200 kWh/tMS

Selon la siccité :
3 à 18 m³ CH₄ par tonne de boues
> 60 à 180 kWh/tonne de boues



Compresseurs, SIAAP Seine-Amont.

La quantité d'énergie finale, c'est-à-dire intégralement valorisable sous forme de chaleur ou d'électricité dépend du rendement de la chaîne des appareils (chaudière, régulation, échangeurs).

RENDEMENTS

	PRODUCTION DE CHALEUR	PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ
Chaudière	80 à 90 %	-
Moteur à gaz	45 à 55 %	33 à 36 %
Turbine à gaz	60 à 70 %	20 à 25 %

■ Énergie consommée par la digestion

Chaleur

La consommation de chaleur pour le chauffage des digesteurs peut être estimée à 35 à 40 kWh/tonne de boues entrées en digestion.

Cette consommation représente 30 % de l'énergie produite (valeurs extrêmes : 20 à 70 %). Il est possible de la réduire de façon significative par l'utilisa-

tion d'un échangeur thermique économiseur, qui permet de réchauffer les boues qui entrent en digestion avec les boues en sortie de digesteur.

La digestion anaérobie produit suffisamment d'énergie pour assurer le chauffage des digesteurs, même avec des boues peu fermentescibles issues d'aération prolongée et en conditions climatiques défavorables.



Compteur de biogaz, SIAAP Seine-Amont.

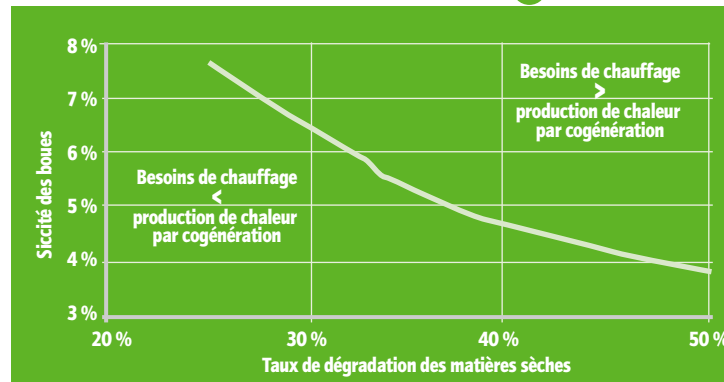
Un bilan énergétique négatif révèle un dysfonctionnement de l'installation (basse productivité, mauvais échanges thermiques...) ou un défaut de conception. Dans certains cas, la fourniture de biogaz est insuffisante : mauvaise isolation du digesteur, non entretien des échangeurs thermiques ou de la chaudière, mauvais échanges de chaleur, périodes très froides, phase de redémarrage de la digestion, inhibition de la méthanogénèse, faible productivité des boues (boues d'aération prolongée par exemple), stockage de biogaz sous-dimensionné, fuites de gaz... Il arrive donc que le bilan thermique soit négatif de façon exceptionnelle, et l'appoint est alors assuré par une chaudière mixte biogaz-propane ou biogaz-gaz naturel.

Les consommations d'appoint sont généralement très faibles et représentent un coût marginal, de l'ordre de 1 % des besoins énergétiques de la digestion.



Chaudière, Asnières-sur-Oise.

Lorsque l'on produit de l'électricité (cogénération), on récupère moins d'énergie thermique qu'avec une chaudière. Le bilan thermique est positif sous certaines conditions.



Siccité minimale des boues en entrée de digestion pour obtenir l'autonomie thermique en cas de cogénération (moteur à gaz), en fonction du taux de dégradation des matières sèches.

Lorsque l'on digère des boues peu fermentescibles, on assure l'autonomie thermique de la digestion si l'on digère des boues suffisamment concentrées.

Source SOLAGRO

CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ EN kWh/tMS, EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DES BOUES D'ENTRÉE EN DIGESTION ET DE LA PUISSANCE DU BRASSAGE

La puissance de brassage varie entre 4 et 6 W par m³ de digesteur, selon sa taille et sa forme, et la consommation d'électricité entre 50 et 200 kWh/tMS selon le temps de séjour (exprimée par le temps de rétention hydraulique) et la siccité des boues à digérer.

TENEUR	TRH	PUISSANCE, W/m ³	
EN MS	JOURS	4	6
8%	25	50	70
6%	30	70	110
4%	35	130	190

Électricité

La consommation d'électricité est liée principalement au brassage du digesteur et secondairement au pompage et à la circulation des boues pour le chauffage.

	CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ/ÉNERGIE PRODUITE	CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ/ÉLECTRICITÉ OBTENUE PAR COGÉNÉRATION
Conditions usuelles	5 %	16 %
Boues très fermentescibles, siccité élevée	2 %	5 %
Boues peu fermentescibles, faible siccité	14 %	44 %

Dans les conditions usuelles la digestion consomme 5 % de l'énergie produite, ou encore 16 % de l'électricité cogénérée.

Bilan énergétique de la digestion anaérobie avec les traitements aval

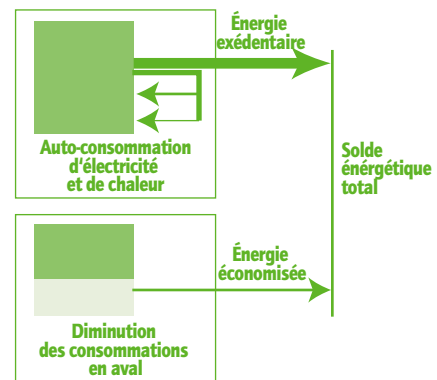
LA PART DU BIOGAZ DANS LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ D'UNE STATION D'ÉPURATION URBAINE

La consommation d'électricité pour le traitement des eaux usées urbaines est en moyenne de 30 à 40 kWh par millier d'équivalent habitant. Le biogaz est susceptible de couvrir entre le tiers et la moitié des consommations d'électricité d'une station d'épuration urbaine, poste qui représente en ordre de grandeur, le quart du coût de fonctionnement.

Le bilan énergétique doit également tenir compte de la réduction des consommations induites par la diminution des quantités à traiter, sur l'aval de la filière boues.

ÉCONOMIES D'ÉLECTRICITÉ INDUITES PAR LA DIGESTION ANAÉROBIE, SUR LES TRAITEMENTS « AVALS » en kWh électrique par tonne de matières sèches initiales

- Épandage boues digérées déshydratées ➤ 15-20
- Compostage boues digérées déshydratées ➤ 20-30
- Séchage thermique boues digérées déshydratées ➤ 30-40
- Incinération boues digérées déshydratées ➤ 100-150



■ Bilan énergétique « digestion anaérobie + séchage thermique »

Le séchage thermique est particulièrement complémentaire de la digestion anaérobie. Outre la réduction des quantités à traiter, le biogaz peut fournir la totalité de l'énergie nécessaire au séchage.

Le bilan énergétique est étroitement lié au taux de dégradation de la matière sèche et à la siccité des

boues en sortie de déshydratation. Le bilan, en termes de consommation totale et surtout de consommation d'énergie externe (fioul, gaz naturel), est évidemment favorable à la digestion. Même en cas de séchage de boues d'aération prolongée digérées, il est possible d'obtenir l'autonomie énergétique.

■ Bilan énergétique « digestion anaérobie + incinération »

Un risque : la diminution de l'auto-combustibilité

En diminuant la teneur en matières volatiles des boues, la digestion diminue également leur pouvoir calorifique, qui lui est directement proportionnel. Les boues digérées peuvent être non « auto-combustibles » (c'est-à-dire que leur pouvoir calorifique est insuffisant pour assurer les besoins d'énergie lors de l'incinération).

En fonction de la teneur initiale en matières volatiles et du taux d'abattement de celles-ci, on peut déterminer la siccité minimale à atteindre pour obtenir l'auto-combustion :

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

Siccité minimale des boues déshydratées nécessaire à l'auto-combustibilité.

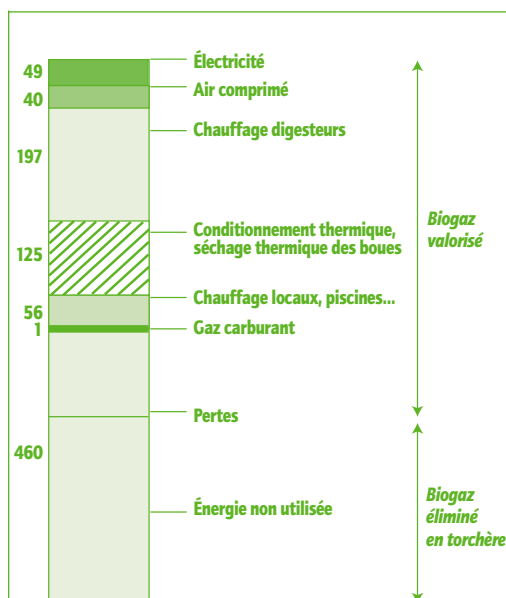
Source SOLAGRO

Un bilan énergétique global amélioré

Bien qu'elle réduise leur pouvoir calorifique, la digestion anaérobie ne diminue pas le potentiel énergétique global des boues, puisque « l'énergie » des matières volatiles dégradées par digestion se retrouve intégralement sous forme de biogaz.

En revanche, les besoins d'énergie lors de l'évaporation de l'eau contenue dans les boues diminuent. En effet, ceux-ci sont liés à la quantité de boues à traiter (évaporation de l'eau), qui diminue avec la digestion. Cette diminution des besoins est partiellement compensée par les consommations du digesteur, mais généralement le bilan global reste meilleur avec l'association digestion + incinération.

La question est de savoir comment utiliser à cette fin l'énergie du biogaz : par exemple comme combustible d'appoint pour l'incinération (les distances entre l'incinérateur et le digesteur ne doivent pas être trop grandes), ou par le séchage thermique des boues.



En utilisant mieux l'énergie produite, il serait possible de valoriser 30 000 tep supplémentaires sur les installations qui pratiquent actuellement la digestion anaérobie.

Source SOLAGRO/OBSERVER pour la DIGEC (Ministère de l'Industrie)

VALORISATION DU BIOGAZ DE STATION D'ÉPURATION : UN GISEMENT QUI POURRAIT ÊTRE DOUBLÉ

Actuellement, la digestion anaérobie des boues urbaines génère en France près de 94 millions de m³ de méthane par an (soit 930 millions de kWh, l'équivalent énergétique de 80 000 tonnes de pétrole). Les deux tiers environ de ce gaz sont transformés sous forme d'énergie électrique ou mécanique (90 GWh), ou d'énergie thermique (33 000 tonnes-équivalent pétrole), le tiers restant n'est pas valorisé et est brûlé en torchère.

Données économiques

Coûts de la digestion

■ Coût total

Il est basé sur l'ensemble des coûts, investissement et exploitation, les amortissements étant calculés sur 20 ans.

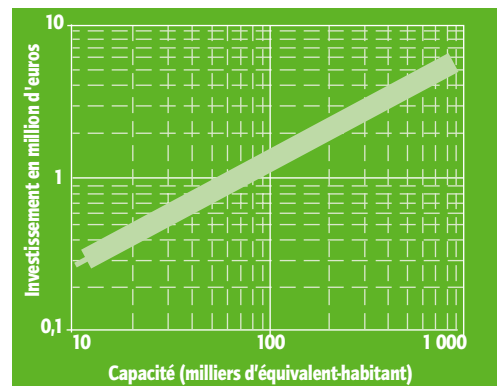
CAPACITÉ STEP EH	PRODUCTION BOUES TMS/AN	AMORTISSEMENT SUR 20 ANS €/TMS	EXPLOITATION €/TMS	COÛT TOTAL /TMS
10 000	180	118	42	160
25 000	450	86	35	120
50 000	900	67	31	97
75 000	1 350	59	29	87
100 000	1 800	53	27	81
200 000	3 600	41	25	67
400 000	7 200	33	23	56

Ces estimations sont données pour une production de 18 kg de MS par équivalent-habitant et par an.

■ Investissement

Il varie en fonction de la taille de la station. Le montant intègre l'ensemble des postes :

- digesteur avec ses équipements ;
- circuit biogaz (compresseur, stockage, chaudière) ;
- chauffage des digesteurs ;
- tuyauterie ;
- électricité ;
- automatismes ;
- génie civil.



Pour une station de 100 000 équivalent-habitants, l'investissement est de l'ordre de 1,4 million €.

■ Exploitation

Pour une tonne de matière sèche initiale, l'ensemble des coûts d'exploitation varie dans une fourchette de

20 à 40 € (150 à 280 F). Ils résultent de la somme des coûts liés aux frais de fonctionnement (ou conduite), d'entretien des équipements, à la maintenance décennale et aux consommations d'énergie.

Conduite

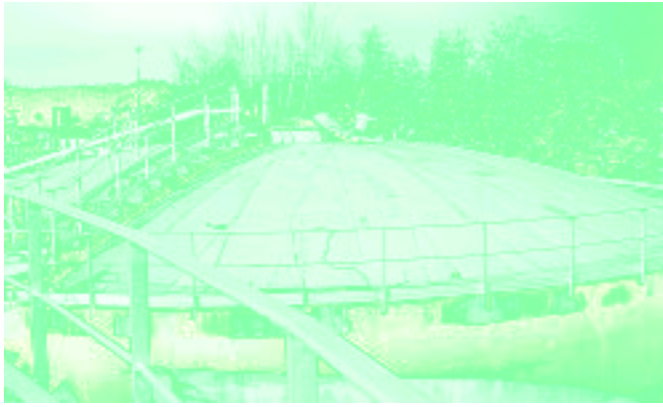
Elle consiste à surveiller les paramètres de fonctionnement du digesteur : teneurs en matières sèches (MS) et en matières volatiles (MV) en entrée et sortie, acides gras volatils, température, pH, titre alcalimétrique complet (TAC), teneur en méthane. Dans le cadre d'une routine d'exploitation, ces contrôles prennent de 15 à 30 minutes par digesteur. S'y ajoutent les opérations exceptionnelles en cas de dysfonctionnement.

Entretien de la chaîne de digestion

L'entretien de la digestion porte principalement sur les appareils (pompes de circulation de boues, surpresseur gaz) : changement des pièces d'usure, renouvellement (tous les 5 à 10 ans selon les appareils), contrôle des installations électriques.

Entretien de la chaîne « gaz »

L'entretien de la chaîne « biogaz » porte sur la chaudière : contrôle de la combustion et du réglage, ramonage des évacuations. Si la chaudière biogaz



Vidange digesteur secondaire, Communauté urbaine de Bordeaux (Louis Fargue).

est correctement conçue, sa durée de vie est de plus de 15 ans, mais il arrive que celle-ci soit corrodée en moins de 5 ans (chaudière à corps acier par exemple). Le brûleur, surtout, en contact avec le biogaz brut, est à renouveler régulièrement (tous les 3 à 6 ans).

Dans le cas d'une cogénération, le poste « moteur » représente un coût important, mais dont il faut déduire les économies d'achat d'électricité ou les recettes de vente des excédents. Hors amortissement, le coût d'entretien d'un moteur dépend de sa puissance : de l'ordre de 2,3 cents d'€ (15 ct/kWh) pour une centrale de 100 kWe, et de 1,5 cent d'€ (10 ct/kWh) pour 1 000 kWe.

Maintenance décennale

La maintenance décennale est une opération lourde et coûteuse. Elle comprend les opérations suivantes :

- vidange du digesteur ;
- évacuation des sédiments (vers un centre d'enfouissement par exemple) ;
- évacuation des boues (le digesteur étant arrêté, la

production de boues augmente, il est nécessaire de louer une unité mobile de déshydratation et parfois d'évacuer ces boues non traitées par une autre voie que la voie habituelle : enfouissement en ISD, incinération... ;

- réparations à l'intérieur des digesteurs : réfection de la couche de protection du coulage béton, des tuyauteries corrodées, modification du système de brassage ;
- remise en route de la digestion.

Cette opération se pratique normalement tous les 10 ans, mais parfois tous les 15 ans ou plus. Le coût de la maintenance décennale peut varier de 60 000 € (400 000 F) pour une station de 35 000 EH à 250 000 € (1,5 MF) pour une station de 250 000 EH.

Consommations d'électricité et de chaleur

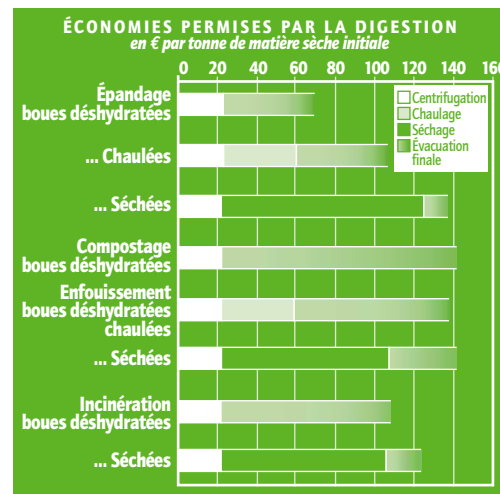
La consommation d'électricité est de l'ordre 3 à 12 € par tonne de matière sèche initiale. Le chauffage d'un digesteur est assuré par le biogaz, dont le coût est considéré comme nul.

Économies permises par la digestion

L'intérêt économique de la digestion anaérobie s'apprécie au regard des économies qu'elle apporte sur les étapes de traitement ultérieurs (déshydratation, chaulage, séchage...) et l'évacuation des boues (épandage, enfouissement, incinération). Ces économies sont bien entendu à calculer au cas par cas lors des études de faisabilité sur le traitement des boues.

Économies globales

Les économies générées par la digestion anaérobie, dans les conditions usuelles – abattement de 40 % des matières sèches et siccité après déshydratation de 25 % – varient entre 50 € et 150 € (300 et 1 000 F) par tonne de matière sèche initiale.



Économies (en euros par tonne de matière sèche initiale) permises par la digestion anaérobie sur la filière de traitement des boues dans les conditions usuelles (taux de dégradation des matières sèches de 40 % et siccité après déshydratation de 25 %).

Source SOLAGRO

RÉCAPITULATIF DES COÛTS D'EXPLOITATION PAR TONNE DE MATIÈRE SÈCHE INITIALE

	€/tMS initiale
Conduite	5 à 8
Entretien digestion	1 à 2
Entretien biogaz	1 à 2
Grosse maintenance	8 à 15
Électricité	3 à 12
TOTAL	18 à 39

MS initiales : matières sèches produites par la station d'épuration « sortie décanteurs »

Coût par tonne brute : la redevance de traitement ou la prestation d'épandage est généralement calculée sur la base des quantités à évacuer.

Coût par tonne de matière sèche : résultant du coût précédent (= coût par t brute ÷ siccité), il varie en fonction de la siccité des boues. Il est donné ici pour des boues à 25 % de MS. Pour des boues d'une siccité supérieure, ce coût serait moindre.

Économie par tonne de matières sèches initiales : elle intègre la diminution des quantités à évacuer grâce à la digestion (= coût par t MS ÷ taux de dégradation). Elle est donc deux fois plus élevée pour un taux de dégradation de 50 %, que pour un taux de dégradation de 25 %.

Économies sur les traitements aval

La digestion, parce qu'elle réduit les quantités de boues à traiter, génère des économies pour toutes les étapes ultérieures de traitement, d'une part sur les consommables (électricité, polymères, chaux, combustible...), et d'autre part sur les équipements (diminution de l'investissement et des coûts d'entretien correspondants).

Économies sur l'évacuation finale

Généralement facturée à la tonne de boues en sortie station, son coût est inversement proportionnel à la teneur en matières sèches de ces boues (plus on déshydrate, moins ça coûte cher). Ramenées aux quantités « sortie décanteur », les économies sont proportionnelles au taux de dégradation (plus on

ÉCONOMIES RÉALISÉES SUR LES TRAITEMENTS AVALS (CONSOUMATIONS, AMORTISSEMENT ET ENTRETIEN)

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

Ces valeurs sont données à titre indicatif pour un taux de dégradation des matières sèches de 40 %. Source SOLAGRO

dégrade, plus on économise). Donc, les économies sur l'évacuation finale dépendent du taux de réduction des matières sèches et de la siccité des boues à évacuer. Elles sont d'autant plus importantes que les contraintes d'évacuation sont fortes :

MODALITÉS D'ÉVACUATION	COÛTS PRATIQUÉS TRAITEMENT + TRANSPORT €/t de boues brutes	MODALITÉS D'ÉVACUATION	ÉCONOMIES SUR L'ÉVACUATION DES BOUES €/tMS initiale
Épandage	20 à 30	Boues déshydratées 25 %	30 à 50
Centre de stockage de déchets	40 à 50	Boues déshydratées 25 %	60 à 80
		Boues séchées 55 %	30 à 40
Incinération	30 à 60	Boues déshydratées 25 %	50 à 100
		Boues séchées 55 %	20 à 40
Compostage	50 à 80	Boues déshydratées 25 %	80 à 130

Ces valeurs sont données pour un taux de dégradation des matières sèches de 40 %. Source SOLAGRO

Quel seuil de faisabilité ?

Le seuil minimal de faisabilité de la digestion anaérobie, qui se situait aux environs de 30 à 200 000 équivalent-habitants par le passé, selon les destinations finales des boues, peut descendre aujourd'hui à 10 000 EH, compte tenu de l'augmentation des contraintes sur la gestion des boues. C'est le cas notamment, pour des boues très fermentescibles, pour l'épandage, la mise en décharge, le séchage thermique et l'incinération. La digestion peut également être intéressante en préalable au compostage à partir de 20 000 EH.

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

SEUILS MINIMAUX DE FAISABILITÉ DE LA DIGESTION ANAÉROBIE EN ÉQUIVALENT-HABITANTS POUR DIFFÉRENTES FILIÈRES

	CONTRAINTES	BOUES FERMENTESCIBLES	BOUES PEU FERMENTESCIBLES
Épandage	fortes	10 000	40 000
	faibles	30 000	100 000
Séchage	-	10 000	10 000
Compostage	-	20 000	120 000
ISD	fortes	10 000	20 000
	faibles	10 000	30 000
Incinération	fortes	10 000	30 000
	faibles	50 000	200 000

L'avis des exploitants

La quasi-totalité des exploitants de digesteurs maîtrisent correctement le procédé, qu'ils jugent fiable et peu contraignant, sous réserve d'un suivi régulier. Ils soulignent de façon unanime l'absence d'odeurs des boues digérées, et la diminution des volumes en sortie. La digestion offre en outre une grande flexibilité à la filière boues, grâce à la capacité de stockage du digesteur qui permet de lisser les variations de la production de boues et de les stocker sans nuisances pendant les jours non travaillés.

Les problèmes de moussage sont généralement correctement maîtrisés : utilisation de produit anti-mousse, by-pass provisoire le temps de revenir à la normale. La corrosion du génie civil et des tuyauteries n'est plus un problème, depuis qu'ils sont protégés efficacement (peintures époxy des digesteurs

ou que l'on utilise des matériaux appropriés (canalisations inox).

D'autres postes semblent moins bien maîtrisés, notamment en ce qui concerne le biogaz : comptage, élimination de l'hydrogène sulfuré, et surtout valorisation par co-génération ou par d'autres voies.

Certaines installations présentent des dysfonctionnements dus en majorité à une surcharge de la chaîne de digestion, parfois à une mauvaise connaissance des règles de l'art, et plus rarement à quelques défauts de conception ou de réalisation. Ces dysfonctionnements peuvent conduire à des performances moindres : faible taux d'abattement des matières volatiles, non-autonomie énergétique, coûts d'exploitation élevés.

*Digesteur - gazomètre,
Besançon.*



Perspectives

Pour les installations qui pratiquent la digestion anaérobie

La plupart des problèmes constatés pourraient être résolus grâce à une meilleure information des concepteurs et des exploitants : règles de l'art pour la construction (matériaux, conception...), consignes d'exploitation (maintenance décennale...), travaux

de réhabilitation. Les pratiques et techniques employées reposent pour l'essentiel sur des conceptions datant des années 1970, et les innovations développées dans d'autres pays européens semblent assez largement ignorées.

Quand envisager la digestion ?

Plus les contraintes d'évacuation des boues sont importantes, plus la méthanisation mérite d'être envisagée. Cela étant, d'autres facteurs sont susceptibles de plaider en faveur de la digestion anaérobie, comme par exemple les contraintes de voisinage ou de foncier.

PRINCIPAUX FACTEURS FAVORABLES OU NON À L'UTILISATION DE LA DIGESTION ANAÉROBIE, PAR ORDRE D'IMPORTANCE

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

Nota : Il ne s'agit pas de critères éliminatoires. Le cumul de plusieurs facteurs défavorables est nécessaire pour conclure à la non-faisabilité de la digestion et inversement. Chaque solution doit être étudiée au cas par cas.

Exemples de situations favorables à la digestion

Station de moyenne ou grande capacité produisant des boues primaires ou de forte charge, quelle que soit leur destination.

Boues destinées au séchage.

Exemples de situations défavorables à la digestion

Boues d'aération prolongée destinées au compostage sur une plateforme éloignée de toute habitation, pour une station de petite capacité.

Pour en savoir plus

Les plus récentes sources bibliographiques disponibles en français, sont complétées par une succincte sélection de documents en anglais, la bibliographie relative à la digestion anaérobie étant majoritairement anglophone.

Principales sources en français

Études spécifiques sur la digestion des boues urbaines

- COUTURIER C., BERGER S., (SOLAGRO) 2001 – Pour l'ARENE Île-de-France, l'ADEME, Gaz de France, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie – *La digestion anaérobie des boues urbaines en Île-de-France.*
- COUTURIER C., BERGER S., (SOLAGRO) 2001 – Pour l'Agence de l'Eau Adour-Garonne – *La digestion anaérobie des boues urbaines : État des lieux sur le bassin Adour-Garonne.*
- COUTURIER C., GALTIER L., (SOLAGRO, ARM, ENVT, ENSAT) 1999 – Pour l' ADEME - *État des connaissances sur le devenir des agents de risques sanitaires de la filière méthanisation des déchets et sous-produits organiques.*
- CSHPF, 1998 – *Risques sanitaires liés aux boues d'épurations des eaux usées urbaines.*
- GRAS H. et al (Lyonnaise des Eaux), BOURGOGNE P. (CU de Bordeaux) 1993 – *La digestion anaérobie des matières de vidange dans une station d'épuration urbaine - L'eau, l'industrie, les nuisances - N° 161, p 59-61.*
- MAES M., 1994 – *Les graisses de station d'épuration - L'eau, l'industrie, les nuisances - N° 178, p 25-28.*
- Études et documents faisant référence à la digestion anaérobie des boues urbaines
- ADEME, INA PG, ADEPRINA, 1996 – *La valeur azotée des boues résiduelles des stations d'épuration urbaines - Réf ADEME Éditions - N° 2128.*
- ADEME, ENSAIA, INRA, 1996 – *La valeur phosphatée des boues résiduelles des stations d'épuration urbaines - Réf ADEME Éditions - N° 2129.*
- ADEME, 2001 – *Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture (Dossier documentaire) - Réf ADEME Éditions - N° 3832.*
- ANDERSEN A., 1998 – *Filières d'élimination des boues d'épuration, audit.*
- COUTURIER C., (SOLAGRO) 2000 – Pour l'ADEME & Gaz de France – *La valorisation du biogaz en Europe : contexte réglementaire, économique, politique et fiscal - 32 p.*
- LABAQUERE, H. (Suez-Lyonnaise des Eaux), 1999 – *Quelques coûts d'exploitation de filières de valorisation des boues. - Revue TSM - N° 5, mai 1999.*
- PETIT M.-P., 1994 – *Étude microbiologique de boues résiduelles de six stations de la Gironde - Thèse de médecine, Université de Bordeaux II.*
- SOEHARTANTO, TOTOK, 1999 – *Analyse de la stabilité et commande de procédé de traitement des eaux usées - Thèse à l'INPG, laboratoire d'automatique de Grenoble.*

Quelques références en langue anglaise

- AHRING B.K., ANGELIDAKI I., 1997 – *Monitoring and controlling the biogas process - Proceedings, the future of biogas, Programme UE ALTENER.*
- BODE H., KLAUWER E., 1999 – *Advantages and disadvantages of different shapes in digester design - Water quality International (WQI), March/April.*
- LOEWENTHAL R.E., KORNMULLER U.R.C., VAN HEERDEN E.P., 1994 – *Modelling struvite precipitation in anaerobic treatment systems - Wat. Sci. Tech. Vol 30, N° 12, p 107-116.*
- PAGILLA R., CHEUNBARN T., 2000 – *Anaerobic thermophilic/mesophilic dual-stage sludge treatment - Journal of environmental engineering, N° 790*
- PRISUM JM., 1993 – *Energy efficient options for treatment of sewage sludge - Anaerobic digestion, the danish experience - Programme UE THERMIE.*

Quelques sites web de référence

- www.iawg.org.uk ■ www.biogas.ch ■ www.cadett-re.org ■ www.greentie.org ■ www.ceep-phosphates.org ■