



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Office fédéral de l'énergie OFEN**  
Division Efficacité énergétique et énergies renouvelables

**EREP SA Mai 2007**

---

# **Comparaison des technologies de pré- traitement des boues d'épuration pour l'augmentation de la production de biogaz**

---



## **Mandant**

Office fédéral de l'énergie (OFEN)

## **Mandataire**

EREP SA  
Chemin du Coteau 28, CH-1123 Aclens

## **Auteurs**

Micheline NDOH ROSSIER  
Yves MEMBREZ  
Adèle MOTTET

## **Office fédéral de l'énergie**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen • Adresse postale : CH-3003 Berne  
Tel : +41 31 322 56 11 • Fax : +41 31 323 25 00 • [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) • [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

|  |
|--|
| <p>Cette étude a été accomplie sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie.<br/>Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions.</p> |
|--|

## RESUME

Les boues produites par les stations d'épuration urbaines en Suisse représentent 200'000 tonnes de matières sèches par an. Environ 70% de ces boues sont digérées. En 2000, 38% des 200'000t étaient épandues dans l'agriculture. L'interdiction de l'épandage agricole en octobre 2006 pose le problème de l'élimination de ces quelques 70'000t de matières sèches supplémentaires.

Des technologies visant à pré-traiter les boues afin d'améliorer leur dégradation au cours de la digestion ont été développées en Europe et en Amérique du Nord au cours de ces dernières années. Le but de l'étude a constitué à situer les avantages des différents procédés de pré-traitement commercialisés actuellement, principalement en ce qui concerne l'augmentation de la production de biogaz, l'amélioration de la capacité de déshydratation des boues et la réduction des quantités de matières sèches résiduelles. Le travail s'est basé sur une recherche bibliographique et sur les réponses de questionnaires envoyés aux STEP équipés de ces procédés.

Deux tiers des 15 procédés de désintégration inventoriés ont été mis sur le marché après l'année 2000. Les nouveaux procédés utilisent des nouvelles technologies telles que les ultrasons, les champs électriques pulsés ou des méthodes mixtes combinant des techniques chimiques, physiques et chimiques. Les méthodes plus classiques se basent essentiellement sur l'hydrolyse thermique.

Il n'existe encore que très peu de références de ces procédés à grande échelle. Ceci est également valable pour les procédés les plus anciens qui sont sur le marché depuis plus de dix ans.

De manière générale, les méthodes fortement consommatrices d'énergie présentent des résultats plus performants. Les procédés de pré-traitement consomment 3.5% à 18% de l'énergie produite par la STEP. Les méthodes basées sur l'hydrolyse thermique sont les plus gourmandes.

La désintégration des boues contribue à l'amélioration de la productivité en biogaz. Une hausse moyenne 25% de la production de biogaz peut être obtenue lors de la digestion des boues.

La réduction des quantités des boues résiduelles dépend fortement de la méthode de désintégration utilisée. Les résultats varient de 10% à 60%. Les méthodes physiques sont plus performantes que les méthodes mécaniques.

Les procédés de désintégration mixtes ont des résultats supérieurs à la moyenne pour l'ensemble des critères de notre étude.

Les coûts d'acquisition et d'installation du procédé sont compensés par des recettes additionnelles. Celles-ci proviennent pour les deux tiers de la baisse des dépenses liées à l'élimination des boues (transport et séchage), les recettes restantes découlent de l'augmentation de la production d'énergies électrique et thermique. Les coûts économiques sont très spécifiques aux procédés et sont fortement influencés par les conditions techniques et économiques de la station d'épuration. C'est la raison pour laquelle aucune conclusion n'en a pu être tirée.

Une augmentation de 19,5% de la production de biogaz en Suisse pourrait être atteinte en équipant de digesteur puis en généralisant le pré-traitement sur l'ensemble des STEP pratiquant ce mode de stabilisation.

|  |    |
|--|----|
| RESUME .....   | 3  |
| A INTRODUCTION.....  | 6  |
| A.1 Contexte du projet .....   | 6  |
| A.2 Méthodologie .....   | 6  |
| B LES TECHNIQUES DE PRE-TRAITEMENT DES BOUES .....                                   | 8  |
| B.1 Généralités .....  | 8  |
| B.1.1 Désintégration des boues d'épuration.....                                      | 8  |
| B.1.2 Les différentes méthodes de désintégration.....                                | 8  |
| B.1.3 Intégration de la désintégration dans la filière de traitement des boues ..... | 9  |
| B.2 Les méthodes mécaniques .....  | 10 |
| B.2.1 L'homogénéisation par ultrasons .....  | 10 |
| B.2.2 Homogénéisation à haute pression.....  | 11 |
| B.2.3 La centrifugation lytique.....   | 11 |
| B.2.4 Le broyage par billes .....  | 12 |
| B.2.5 La pulvérisation à débit continu.....  | 12 |
| B.3 Les méthodes physiques.....  | 13 |
| B.3.1 L'hydrolyse thermique.....   | 13 |
| B.3.2 La décompression .....   | 13 |
| B.3.3 La congélation/décongélation .....   | 14 |
| B.3.4 Les champs électriques pulsés.....   | 14 |
| B.4 Les méthodes chimiques.....  | 14 |
| B.4.1 L'hydrolyse chimique .....   | 14 |
| B.4.2 L'oxydation par voie humide .....  | 14 |
| B.5 Les méthodes biologiques.....  | 15 |
| C LES FICHES DESCRIPTIVES DES PROCEDES.....  | 16 |
| C.1 SONOTRONIC/BELLMER DESINTEGRATOR BD .....  | 16 |
| C.2 SONIX™ .....   | 17 |
| C.3 DMS.....   | 18 |
| C.4 VTA GSD.....   | 19 |
| C.5 Lysatec process .....  | 20 |
| C.6 Crown® .....   | 21 |
| C.7 HSS : HUBER Sludge Squeezer .....  | 22 |
| C.8 Cambi THP .....  | 23 |
| C.9 Thélylys®-Biothélylys® .....   | 24 |
| C.10 ASTM.....   | 25 |
| C.11 Schwarting-Uhde Process .....   | 26 |
| C.12 Pulse power technology .....  | 27 |
| C.13 Zimpro® .....   | 28 |
| C.14 Pondus process.....   | 29 |
| C.15 Microsludge™ .....  | 30 |
| D L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES PROCEDES.....   | 31 |
| D.1 La teneur en matière sèche.....  | 31 |
| Les résultats.....   | 32 |
| D.2 L'input énergétique nécessaire .....   | 32 |
| Les résultats.....   | 33 |
| D.3 Contribution à l'amélioration de la productivité en biogaz .....                 | 33 |
| Les résultats.....   | 33 |
| D.4 Impacts sur l'amélioration de la déshydratation des boues.....                   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Les résultats.....  | 35 |
| D.5 Impacts sur la réduction des quantités de boues résiduelles.....                  | 35 |
| Les résultats.....  | 36 |
| D.6 Synthèse .....  | 36 |
| E LES COÛTS ECONOMIQUES DES PROCÉDES .....  | 37 |
| E.1 Les investissements et coûts d'exploitation nécessaires .....                     | 37 |
| Les investissements.....  | 37 |
| Les coûts d'exploitation .....  | 37 |
| E.2 L'élimination des boues .....   | 38 |
| E.3 Les recettes.....   | 39 |
| Exemple d'un calcul de coûts associés à un procédé.....                               | 40 |
| E.4 Synthèse .....  | 41 |
| F LES POSSIBILITES D'APPLICATION DES PROCÉDES DANS LES STEP DE<br>SUISSE .....        | 42 |
| F.1 Le parc suisse des stations d'épuration .....                                     | 42 |
| F.1.1 La taille des STEP .....  | 42 |
| F.1.2 Le mode de stabilisation .....  | 42 |
| F.1.3 La stabilisation anaérobie thermique.....                                       | 43 |
| F.1.4 La répartition géographique .....   | 43 |
| F.1.5 La production de biogaz et d'électricité .....                                  | 44 |
| F.2 Conditions-cadres pour l'application des procédés dans les STEP<br>suissees ..... | 45 |
| F.2.1 Augmentation de la production de biogaz .....                                   | 45 |
| F.2.2 La consommation énergétique.....  | 46 |
| F.2.3 La réduction des quantités de boues résiduelles .....                           | 47 |
| F.3 Synthèse .....  | 48 |
| G CONCLUSION .....  | 49 |
| H LISTE DES ABREVIATIONS.....   | 50 |
| I ANNEXES.....  | 51 |
| ANNEXE 1 : QUESTIONNAIRE ENVOYE AUX STEP .....  | 52 |
| ANNEXE 2 : LISTE DES ILLUSTRATIONS .....  | 53 |
| ANNEXE 3 : LISTE DES GRAPHIQUES.....  | 54 |
| ANNEXE 4 : LISTE DES TABLEAUX.....  | 55 |
| ANNEXE 5 : RECAPITULATIF DES METHODES DE DESINTEGRATION .....                         | 56 |
| ANNEXE 6 : REFERENCES DES CONSTRUCTEURS POUR CHAQUE PROCÉDE .....                     | 57 |
| ANNEXE 7 : STEP DE REFERENCE CONTACTEES .....   | 58 |
| ANNEXE 8 : LOCALISATION DES PLUS GRANDES STEP SUISSES .....                           | 59 |
| J BIBLIOGRAPHIE .....   | 60 |

## **A.1 Contexte du projet**

Les boues produites par les stations d'épuration urbaines représentent en Suisse plus de 200'000 tonnes de matière sèche par an. Environ 70% de ces boues sont digérées. La production de biogaz représente 485 GWh par an soit 70% du biogaz produit chaque année en Suisse. Depuis l'interdiction de l'épandage agricole des boues en octobre 2006, 40% de boues supplémentaires viennent s'ajouter à ce nombre.

Les technologies visant à pré-traiter les boues afin d'améliorer leur dégradation au cours de la digestion représentent donc un enjeu majeur aussi bien en terme de production d'énergie à partir de la biomasse qu'en terme de diminution des quantités de boues résiduelles à transporter et à incinérer.

La digestion en l'absence de pré-traitement permet de réduire de 40% en moyenne les quantités de matière sèche des boues. Les boues secondaires sont plus difficiles à dégrader que les boues primaires ou boues "physico-chimiques" car les cellules bactériennes qui les constituent sont plus résistantes aux conditions de biodégradation.

Depuis quelques années, des recherches sont en cours, principalement en Europe et en Amérique du Nord, pour développer des technologies permettant d'augmenter la biodégradabilité des boues lors de la digestion. Ces technologies sont essentiellement basées sur la destruction des cellules microbiennes et/ou des macro-molécules complexes comme les ligno-celluloses. Leur efficacité est en général exprimée à travers trois types de résultats :

- l'augmentation de la production de biogaz
- l'amélioration de la capacité de déshydratation des boues
- la réduction des quantités de matières sèches résiduelles

Cette étude a pour objectif de situer les avantages de ces différentes technologies les unes par rapport aux autres.

## **A.2 Méthodologie**

La première partie du travail a consisté en une recherche bibliographique. Le but étant d'identifier l'ensemble des procédés de pré-traitement commercialisés sur le marché. Les constructeurs des procédés identifiés ont ensuite été contactés pour obtenir des informations détaillées. Les critères principaux suivants ont été recherchés:

- Les données commerciales : nom du fabricant, pays, classe de désintégration, état de développement.
- Les données techniques : description du procédé, équipements nécessaires.
- Les STEP constituant les références des procédés.
- Les données d'exploitation : taille des STEP de références, production de biogaz, taux de MS dans les différentes étapes du traitement, réduction de la fraction organique lors de la digestion, amélioration de la capacité de digestion, quantité de boues à éliminer.
- Les données économiques : investissement, retour sur investissement, coûts d'exploitation.

La deuxième partie a consisté en l'élaboration d'un questionnaire qui a été envoyé aux STEP figurant dans la liste de référence des fabricants. Deux objectifs étaient visés dans cette

démarche. Premièrement l'obtention de données "neutres" concernant les résultats des procédés sur le terrain, c'est-à-dire dans les stations d'épuration. Deuxièmement, de permettre une comparaison et un contrôle entre les informations provenant des fabricants et ceux des techniciens des STEP. Seuls 10 questionnaires sur 56 envoyés nous ont été retournés parmi lesquels certaines réponses n'étaient pas exploitables.

Une troisième étape a donc été nécessaire qui a consisté en la recherche de littérature scientifique traitant des expériences des procédés de pré-traitement à grande échelle, dans des stations d'épuration communales. La littérature scientifique a servi à compléter les informations disponibles.

Il existe de très nombreux procédés de désintégration des boues. Dans le cadre de l'étude, nous nous sommes restreints à ceux qui ont été implicitement conçus pour être utilisés avant une digestion anaérobie. Les procédés suivants n'ont pas été retenus :

- Les procédés diminuant la production de boues lors du traitement des eaux usées.
- Les procédés de pré-traitement pour stabilisation aérobie.
- Les procédés remplaçant la digestion lors de la stabilisation des boues.
- Les procédés post-digestionnels.
- Les procédés dont la commercialisation a été abandonnée par les constructeurs.

Deux procédés comprennent deux digestions consécutives; une thermophile et une mésophile. Il s'agit de ASTM et de Schwarting-Uhde. Ces procédés ont été décrits, la première digestion ayant été considérée comme un pré-traitement thermique.

## B LES TECHNIQUES DE PRE-TRAITEMENT DES BOUES

### B.1 Généralités

#### B.1.1 Désintégration des boues d'épuration

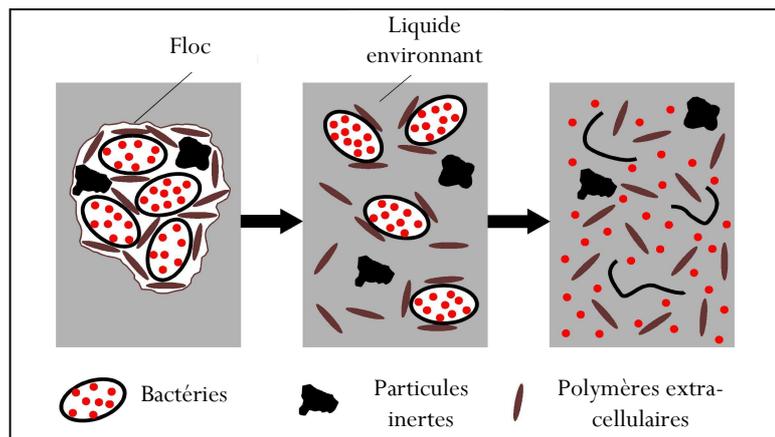
Par désintégration des boues d'épuration, on entend la réduction du volume des boues sous l'effet de forces extérieures. Ces forces peuvent être d'origine mécanique, physique, chimique ou biologique.

Les boues se présentent sous la forme de flocs. Ceux-ci sont essentiellement constitués de bactéries filamenteuses ou non, de polymères, de particules inorganiques. Cependant ce type d'agglomérat ne favorise pas l'accès de la matière organique aux micro-organismes responsables de la dégradation anaérobie des boues.

La désintégration permet :

- dans un premier temps, de dissoudre ces flocs et de fractionner les molécules à longues chaînes
- dans un second temps, de libérer le contenu intracellulaire dans le milieu environnant, comme le présente l'illustration B.1

Illustration B.1 : Désintégration d'un floc de boue puis destruction des cellules [12]



La matière organique est rendue alors plus accessible aux micro-organismes. Ce mécanisme, appelé lyse cellulaire libère également des exo- et endoenzymes qui agissent en tant que stimulants lors de la digestion. Cela permet de nouveau d'augmenter le degré de dégradation de la matière organique. Pour cela, une faible quantité de lysat est suffisante. La digestion des boues non désintégrées est activée par les boues désintégrées.

#### B.1.2 Les différentes méthodes de désintégration

En général, les méthodes de désintégration sont classées de la façon suivante :

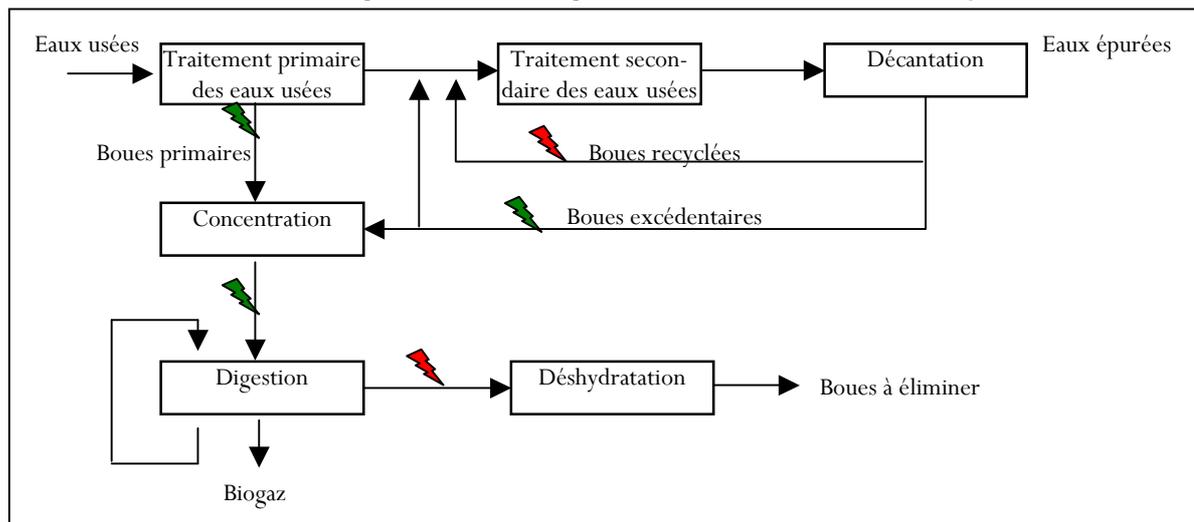
Tableau B.1 : Méthodes de désintégration

| Méthodes de désintégration | Classe de désintégration   |
|----------------------------|--|
| Mécanique                  | Homogénéisation par ultrasons<br>Homogénéisation à haute pression<br>Centrifugation lytique<br>Broyage par billes<br>Pulvérisation à débit continu                               |
| Physique                   | Hydrolyse thermique <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ &lt; 100°C</li> <li>▪ &gt; 100°C</li> </ul> Décompression<br>Congélation/décongélation<br>Champs électriques pulsés |
| Chimique                   | Hydrolyse acide ou basique<br>Oxydation par voie humide <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ à l'oxygène</li> <li>▪ à l'ozone</li> <li>▪ au peroxyde d'hydrogène</li> </ul>  |
| Biologique                 | Hydrolyse enzymatique<br>Autolyse  |

### B.1.3 Intégration de la désintégration dans la filière de traitement des boues

Si l'on se réfère au schéma ci-dessous, il y a plusieurs emplacements pour intégrer une désintégration des boues dans une station d'épuration. Cela dépend de l'objectif du traitement. Le but de cette étude est de comparer les différents procédés de désintégration des boues en vue d'augmenter la production de biogaz lors de leur digestion. Ce sont donc les procédés représentés en vert sur lesquels nous nous pencherons.

Illustration B.2 : Intégration de la désintégration des boues dans une station d'épuration



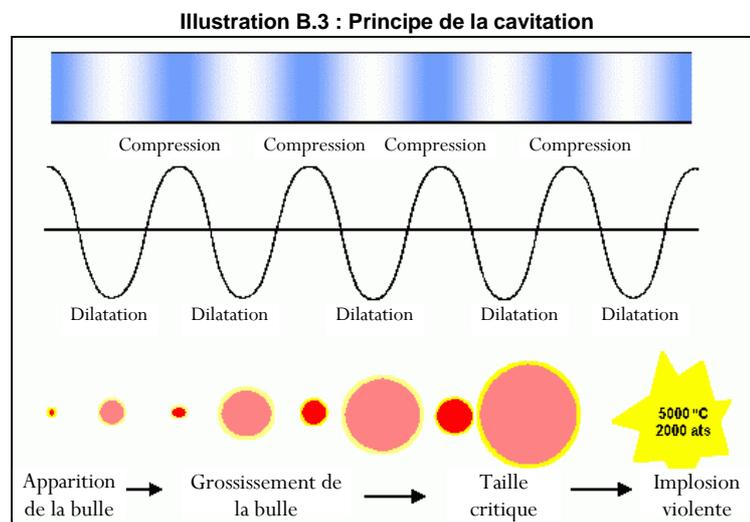
## B.2 Les méthodes mécaniques

### B.2.1 L'homogénéisation par ultrasons

Les ultrasons sont des ondes se propageant à une fréquence comprise entre 20 kHz et 10 MHz. Leur propagation s'effectue par vibration des molécules constituant le milieu de propagation (air, eau, solide) en exerçant des séries de compression et de dilatation.

À des fréquences ne dépassant pas 1MHz et dans un milieu liquide, cette propagation génère la formation de bulles de cavitation. Ce sont des bulles de gaz qui se forment lors des phases de dilatation. Ces gaz ne sont pas entièrement expulsés lors des phases de compression. Les bulles grossissent alors jusqu'à atteindre une rayon critique. Elles implosent et dégagent une énergie sous forme de chaleur et de différence de pression entre la bulle et son environnement immédiat. La phase vapeur se trouve alors sous des conditions extrêmes de température et de pression allant jusqu'à 5000°C et 2000atm.

Lors de cette implosion, d'importantes forces de cisaillement sont générées.

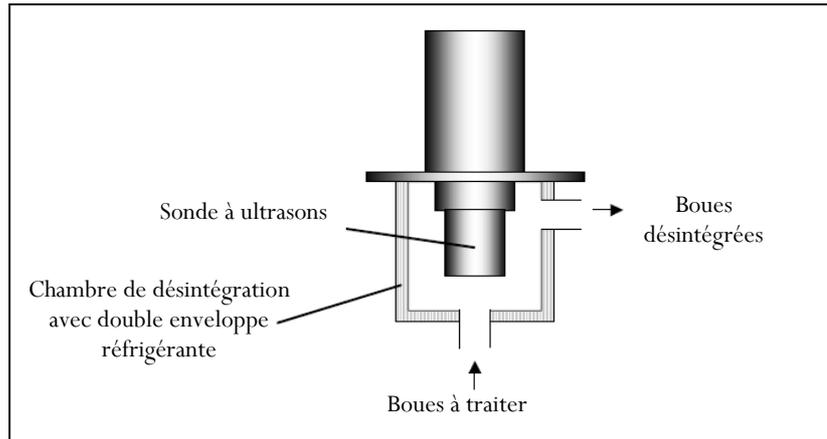


L'homogénéisateur à ultrasons est basé sur le principe de la cavitation.

Selon le degré d'énergie appliquée sous forme d'ultrasons (haute ou faible fréquence), le résultat du traitement des boues est différent : dissolution des floccs (rupture des liaisons faibles reliant les constituants d'un flocc) ou perforation des membranes cellulaires (lyse).

Un homogénéisateur à ultrasons est constitué d'une chambre de désintégration dans laquelle circulent les boues. Dans cette chambre, les boues sont en contact avec une sonde à ultrasons qui délivre la fréquence choisie. Les cavitations se forment donc lors du passage des boues.

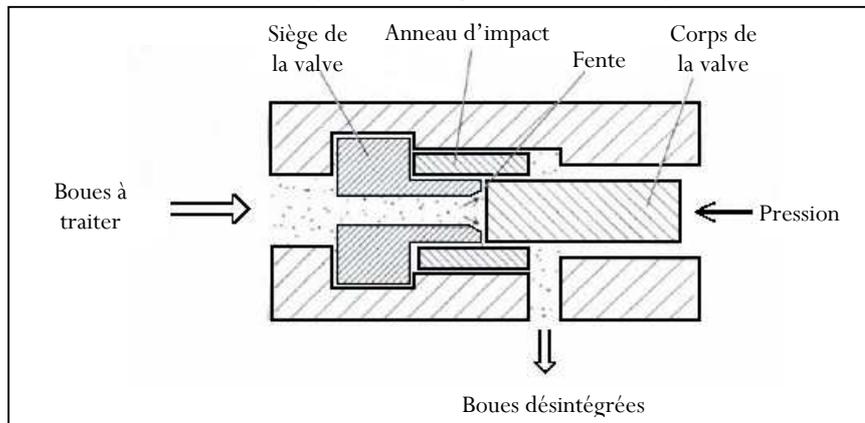
Illustration B.4 : Principe d'un homogénéisateur à ultrasons [8]



### B.2.2 Homogénéisation à haute pression

Ce type d'homogénéisateur est constitué d'un groupe homogénéisant ou valve et d'une pompe à piston. Le groupe homogénéisant est lui-même constitué d'un corps réglable et d'un siège fixe. Les boues sont poussées en direction d'une fente dont l'ouverture est réglée par la pression extérieure. La pression des boues augmente à cause du rétrécissement de l'orifice. Des cavitations se forment et créent des turbulences lors de leur implosion telles que des forces de cisaillement ou des chocs violents.

Illustration B.5 : Principe d'un homogénéisateur à haute pression [12]

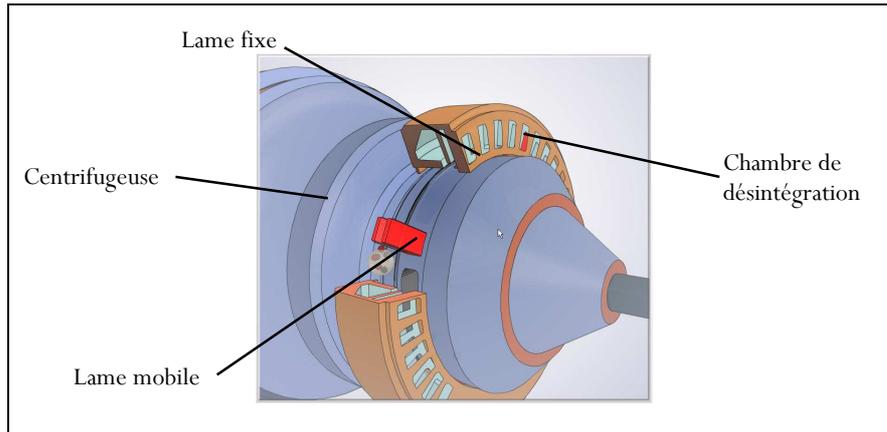


Par application de faibles pressions (50-200bar), seuls les floccs sont dissous et par application de hautes pressions (200-1200bar), les cellules sont désintégrées.

### B.2.3 La centrifugation lytique

Les centrifugeuses agissant par ce principe ont été pourvues d'une extension lytique. Ces extensions font partie intégrante des centrifugeuses/épaisseurs déjà présentes dans la filière de traitement des boues. Elles utilisent l'énergie cinétique dissipée par ceux-ci pour fonctionner. L'épaississement et la réduction des boues sont donc simultanés. Les boues sont soumises à des forces de cisaillement causées par des lames fixes rattachées à la chambre de désintégration et des lames mobiles rattachées au rotor ainsi qu'à des chocs causés par la forte diminution de l'énergie cinétique en sortie de centrifugeuse.

**Illustration B.6 : Principe d'une centrifugeuse lytique (fournie par Lysatec GmbH)**



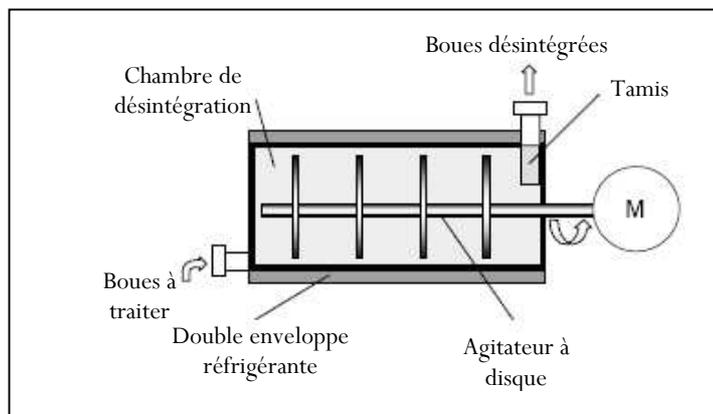
Les paramètres suivants ont une influence sur le taux de désintégration des boues :

- régime du rotor (nombre de tour/minute)
- le flux des boues à travers la centrifugeuse

#### **B.2.4 Le broyage par billes**

Les broyeurs à bille sont constitués d'une chambre de désintégration munie d'un agitateur à disque et rempli à 70-90% d'éléments broyeurs (billes de zirconium ou de verre) et entourée d'une double enveloppe réfrigérante.

**Illustration B.7 : Principe d'un broyeur à bille [8]**



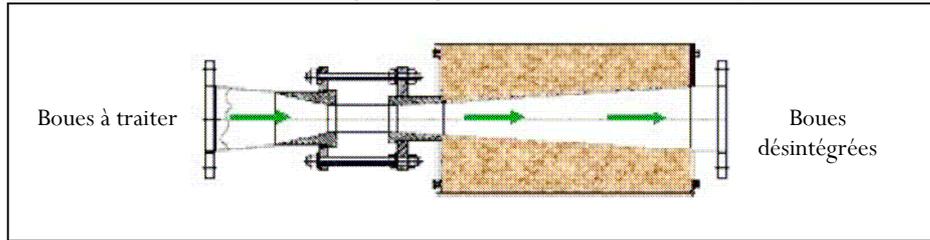
Lors de l'agitation, les boues sont écrasées et soumises à des forces de cisaillement qui dénaturent leur structure. En sortie d'homogénéisateur, un filtre retient les éléments broyeurs et laisse passer les boues désintégrées.

#### **B.2.5 La pulvérisation à débit continu**

Des cavitations sont créées par un gicleur à débit continu spécialement conçu dans ce but et dans des conditions de débit et de pression bien définies.

Les cavitations ne sont créées seulement lors du passage des boues et ne sont donc pas en contact avec le matériel. Il n'y a donc pas de dégradation de matériel ni perte d'énergie.

Illustration B.8 : Principe d'un pulvérisateur à débit continu [5]



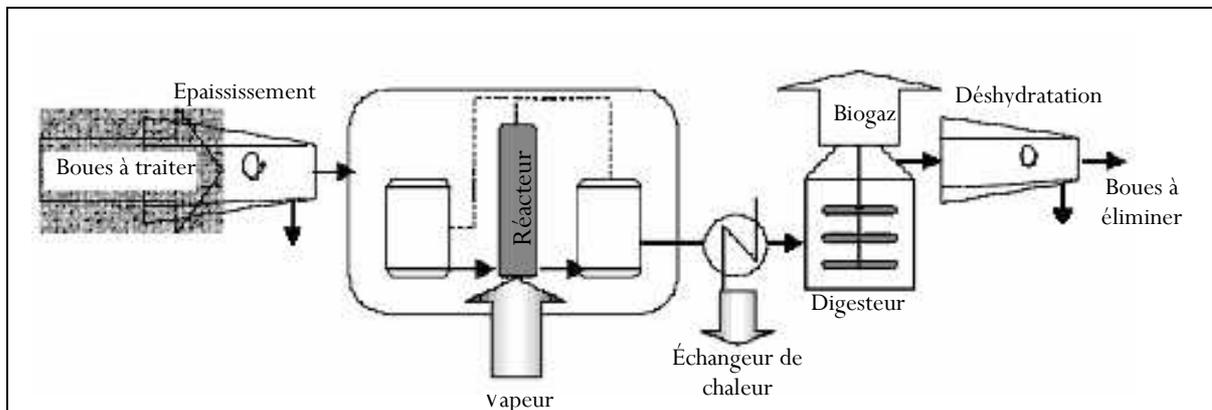
## B.3 Les méthodes physiques

### B.3.1 L'hydrolyse thermique

L'hydrolyse est une réaction chimique qui entraîne la réduction de la taille des chaînes moléculaires par addition d'ions  $\text{HO}^-$  et  $\text{H}^+$  provenant de la dissociation de l'eau.

L'hydrolyse thermique y parvient par augmentation de la température.

Illustration B.9 : Procédé mettant en jeu une hydrolyse thermique [4]



Le chauffage des boues se fait soit par injection de vapeur, soit par contact direct dans un échangeur de chaleur. On distingue deux types d'hydrolyse thermique :

- hydrolyses à  $T < 100^\circ\text{C}$  : elles ne nécessitent pas d'augmentation de pression et sont plus adaptées à l'élimination des boues flottantes.
- hydrolyses à  $T > 100^\circ\text{C}$  : elles s'effectuent dans des conditions de pressions plus élevées et augmentent la production de biogaz si elles sont suivies d'une digestion.

### B.3.2 La décompression

Les boues sont mises en contact avec du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) supercritique. Le  $\text{CO}_2$  se présente sous sa forme supercritique à des températures supérieures à  $31^\circ\text{C}$  et des pressions supérieures à 74bar. Sous cette forme, il se comporte comme un liquide mais possède les propriétés physiques d'un gaz. Il diffuse alors par les membranes cellulaires et après un temps défini, lorsque la pression est réduite, il retourne en phase gazeuse et détruit alors les membranes cellulaires.

### **B.3.3 La congélation/décongélation**

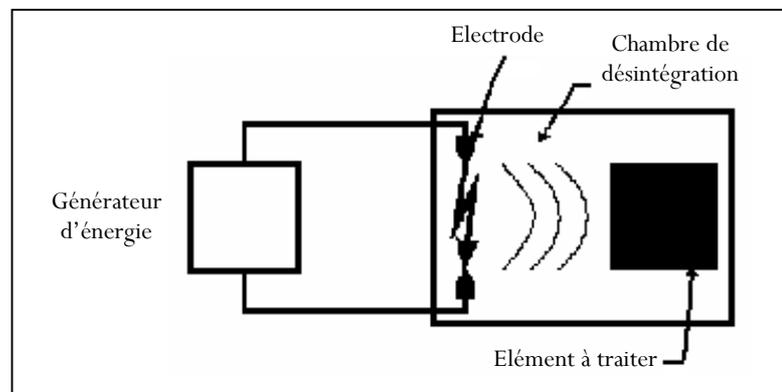
Cette technique utilise une des propriétés physiques de l'eau qui, lorsqu'elle passe sous la forme solide augmente de volume. Lors de la congélation des boues, l'eau emprisonnée dans les floccs augmente de volume et les détruit. Leur contenu est alors dissous dans la suspension lors de la décongélation.

### **B.3.4 Les champs électriques pulsés**

Par cette technique, des pulsations électriques sont générées au sein même du flux de boues pour y créer des ondes de chocs. Ces pulsations sont créées au moyen de 2 électrodes plongeant dans les boues. Ces électrodes sont remplies d'azote pour parvenir à des décharges électriques stables. Elles peuvent alors délivrer une tension de 10kV.

Ces ondes de chocs entraînent une lyse cellulaire.

Illustration B.10 : Principe du champ électrique pulsé [17]



## **B.4 Les méthodes chimiques**

### **B.4.1 L'hydrolyse chimique**

Une hydrolyse, à savoir la réduction de la taille des chaînes moléculaires, peut également être réalisée par voie chimique. À la différence de l'hydrolyse thermique (V § 2.3.1), les ions  $H^+$  et  $HO^-$  proviennent de l'ajout de réactifs chimiques, acides ou basiques. Cet ajout intervient avant la digestion. Ainsi l'étape d'hydrolyse de la digestion anaérobie est accélérée.

Si cette hydrolyse chimique est couplée à une hydrolyse thermique, la température et la pression du réacteur peuvent être diminuées. A hautes températures on peut également observer, lors de l'ajout de bases, une saponification des membranes cellulaires (constituées de graisse), ce qui entraîne une lyse cellulaire.

### **B.4.2 L'oxydation par voie humide**

Ce processus consiste à chauffer les boues en présence d'un gaz oxydant. Ceux-ci attaquent la matière organique à l'échelle de l'atome ou de la molécule. L'oxydation produit un rejet gazeux, un liquide biodégradable et un solide essentiellement minéral.

Les degrés ultimes d'oxydation sont les suivants :

Tableau B.2 : Les degrés ultimes d'oxydation

| Eléments             | Degré d'oxydation ultime      |
|----------------------|-------------------------------|
| C                    | CO <sub>2</sub>               |
| H                    | H <sub>2</sub> O              |
| N                    | N <sub>2</sub>                |
| S                    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |
| Chlorures organiques | Cl <sup>-</sup>               |
| Métaux lourds        | Oxydes métalliques            |

Ces degrés d'oxydation ne sont pas systématiquement atteints. Cela dépend de la force de l'oxydant, du temps de contact entre celui-ci et les boues ainsi que des conditions opératoires (température et pression).

Voici les principaux oxydants utilisés ainsi que les conditions opératoires dans lesquelles ils le sont :

- Oxydation à l'oxygène
  - Oxydation dans l'eau supercritique : T = 400-600°C et P > 250 bar
  - Oxydation sous haute pression : T ≈ 300°C et P ≈ 200 bar
  - Oxydation sous basse pression : T = 120-220°C et P = 3-25 bar
- Oxydation à l'ozone
- Oxydation au peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

L'efficacité de l'oxydation peut être améliorée par l'utilisation de catalyseurs souvent métalliques.

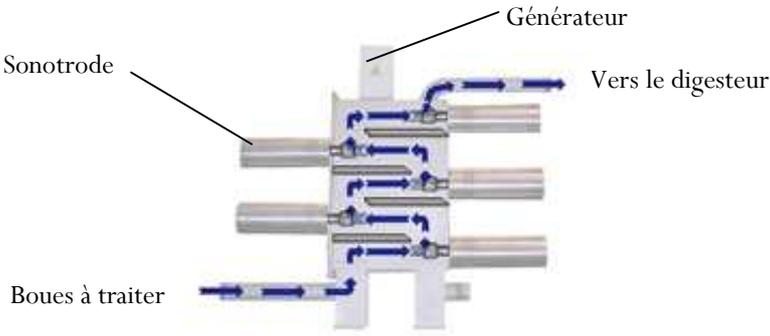
## B.5 Les méthodes biologiques

L'hydrolyse enzymatique est une hydrolyse catalysée par de enzymes. Cependant les enzymes mises en jeu, les hydrolases, sont spécifiques et ne dégradent pas tous les composés organiques.

Ces enzymes sont soit, ajoutées lors de la digestion soit, produites par le système. Dans ce cas on parle d'autolyse. Elles agissent en accélérant la dégradation organique.

## C LES FICHES DESCRIPTIVES DES PROCÉDES

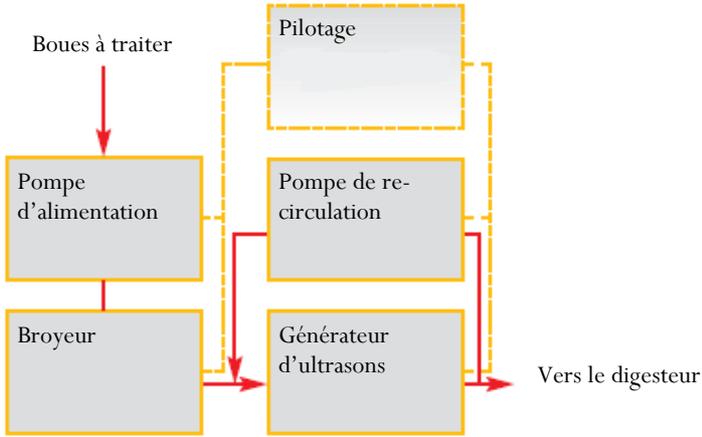
### C.1 SONOTRONIC/BELLMER DESINTEGRATOR BD

|   |  |
|---|--|
| <b>Commercialisant :</b> Ultrawaves Gmbh<br><b>Ville :</b> Hamburg<br><b>Pays :</b> Allemagne   | <b>Type de procédé :</b> Mécanique<br>Homogénéisation par ultrasons  |
| <p><b>Description technique :</b></p> <p>Les boues destinées à être digérées sont préalablement traitées dans un réacteur à ultrasons (volume de 29L, équipé de sondes de 20kHz, approvisionnées par des générateurs de 2kW chacun). Circulation en continu dans le réacteur grâce à une pompe pour éviter la formation de bulles d'air produites par le dégazage des boues.</p>  <p>MS des boues entrantes : 0,5-4%</p> |  |
| <b>Production de biogaz :</b> +20% à +50%<br><b>Taux de conversion de la MO :</b> +20% à +50%<br><b>Consommation énergétique du procédé :</b><br>Pas de données   | <b>Capacité de déshydratation des boues :</b><br>+2 à +5%<br><b>Quantité de boues à éliminer :</b> -10% à -20% |
| <b>Données économiques :</b> pas de données   |  |
| <p><b>Références :</b> 11 installations définitives en Europe (statut 2006)</p> <p>Bamberg (D), 2004, 230'000 EH<br/>         Meldorf (D), 2004, 20'000 EH<br/>         Zeist (NL), 2005, 75'000EH<br/>         Hennef (D), 2006, 65'000 EH<br/>         Bath (NL), 2006, 550'000 EH<br/>         Slupsk (PL), 2007, 250'000 EH</p>   |  |

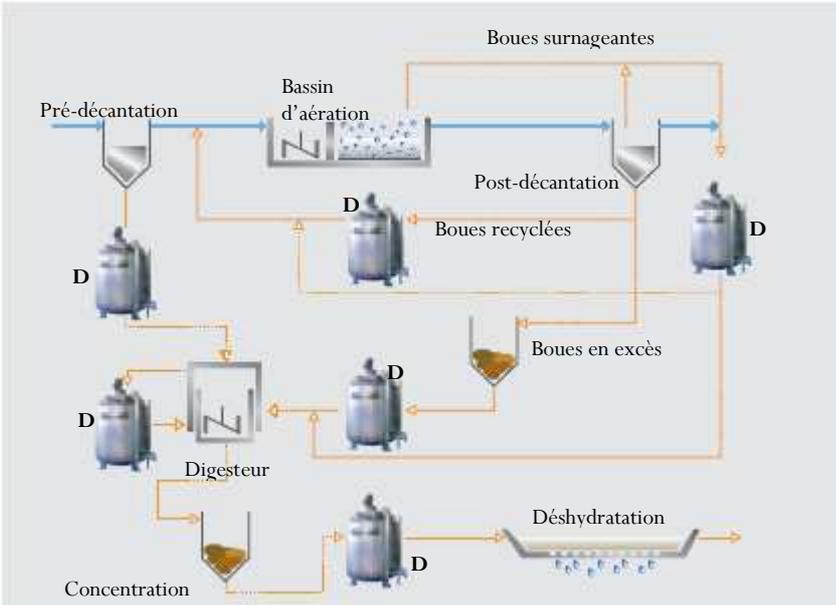
## C.2 SONIX™

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Fabricant :</b> Sonico Ltd<br/> <b>Ville :</b> Kidderminster<br/> <b>Pays :</b> Royaume Uni</p>   | <p><b>Type de procédé :</b> Mécanique<br/> Homogénéisateur à ultrasons</p>  |
| <p><b>Description technique :</b><br/> Désintégration des boues excédentaires<br/> Présence de réacteurs à ultrasons côte à côte (puissance de 3 à 6 kW)<br/> Temps séjour dans les réacteurs : 2 à 4 sec.</p> <div data-bbox="614 649 997 1064" data-label="Image"> </div> <p><b>Equipement nécessaire :</b> épaisseur</p> |   |
| <p><b>Production de biogaz :</b> +20% à +50%<br/> <b>Taux de conversion de la MO :</b> +20% à +50%<br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b><br/> Pas de données</p>  | <p><b>Capacité de déshydratation des boues :</b><br/> 0 à +2,5%<br/> <b>Quantité de boues à éliminer :</b> Pas de données</p> |
| <p><b>Données économiques :</b><br/> Retour sur investissement de 2 à 5 ans</p>   |   |
| <p><b>Références :</b> plusieurs références dans le monde entier<br/> Kävlinge (S), 2002, 100'000 EH<br/> Singapore (SGP), 2004, 1'900'000 EH<br/> Mangere (NZ), 2005, 800'000 EH</p>   |   |

### C.3 DMS

|  |  |
|--|--|
| <b>Développé par :</b> IKTS Fraunhofer et IWE.tec GmbH<br><b>Ville :</b> Dresden<br><b>Pays :</b> Allemagne  | <b>Type de procédé :</b> Mécanique<br>Homogénéisateur à ultrasons  |
| <p><b>Description technique :</b><br/>         Désintégration de 30% des boues excédentaires ou mixtes</p>  <p><b>Equipement nécessaire :</b> centrifugeuse</p> |  |
| <b>Production de biogaz :</b> +13% à +20%<br><b>Taux de conversion de la MO :</b> +30% à +45%<br><b>Consommation énergétique du procédé :</b><br>Pas de données  | <b>Volume des boues digérées :</b> -15%<br><b>Amélioration de la déshydratation des boues :</b> +1,8%<br><b>MS des boues à éliminer :</b> -5% à -25% |
| <b>Données économiques :</b> Pas de données  |  |
| <b>Références :</b> plusieurs installations à grande échelle<br>Detmold (D), 2000, 90'000 EH<br>Mannheim (D), 2001, 725'000 EH<br>Rüsselsheim (D), 2001, 80'000 EH<br>Wiesbaden (D), 2002, 360'000 EH<br>Helsingør (DK), 78'000 EH                 |  |

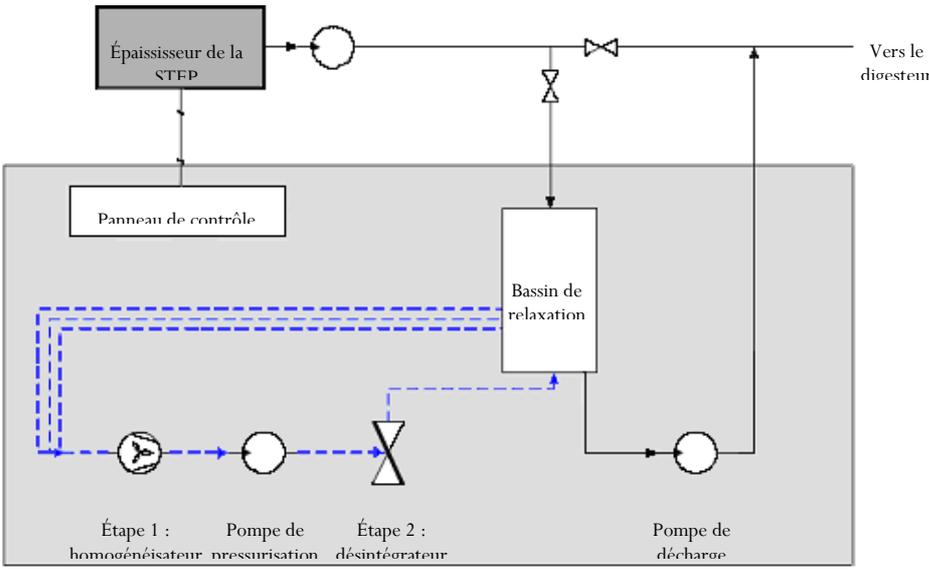
## C.4 VTA GSD

|   |  |              |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
|---|--|--------------|------|------------|-------------|------|------------|-------------------------|------|------------|------------------------------|------|------------|----------------|------|------------|-----------------|------|-----------|---------------|------|-----------|-----------------|------|-----------|--------------|------|-----------|--------------|------|-----------|
| <p><b>Fabricant :</b> VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH<br/> <b>Ville :</b> Weibern<br/> <b>Pays :</b> Autriche</p>  | <p><b>Type de procédé :</b> Mécanique<br/> Homogénéisateur à ultrasons</p>                         |              |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| <p><b>Description technique :</b><br/> Intégration de désintégrateurs à ultrasons dans le filière de traitement des eaux usées et des boues.<br/> Désintégration en continu de 30 à 100 % des boues excédentaires. Circulation de bas en haut du réacteur et agitation continue. Vibration ultrasonique, temps de séjour et vitesse d'agitation variables selon le degré de désintégration désiré</p>  <p style="text-align: right;">D : Désintégrateur</p>  |  |              |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| <p><b>Production de biogaz :</b> +11% à +33%<br/> <b>Taux de conversion de la MO :</b> +25%<br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b><br/> 3,7% de l'électricité produite</p>   | <p><b>MS des boues à éliminer :</b> +15%<br/> <b>Quantité de boues à éliminer :</b> -14 à -18%</p> |              |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| <p><b>Données économiques</b> (pour une STEP de 120'000 EH)<br/> Coûts d'exploitation : 9'500 €/an</p>  |  |              |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| <p><b>Références :</b> 13 références en Europe (statut de septembre 2006)</p> <table border="1" data-bbox="225 1648 1102 1984"> <tbody> <tr> <td>Rzeszow (PL)</td> <td>2003</td> <td>220'000 EH</td> </tr> <tr> <td>Villach (A)</td> <td>2003</td> <td>200'000 EH</td> </tr> <tr> <td>Eberstadt/Darmstadt (D)</td> <td>2003</td> <td>200'000 EH</td> </tr> <tr> <td>Zentralkläwerk Darmstadt (D)</td> <td>2004</td> <td>240'000 EH</td> </tr> <tr> <td>Halle Nord (D)</td> <td>2004</td> <td>300'000 EH</td> </tr> <tr> <td>Großostheim (D)</td> <td>2005</td> <td>35'000 EH</td> </tr> <tr> <td>Kitzbühel (A)</td> <td>2005</td> <td>46'500 EH</td> </tr> <tr> <td>Winsen/Luhe (D)</td> <td>2005</td> <td>50'000 EH</td> </tr> <tr> <td>Penthaz (CH)</td> <td>2006</td> <td>10'000 EH</td> </tr> <tr> <td>Obersee (CH)</td> <td>2006</td> <td>25'000 EH</td> </tr> </tbody> </table> |  | Rzeszow (PL) | 2003 | 220'000 EH | Villach (A) | 2003 | 200'000 EH | Eberstadt/Darmstadt (D) | 2003 | 200'000 EH | Zentralkläwerk Darmstadt (D) | 2004 | 240'000 EH | Halle Nord (D) | 2004 | 300'000 EH | Großostheim (D) | 2005 | 35'000 EH | Kitzbühel (A) | 2005 | 46'500 EH | Winsen/Luhe (D) | 2005 | 50'000 EH | Penthaz (CH) | 2006 | 10'000 EH | Obersee (CH) | 2006 | 25'000 EH |
| Rzeszow (PL)  | 2003   | 220'000 EH   |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Villach (A)   | 2003   | 200'000 EH   |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Eberstadt/Darmstadt (D)   | 2003   | 200'000 EH   |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Zentralkläwerk Darmstadt (D)  | 2004   | 240'000 EH   |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Halle Nord (D)  | 2004   | 300'000 EH   |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Großostheim (D)   | 2005   | 35'000 EH    |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Kitzbühel (A)   | 2005   | 46'500 EH    |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Winsen/Luhe (D)   | 2005   | 50'000 EH    |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Penthaz (CH)  | 2006   | 10'000 EH    |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |
| Obersee (CH)  | 2006   | 25'000 EH    |      |            |             |      |            |                         |      |            |                              |      |            |                |      |            |                 |      |           |               |      |           |                 |      |           |              |      |           |              |      |           |

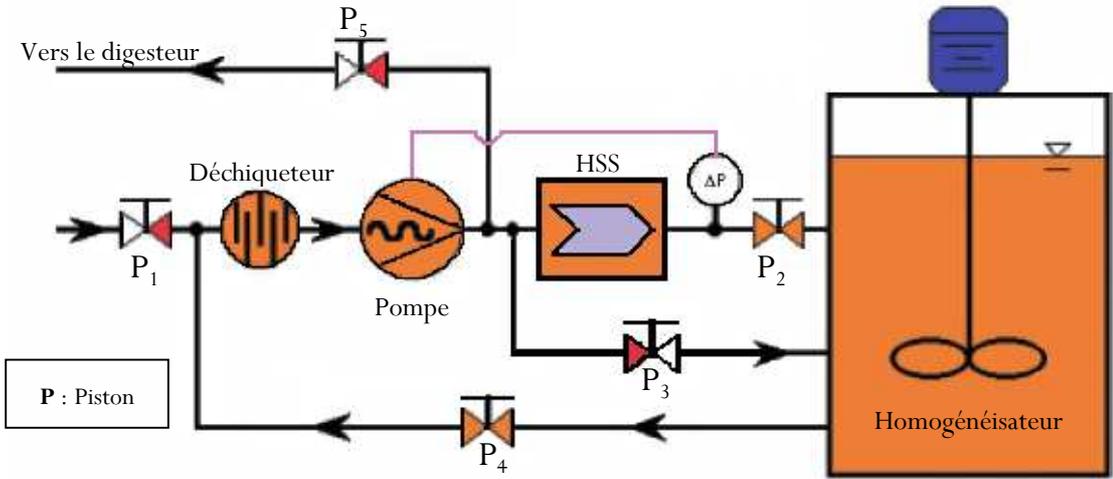
## C.5 Lysatec process

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Fabricant :</b> Lysatec GmbH<br/> <b>Ville :</b> Marktredwitz<br/> <b>Pays :</b> Allemagne</p>  | <p><b>Type de procédé :</b> Mécanique<br/> Centrifugeuse lytique</p>  |
| <p><b>Description technique</b><br/> Par centrifugation, destruction des cellules difficiles à digérer lors du procédé anaérobique. Extension spécifique soit intégrée au procédé de centrifugation/épaississement existant soit installé à la suite de celui-ci.<br/> Rotation de 1500 à 3000 tr/min. Puissance requise : 0,75 à 1,1 kW/m<sup>3</sup><br/> Traitement des boues excédentaires</p> <div data-bbox="422 683 1236 1220" style="text-align: center;"> </div> |   |
| <p><b>Production de biogaz :</b> +15% à +30%<br/> <b>Taux de conversion de la MO :</b> +50% à +65%<br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b> 0.75 - 1.1 kWh/m<sup>3</sup><sub>boue</sub></p>  | <p><b>Performance de l'épaississement :</b><br/> Volume : -36%<br/> MS : + 57%<br/> <b>Quantité de boues à éliminer :</b> -18% du volume de boue en sortie de digesteur</p> |
| <p><b>Données économiques :</b><br/> Investissement : de 18'000 à 85'000 € selon les classes<br/> Coûts d'exploitation : de 6'000 à 10'500 €/an selon les classes</p>   |   |
| <p><b>Références :</b><br/> Prague (CZ), 1997, 1'920'000 EH<br/> Aachen-Soers (D), 2001, 650'000 EH<br/> Liberec (CZ), 2002 ,100'000 EH</p>   |   |

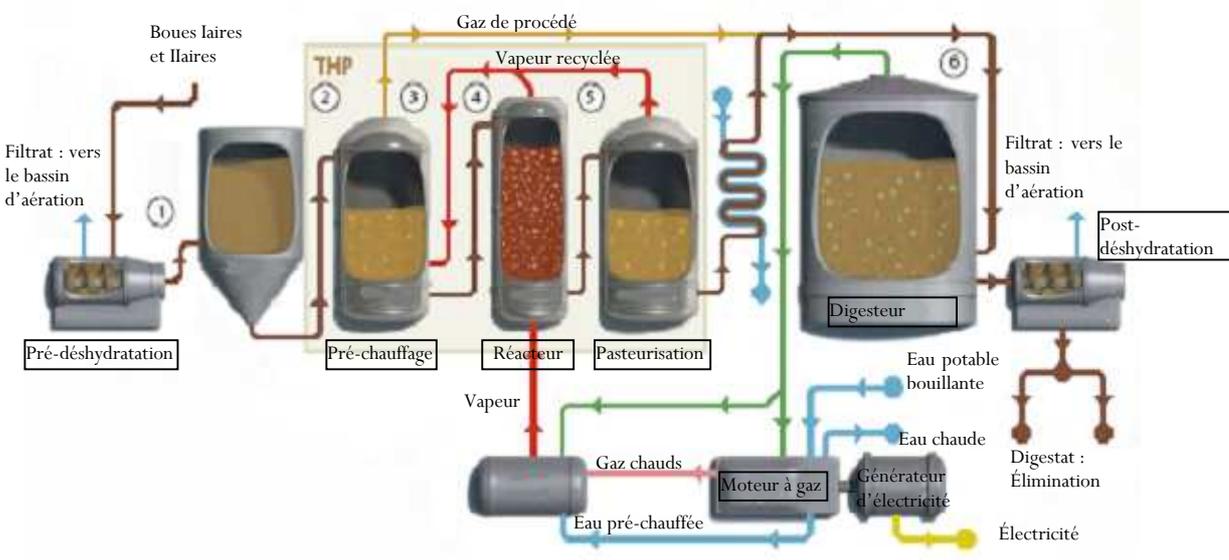
## C.6 Crown<sup>®</sup>

|   |   |
|---|---|
| <b>Fabricant :</b> Biogest AG<br><b>Ville :</b> Taunusstein<br><b>Pays :</b> Allemagne  | <b>Type de procédé :</b> Mécanique<br>Désintégrateur spécifique |
| <p><b>Description technique</b><br/>         Composé de 2 étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'homogénéisateur pour dissoudre les floques</li> <li>- le désintégrateur sous pression (12 bar) pour lyser les cellules</li> </ul> <p>Le désintégrateur est basé sur le principe de la cavitation contrôlée.</p>  <p>Débit de 4 à 8 m<sup>3</sup>/h</p> |   |
| <b>Production de biogaz :</b> +30%<br><b>Consommation énergétique du procédé :</b><br>0,9 à 2 kWh/m <sup>3</sup>  | <b>Quantité de boues à éliminer :</b> -20%                      |
| <b>Données économiques :</b> Pour une 25'000 EH<br>Investissement : 170'000 €<br>Coûts d'exploitation : 2'500 €/an  |   |
| <b>Références :</b> environ 15 références (statut septembre 2006)<br>Taunusstein (D), 2002, 30'000 EH<br>Oppenheim (D), 2004, 22'000 EH<br>Münchwilen (CH), 2005, 30'000 EH   |   |

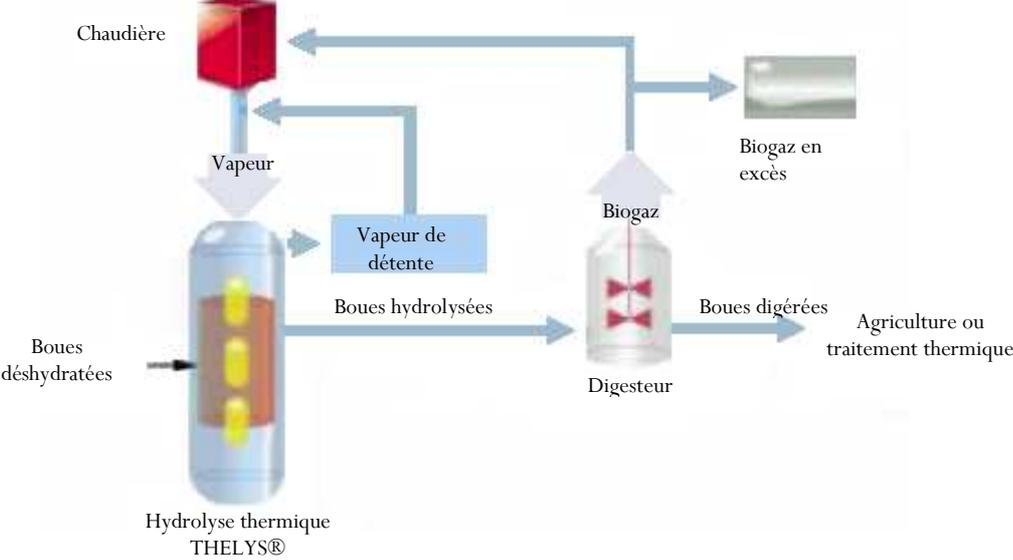
## C.7 HSS : HUBER Sludge Squeezer

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Fabricant :</b> Hans Huber AG<br/> <b>Ville :</b> Berching<br/> <b>Pays :</b> Allemagne</p>   | <p><b>Type de procédé :</b> Mécanique<br/> Désintégrateur spécifique</p> |
| <p><b>Description technique</b><br/> Destruction mécanique des floques suivie d'une étape d'homogénéisation : augmentation de la surface de transfert et amélioration de l'hydrolyse lors de la digestion.<br/> Remplissage de la boucle : P<sub>1</sub> et P<sub>3</sub> ouverts<br/> Traitement : P<sub>2</sub> et P<sub>4</sub> ouverts<br/> Procédé continu avec un flux de 10 m<sup>3</sup>/h<br/> Temps de traitement défini selon le but recherché</p>  |  |
| <p><b>Production de biogaz :</b> +30%<br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b><br/> 9,7 kW/h</p>   | <p><b>Quantité de boues à éliminer :</b> Pas de données</p>              |
| <p><b>Données économiques :</b> Pas de données</p>  |  |
| <p><b>Références :</b><br/> Pas de données</p>  |  |

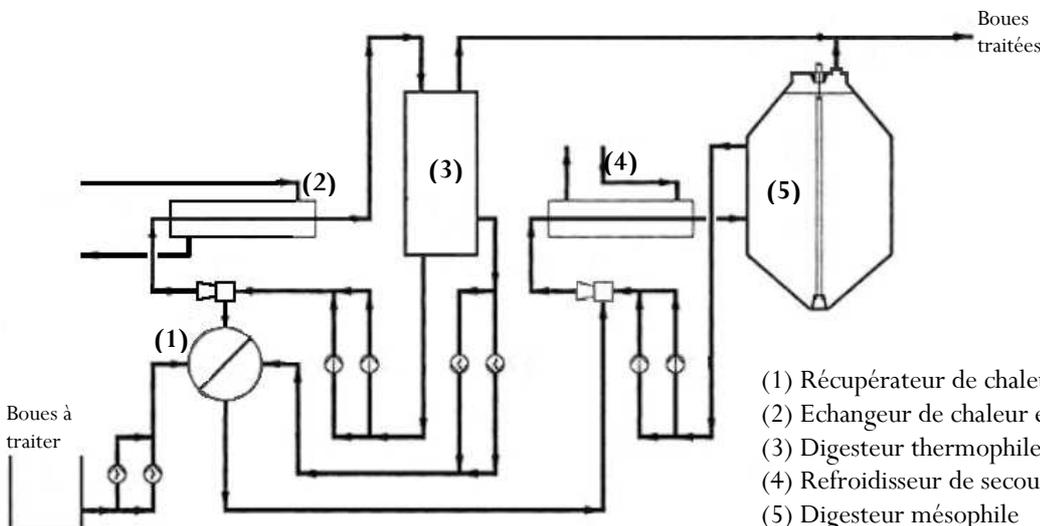
## C.8 Cambi THP

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Fabricant :</b> Cambi AS<br/> <b>Ville :</b> Asker<br/> <b>Pays :</b> Norvège</p>  | <p><b>Type de procédé :</b> Physique<br/> Hydrolyse thermique haute</p>   |
| <p><b>Description technique</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) Déshydratation et (2) stockage</li> <li>(3) Préchauffage par injection de vapeur provenant du réacteur et de la cuve de pasteurisation et mélange par pompe de re-circulation</li> <li>(4) Hydrolyse : 165°C et 8-9 bar pendant 30 min</li> <li>(5) Après une dépressurisation, pasteurisation des boues et abaissement de la température jusqu'à 100°C</li> <li>(6) Passage dans un échangeur de chaleur pour atteindre la température de digestion (35°C), puis digestion (temps de rétention : 10-12 jours)</li> </ol>  |   |
| <p><b>MS des boues entrantes :</b> 16% (après la pré-déshydratation)</p>   |   |
| <p><b>Production de biogaz :</b> +20% à +25%<br/> <b>Taux de conversion de la MO :</b> 55-60%<br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b> 18% de l'énergie produite</p>  | <p><b>MS des boues à éliminer :</b> 30% (après digestion)<br/> <b>Quantité de boues à éliminer :</b> pas de données</p> |
| <p><b>Données économiques :</b> Pour 90'000 EH<br/> Investissement : 2'300'000 €</p>   |   |
| <p><b>Références :</b> 13 installations définitives (statut 2007)<br/> Hamar (N), 1996, 90'000 EH<br/> Cherstey (UK), 1998,<br/> Dublin (IRL), 2001, 1'200'000 EH<br/> Niigata (J), 2002<br/> Brisbane (AUS), 2006<br/> Bruxelles Nord (B), 2007, 1'100'000 EH</p>   |   |

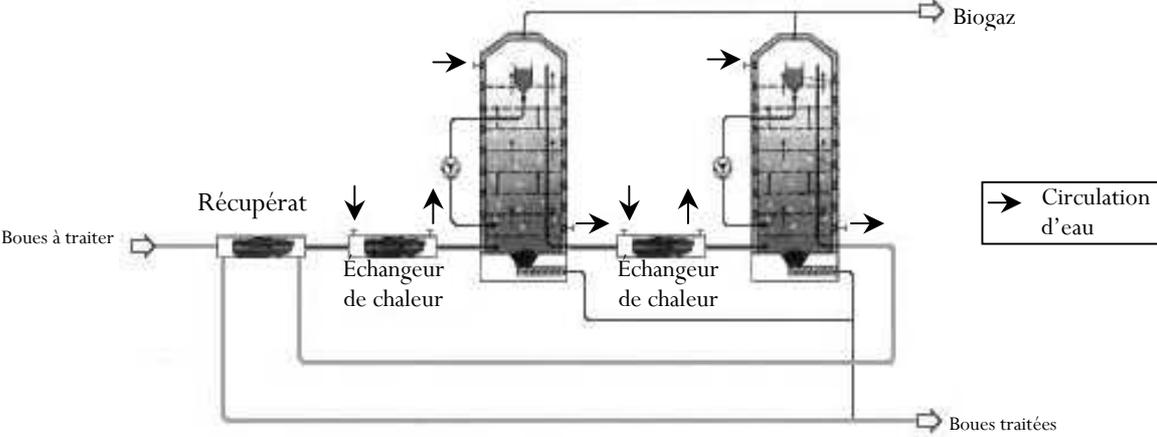
## C.9 Thélys®-Biothélys®

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Fabricant :</b> Veolia Water Solutions &amp; Technologies<br/> <b>Ville :</b> Saint Maurice<br/> <b>Pays :</b> France</p>   | <p><b>Type de procédé :</b> Physique<br/> Hydrolyse thermique haute</p> |
| <p><b>Description technique</b><br/> Hydrolyse thermique à 150°C sous pression de 10 à 15 bar par injection de vapeur (produite par cogénération) afin de solubiliser les boues.<br/> Les boues entrantes sont concentrées et déshydratées.<br/> Temps de séjour de 30 à 60 min. durée du cycle : de 150 à 200 min</p>  <p><b>MS des boues entrantes :</b> 10-20%<br/> <b>Equipement nécessaire :</b> Centrifugeur</p> |   |
| <p><b>Production de biogaz :</b> +50% à +60%<br/> <b>Taux de conversion de la MO :</b><br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b><br/> Pas de données</p>  | <p><b>Quantité de boues à éliminer :</b> Pas de données</p>             |
| <p><b>Données économiques</b><br/> Investissement : environ 1 millions d'€</p>  |   |
| <p><b>Références</b><br/> Witry-les-Reims (B), 2003, 2'500 EH<br/> Château-Gontier (F) , 2004, 38'000 EH<br/> Saumur (F), 2006, 62'000 EH</p>   |   |

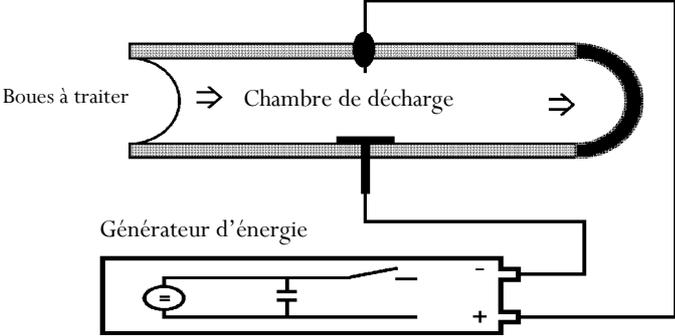
## C.10 ASTM

|   |  |
|---|--|
| <b>Fabricant :</b> Oswald Schulze GmbH & Co KG<br><b>Ville :</b> Gladbeck<br><b>Pays :</b> Allemagne  | <b>Type de procédé :</b> Physique<br>Hydrolyse thermique basse |
| <p><b>Description technique</b></p> <p>Combinaison d'une étape de digestion thermophile et d'une étape de digestion mésophile. Pré-chauffage des boues par récupération de la chaleur des boues provenant du digesteur thermophile.</p> <p><u>Étape thermophile</u> : Temps de rétention : 2-3 jours. Température 55-60°C maintenue par circulation des boues dans un échangeur de chaleur alimenté par de l'eau chaude provenant d'une chaudière ou du système de refroidissement de l'installation de co-génération. Passage des boues dans l'échangeur de chaleur.</p> <p><u>Étape mésophile</u> : Temps de rétention : 12-15 jours. Température à 35-37°C maintenue par circulation des boues dans un refroidisseur de secours</p>  <p>(1) Récupérateur de chaleur<br/>         (2) Echangeur de chaleur externe<br/>         (3) Digesteur thermophile<br/>         (4) Refroidisseur de secours<br/>         (5) Digesteur mésophile</p> |  |
| <b>Equipement nécessaire :</b> chaudière ou installation de co-génération   |  |
| <b>Production de biogaz :</b> +16,5%<br><b>Taux de conversion de la MO :</b> +60%<br><b>Consommation énergétique du procédé :</b><br>Récupération de chaleur  | <b>Quantité de boues à éliminer :</b> -10 à -15%               |
| <b>Données économiques :</b> Pas de données   |  |
| <b>Références :</b><br>Osterode (D), 1986, 50'000 EH<br>Geseke (D), 1988, 22'000 EH<br>Altenmarkt (D), 1989, 7'000 EH<br>Auenmarkt (D), 1993, 18'000 EH<br>Erkelenz (D), 1994, 25'000 EH<br>Köln-Stammheim (D), 1995, 1'270'000 EH  |  |

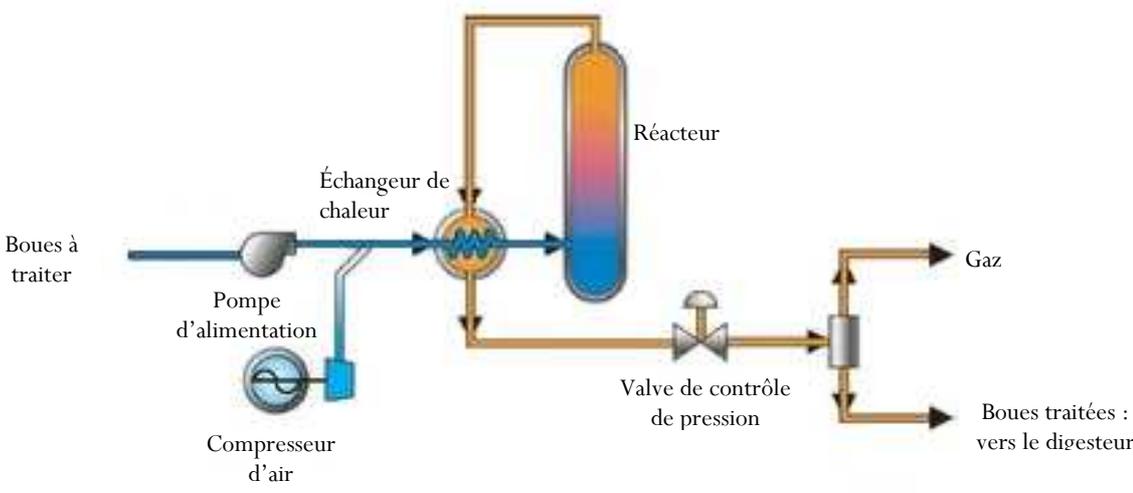
## C.11 Schwarting-Uhde Process

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Fabricant :</b> Schwarting Umwelt Gmbh<br/> <b>Ville :</b> Flensburg<br/> <b>Pays :</b> Allemagne</p>  | <p><b>Type de procédé :</b> Physique<br/> Hydrolyse thermique basse</p> |
| <p><b>Description technique</b><br/> Combinaison d'une étape de digestion mésophile et d'une étape de digestion thermophile.<br/> Étape de pré-chauffage par re-circulation des boues traitées du 2<sup>ème</sup> digesteur et par un échangeur de chaleur alimenté à l'eau chaude<br/> 1<sup>ère</sup> <u>étape mésophile</u> : Temps de rétention : 5-6 jours / Température : 37°C<br/> 2<sup>ème</sup> <u>étape thermophile</u> : Temps de rétention : 5-6 jours / Température : 55°C<br/> Le mélange s'effectue par circulation périodique ascendante ou descendante du liquide dans le digesteur. Cela crée des zones de turbulences aux voisinage de plaques perforées situées dans le digesteur</p>  <p>Le schéma illustre le processus de digestion en deux étapes. À l'entrée, les 'Boues à traiter' passent par un 'Récupérateur' et un premier 'Échangeur de chaleur'. Elles sont alors dirigées vers le premier digesteur (étape mésophile). Le liquide du premier digesteur est pompé vers un second 'Échangeur de chaleur' et un second digesteur (étape thermophile). Le liquide du second digesteur est pompé vers un troisième 'Échangeur de chaleur' et finalement vers 'Boues traitées'. Le 'Biogaz' est collecté au sommet du second digesteur. Une légende indique que les flèches noires représentent la 'Circulation d'eau'.</p> |   |
| <p><b>MS des boues entrantes :</b> 4-10%</p>   |   |
| <p><b>Production de biogaz :</b> Pas de données<br/> <b>Taux de conversion de la MO :</b> 55%<br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b><br/> Faible apport extérieur de chaleur : 342 MWh/an pour une STEP de 60'000 EH</p>  | <p><b>Quantité de boues à éliminer :</b> -36%</p>                       |
| <p><b>Données économiques :</b><br/> Investissement : 4,5 millions d'€ pour 60'000 EH<br/> (Possibilité d'inclure le digesteur thermophile pour les STEP pourvu d'un digesteur mésophile ou d'inclure le digesteur mésophile pour les STEP pourvu d'un digesteur thermophile)</p>  |   |
| <p><b>Références :</b><br/> Leonberg (D), 1994, 60'000 EH<br/> Ammersee (D), 1999, 120'000 EH<br/> Heidelberg (D), 345'000 EH<br/> Tauberbischofsheim (D), 47'000 EH</p>   |   |

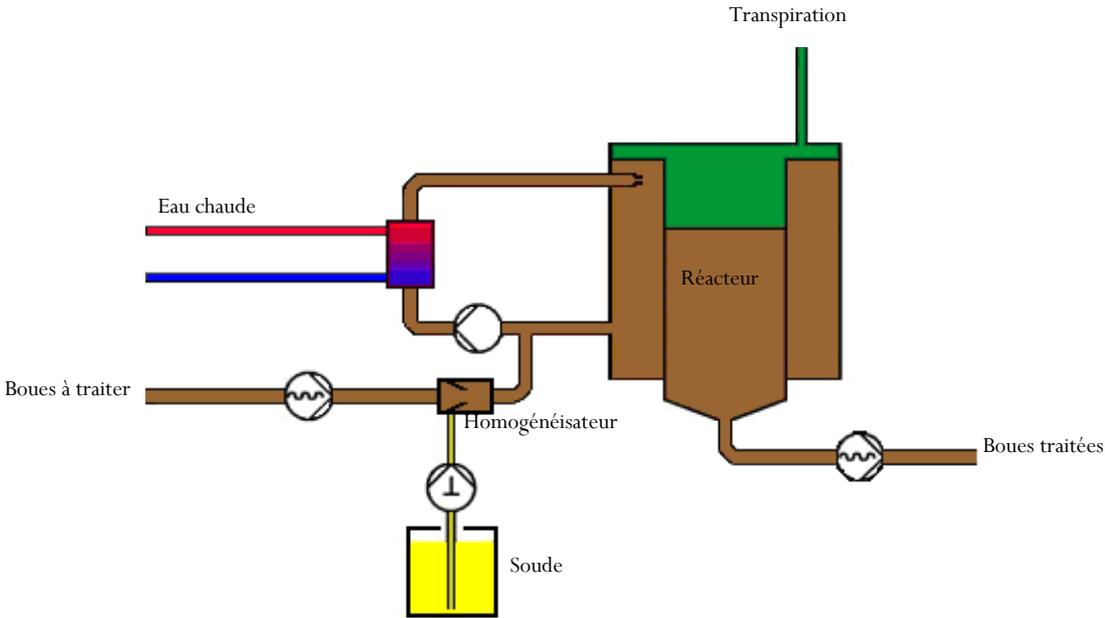
## C.12 Pulse power technology

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Développé par :</b> TZN Forschungs- und Entwicklungszentrum Unterlüss GmbH et Institut für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig<br/> <b>Ville :</b> Unterlüss-Braunschweig<br/> <b>Pays :</b> Allemagne</p>  | <p><b>Type de procédé :</b> Physique<br/> Champs électriques pulsés</p> |
| <p><b>Description technique</b></p> <p>Pulsations électriques de l'ordre du MW génèrent des ondes de choc dans un milieu solide ou liquide par l'intermédiaire de 2 électrodes immergées dans ce liquide. Grâce à la forte inertie des substances organiques dans les boues de STEP, des pulsations très courtes avec de fortes amplitudes sont employées.</p>  |   |
| <p><b>Production de biogaz :</b> + 20% à +25%<br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b><br/> Pas de données</p>  | <p><b>Quantité de boues à éliminer :</b> Pas de données</p>             |
| <p><b>Données économiques :</b> Pas de données</p>   |   |
| <p><b>Références :</b> A l'état de recherche à grande échelle</p>  |   |

## C.13 Zimpro<sup>®</sup>

|  |  |
|--|--|
| <b>Fabricant :</b> Siemens Water Technologies,<br><b>Ville :</b> Rothschild<br><b>Pays :</b> Etats-Unis  | <b>Type de procédé :</b> Chimique<br>Oxydation par l'oxygène |
| <p><b>Description technique</b></p> <p>Les boues épaissies sont broyées, portées à la pression du système (26 bar). Après injection d'air, elles sont conduites au réacteur via un échangeur de chaleur pour atteindre la température d'oxydation. En sortie de réacteur, les boues délivrent leur chaleur aux boues non traitées.</p>  <p>Optimisation de la déshydratation à pression et températures moyennes<br/>         Désintégration des cellules à hautes pressions et température</p> <p><b>MS des boues entrantes :</b> 3-6%</p> |  |
| <p><b>Production de biogaz :</b><br/>         +14% pour les boues mixtes<br/>         + 60% à +70% pour les boues secondaires</p> <p><b>Consommation énergétique du procédé :</b><br/>         Autosuffisances thermique et électrique</p>   | <p><b>Quantité de boues à éliminer :</b> -28%</p>            |
| <p><b>Données économiques :</b> Pas de données</p>   |  |
| <p><b>Références :</b> à l'état de recherche à grande échelle<br/>         San Mateo (USA)<br/>         Green Bay (USA)<br/>         Wausau (USA)</p>  |  |

## C.14 Pondus process

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Fabricant :</b> Pondus Verfahrenstechnik Gmbh<br/> <b>Ville :</b> Teltow<br/> <b>Pays :</b> Allemagne</p>   | <p><b>Type de procédé :</b> Physique et chimique<br/> Hydrolyse thermique et basique</p> |
| <p><b>Description technique</b></p> <p>Les boues sont tout d'abord fragilisées par l'apport d'une petite quantité de soude, puis chauffées à une température de 60-70°C grâce à un échangeur de chaleur approvisionné par de l'eau chaude à 90°C provenant par exemple d'un centrale thermique des environs. Le but du procédé est de parvenir à une lyse cellulaire très importante. Temps de séjour dans le réacteur : 2 heures à pression ambiante</p>  |  |
| <p><b>Production de biogaz :</b> +30%<br/> <b>Consommation énergétique du procédé :</b><br/> 1,5 kWh/m<sup>3</sup><sub>boue</sub> d'électricité<br/> 50 kWh/m<sup>3</sup><sub>boue</sub> de chaleur (sans récupération)</p>   | <p><b>Quantité de boues à éliminer :</b> Pas de données</p>                              |
| <p><b>Données économiques :</b> Pas de données</p>  |  |
| <p><b>Références :</b> à l'état de recherche à grande échelle<br/> Gifhorn (D), 2005<br/> Wassmannsdorf (D), 1'412'000 EH</p>   |  |

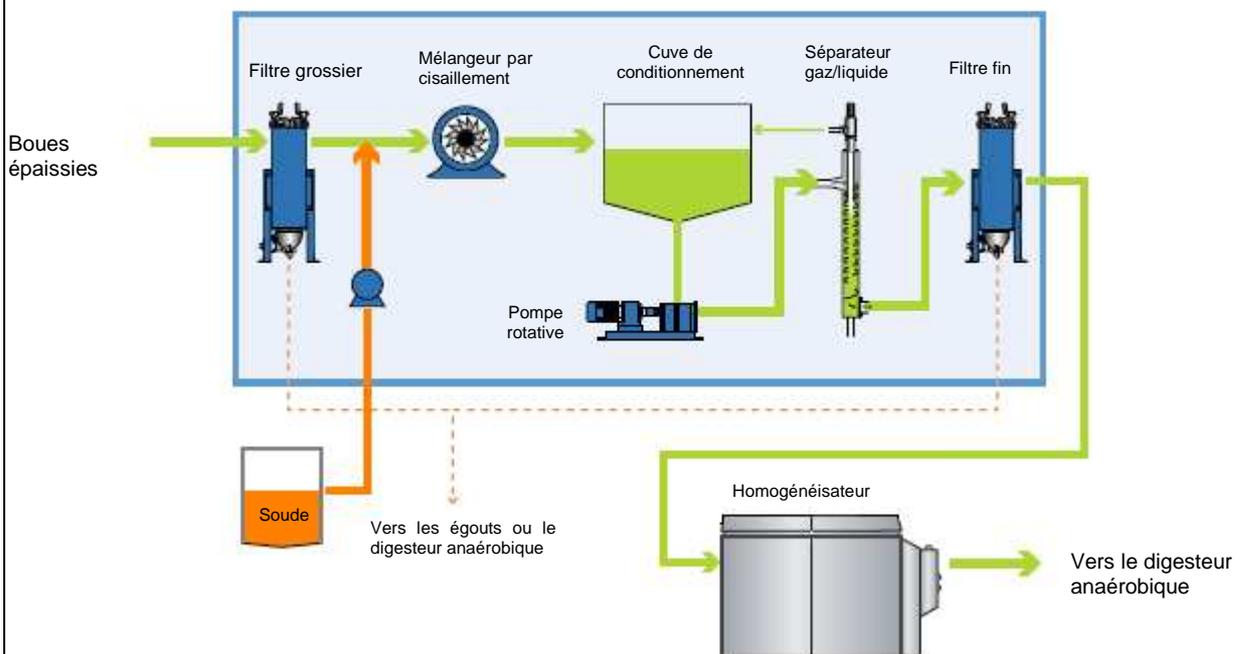
## C.15 Microsludge™

**Fabricant :** Paradigm Environmental Technologies Inc.  
**Ville :** Vancouver  
**Pays :** Canada

**Type de procédé :** Mécanique-chimique  
 Homogénéisateur à haute pression couplé à un traitement à la soude

### Description technique :

Utilisation de soude pour affaiblir les membranes des cellules microbiennes et d'un homogénéisateur sous haute pression pour éclater les cellules et liquéfier les boues activées excédentaires.



**MS des boues entrantes :** 5-10%

**Équipement nécessaire :** épaisseur

**Production de biogaz :** +71%  
**Taux de conversion de la MO :** 95% de la  $MO_{\text{boues secondaires}}$  et 77,5% de la  $MO_{\text{boues totales}}$   
**Consommation énergétique du procédé :** 472 000 kWh/t de MS

**Quantité de boues à éliminer :** - 59%

**Données économiques** (pour une population de 1 million d'hab.)

Investissement : 2 millions USD

Coûts d'exploitation : 1'090'000 USD

### Références :

Vancouver, 2004

Los Angeles, 2005, 3.2 millions d'EH

## D L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES PROCEDES

L'impact des procédés de pré-traitement sur les boues primaires est pratiquement négligeable, celles-ci étant généralement facilement dégradables. L'efficacité des procédés de pré-traitement se mesure en particulier par leur action sur la destruction des cellules des boues secondaires, plus difficilement dégradables.

Après l'introduction d'un procédé de désintégration dans une station d'épuration, il faut compter une certaine période de fonctionnement avant de pouvoir constater une amélioration dans les mesures. Les résultats tendent en effet à s'améliorer avec la durée d'utilisation. Comme la période probatoire idéale varie selon les procédés, on admet généralement, pour optimiser la fiabilité des résultats, un temps de fonctionnement de douze mois réparti en trois mois de rodage et neuf mois d'exploitation.

Les procédés commercialisés se présentent le plus souvent sous forme de modules d'unités de système représentant des classes d'équivalent habitant. Il est donc possible de choisir – jusqu'à certaine mesure – un module correspondant à la taille de sa station d'épuration.

### D.1 La teneur en matière sèche

La teneur en matière sèche des boues a une influence capitale sur la consommation en énergie tout au long des étapes du traitement des boues. Une teneur en matière sèche élevée permet la baisse du volume et de la quantité des boues à traiter, engendrant un gain d'énergie électrique et thermique.

La teneur en matière sèche maximale varie en fonction des étapes du traitement des boues (conditionnement, digestion, déshydratation, etc.) et selon les moyens et équipements utilisés. Un seuil technique limite doit cependant être respecté pour chaque étape.

Etant donné que l'intérêt de la désintégration en ce qui concerne la MS est son impact sur la siccité des boues à éliminer, les mesures intermédiaires de la MS des différentes étapes ne sont pas retranscrites. Ce paragraphe traite de la teneur en MS avant la désintégration, les paragraphes D4 et D5 traitent de la siccité à la fin du processus de traitement des boues.

A l'entrée du système, les différents procédés de pré-traitement tolèrent des teneurs en matière sèche des boues qui sont variables, comme l'illustre le tableau D.1. La teneur en MS des boues non pré-traitées est de 4-5% avant la digestion. L'augmentation du taux de MS s'obtient souvent par un épaissement primaire préalable. A noter qu'à moins qu'il ne soit statique, l'épaissement utilise une certaine quantité d'énergie. Pour certains procédés commercialisés, le dispositif d'épaissement des boues est inclus dans l'équipement.

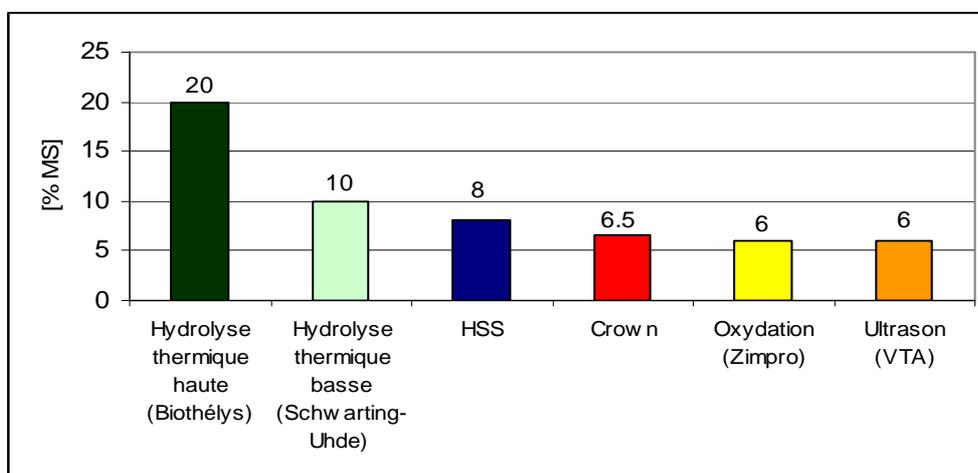
Tableau D.1 : MS des boues avant pré-traitement selon les classes de désintégration [5]

| Classe de désintégration         | MS (%) |
|----------------------------------|--------|
| Centrifugeuse lytique            | 3-12   |
| Homogénéisateur à ultrasons      | 3-8    |
| Homogénéisateur à haute pression | 6      |
| Pulvérisateur à débit continu    | 3-8    |
| Procédés mixtes thermo-chimiques | 3-8    |

## Les résultats

Les procédés de pré-traitement disponibles dans le commerce affichent un taux maximum de matière sèche avant désintégration légèrement supérieur à la moyenne des classes de procédés du tableau ci-dessus, comme l'illustre le graphique D.1 suivant :

Graphique D.1 : MS maximum des boues avant pré-traitement



L'hydrolyse thermique est la classe de procédés qui exige le taux de matière sèche le plus élevé. Une déshydratation préalable avant le pré-traitement est souvent nécessaire. Dans le cas de l'hydrolyse thermique haute; pour le procédé Biothélys, la siccité requise des boues entrantes est de 10-20%, pour le procédé Cambi, elle est de 16%. Ce phénomène s'explique par le fait que l'hydrolyse augmente la viscosité des boues. Elles deviennent plus fluides et peuvent ainsi alimenter le digesteur avec une siccité plus élevée que la teneur habituelle.

Les procédés d'hydrolyse thermique basse Schwarking-Uhde et mécanique HSS tolèrent des taux de matière sèche maximums respectifs de 10% et de 8%.

## D.2 L'input énergétique nécessaire

La consommation en énergie varie selon les catégories de procédés. Le tableau D.2 donne les consommations moyennes des différentes classes de désintégration. La désintégration thermique est la plus gourmande en énergie du fait que le traitement dure plus longtemps et qu'il faut par conséquent des réacteurs plus grands [16].

Tableau D.2: Consommation énergétique des classes de désintégration [5]

| Classe de désintégration         | Consommation énergétique  |
|----------------------------------|---|
| Centrifugeuse lytique            | 0.02-0,07 kWh/kg <sub>MS</sub>  |
| Homogénéisateur à ultrasons      | 0.1 kWh/kg <sub>MS</sub>  |
| Homogénéisateur à haute pression | $P_{\text{spec}} [\text{kWh/kg}_{\text{MS}}] = 0.036 \cdot p_{\text{homog}}^1 [\text{bar}] / \text{MS} [\text{kg/m}^3]$ |
| Pulvérisateur à débit continu    | 0.25 kWh/kg <sub>MS</sub>   |
| Procédés thermo-chimiques        | 20-30 W/kg <sub>MS</sub>  |

<sup>1</sup> Pression de travail de l'homogénéisateur

## Les résultats

Peu d'informations ont été fournies sur la consommation énergétique des différents procédés. Celle-ci est fortement influencée par plusieurs autres facteurs. Le tableau D.3 donne la consommation énergétique de quelques procédés se trouvant sur le commerce.

Tableau D.3 : Consommation énergétique de procédés commercialisés

| Procédé         | Méthode   | Classe   | Consommation                                  |
|-----------------|-----------|--|---|
| Lysatec process | mécanique | Centrifugeuse lytique                                  | 0.75 - 1.1 kWh/m <sup>3</sup> <sub>boue</sub> |
| Crown®          | mécanique | Homogénéisateur spécifique                             | 0.9 - 2 kWh/m <sup>3</sup> <sub>boue</sub>    |
| Pondus          | mixte     | Hydrolyse thermique et basique                         | 1.5 kWh/m <sup>3</sup> <sub>boue</sub>        |
| VTA-GSD         | mécanique | Homogénéisateur à ultrasons                            | 3.7 % de l'électricité produite               |
| Microsludge™    | mixte     | Homogénéisateur à haute pression et traitement basique | 7.1 % de l'énergie produite                   |
| Cambi           | physique  | Hydrolyse thermique haute                              | 18 % de l'énergie produite                    |

La centrifugeuse lytique du fabricant Lysatec GmbH a la plus faible consommation d'énergie. Les deux autres procédés mécaniques Crown® et VTA-GSD affichent aussi une consommation énergétique modérée.

Les procédés Pondus et Microsludge™ - qui tout deux ont une composante chimique – ont une consommation énergétique qui équivaut à plus de 50% de la consommation des procédés exclusivement mécaniques.

L'hydrolyse thermique haute du fabricant Cambi est près de 2.5 fois plus gourmande que le procédé mixte Microsludge™.

## **D.3 Contribution à l'amélioration de la productivité en biogaz**

La destruction des membranes cellulaires obtenue par la désintégration augmente le taux de dégradation de la matière organique. Il en résulte une hausse de la production de biogaz. On admet que le taux de dégradation de la matière organique est proportionnel à celui de production de biogaz [1]. Ce dernier se situe entre 30-40% pour les boues non pré-traitées, et de 10-30 points supérieurs pour les boues pré-traitées.

Les procédés de pré-traitement permettent ainsi une accélération de la vitesse de digestion. Pour les boues non pré-traitées le temps de séjour moyen dans le digesteur est de 20 jours. Avec pré-traitement, la durée de séjour peut être réduit à 10-12 jours pour les hydrolyses thermiques.

## Les résultats

L'augmentation de la production de biogaz des différents procédés est retranscrite dans le tableau D.4 ci-dessous. Les résultats correspondent à la digestion de boues mixtes (primaires et secondaires).

Tableau D.4 : Amélioration de la production de biogaz selon les procédés commercialisés

| Procédé                        | Méthode                | Classe   | Amélioration |
|--------------------------------|------------------------|--|--------------|
| Lysatec process                | Mécanique              | Centrifugeuse lytique                                  | +15-26%      |
| Bellmer Desint.BD / Sonotronic | Mécanique              | Homogénéisateur à ultrasons                            | +20-35%      |
| DMS                            | Mécanique              | Homogénéisateur à ultrasons                            | +13%         |
| Sonix™                         | Mécanique              | Homogénéisateur à ultrasons                            | +20-25%      |
| VTA-GSD                        | Mécanique              | Homogénéisateur à ultrasons                            | +11-33%      |
| Crown®                         | Mécanique              | Crown  | >30%         |
| HSS                            | Mécanique              | HSS  | +30%         |
| ASTM                           | Physique               | Hydrolyse thermique basse                              | +16.5%       |
| Pondus process                 | Physique               | Champs électriques pulsés                              | +30%         |
| Pulse Power Tech.              | Mixte : phys. et chim. | Hydrolyse thermique et basique                         | +20-25%      |
| Cambi                          | Physique               | Hydrolyse thermique haute                              | +20-25%      |
| Microsludge™                   | Mixte : méca. et chim. | Homogénéisateur à haute pression et traitement basique | +72%         |
| Zimpro®                        | Chimique               | Oxydation par l'oxygène                                | +14%         |

Microsludge™ est de loin le procédé le plus performant, avec une augmentation de la production de biogaz de plus de 70%. Ce résultat est jusqu'à cinq fois supérieur à celui des procédés les moins performants. L'augmentation moyenne du taux de biogaz du tableau est de 20-30%. Les procédés mécaniques Crown® et Bellmer/Sonotronic sont les seuls à également dépasser le seuil des 30%.

L'homogénéisateur à ultrasons DMS a le moins bon résultat de sa classe ainsi que de l'ensemble des procédés de désintégration du tableau. A noter que les performances des procédés de cette classe varient considérablement. Les compétences techniques du fabricant ont donc une importance accrue. Il n'existe sinon pas de différences marquantes entre les classes de procédé, à l'exception peut-être de l'oxydation chimique par oxygène, qui semble être un peu moins efficace que la moyenne.

#### **D.4 Impacts sur l'amélioration de la déshydratation des boues**

La déshydratation correspond à la diminution de la teneur en eau en d'autre terme une hausse de la siccité. Après déshydratation, le taux de matière sèche des boues se situe entre 28-40% pour les boues non traitées, suivant le mode de déshydratation employé. La déshydratation peut être suivi d'un séchage thermique permettant d'atteindre une valeur de matière sèche s'élevant jusqu'à 95%.

Les principales méthodes utilisées sont énumérées dans le tableau ci-dessous. Les taux de matière sèche donnés correspondent aux taux optimaux pouvant être obtenus avec ces procédés.

Tableau D.5 : Principaux modes de déshydratation et leur consommation en électricité [5]

| Mode de déshydratation | MS (%) | Consommation électrique (kWh/m <sup>3</sup> BD) |
|------------------------|--------|---|
| Centrifugeuse          | 28     | 45  |
| Filtre à bandes        | 30     | 22.5  |
| Centripresse           | 33     | 55  |
| Filtre-presse          | 38     | 47.5  |
| Filtre à membrane      | 40     | 70  |

L'efficacité d'un mode de déshydratation est fortement en corrélation avec sa consommation en énergie. En règle générale, une augmentation de l'input énergétique résulte en un taux plus élevé de matière sèche des boues digérées.

Les procédés de désintégration améliorent la déshydratation par :

- la réduction de la structure en floc des boues,
  - la destruction des membranes cellulaires des microorganismes,
- qui ont pour action la diminution de la taille des particules.

L'amélioration de la déshydratation des boues se mesure par thermo-gravimétrie après déshydratation des boues. Comme mentionné dans le paragraphe D.2, les procédés fonctionnant avec des boues brutes à siccité élevée accroissent leur bilan final de déshydratation.

A noter que la réduction de la quantité des boues résiduelles (V. § D.5) donne aussi des indications sur l'amélioration de la déshydratation des boues. Cette méthode est même la plus employée dans la pratique, les mesures par thermo-gravimétrie étant plutôt rares.

### **Les résultats**

Peu de constructeurs de procédés de pré-traitement et d'exploitants de stations d'épuration mesurent le paramètre "amélioration de la capacité de déshydratation" au moyen de la thermo-gravimétrie. Ceux-ci préfèrent celui de la réduction de la quantité de boues.

Dans notre échantillon, les valeurs oscillent entre 1.2% et 2.6%. Le procédé Sonix™ donne une amélioration de +1.2-2.6% et Lysatec process de +1.8%.

## **D.5 Impacts sur la réduction des quantités de boues résiduelles**

Par la diminution de la teneur en eau, la déshydratation permet également une baisse de la quantité des boues, rationalisant ainsi les opérations ultérieures. Les quantités transportées sont réduites, le transport des boues facilité, ce qui mène à une économie d'énergie.

La hausse de la dégradation de la matière organique volatile induit par le processus de désintégration mène à une diminution plus ou moins proportionnelle du volume des boues à éliminer si les méthodes et paramètres du traitement des boues restent inchangés.

## Les résultats

Tableau D.6 : Diminution de la quantité de boues à éliminer

| Procédé              | Méthode                | Classe   | Diminution |
|----------------------|------------------------|--|------------|
| Bellmer /Sonotronic  | Mécanique              | Homogénéisateur à ultrasons                            | -10 à -20% |
| VTA-GSD              | Mécanique              | Homogénéisateur à ultrasons                            | -14 à -18% |
| Crown®               | Mécanique              | Homogénéisateur spécifique                             | -20%       |
| Biothélys® / Thélys® | Physique               | Hydrolyse thermique haute                              | -50 à -60% |
| Cambi                | Physique               | Hydrolyse thermique haute                              | -50%       |
| ASTM                 | Physique               | Hydrolyse thermique basse                              | -10 à -15% |
| Schwarting-Uhde      | Physique               | Hydrolyse thermique basse                              | -44%       |
| Microsludge™         | Mixte : méca. et chim. | Homogénéisateur à haute pression et traitement basique | -59%       |
| Zimpro®              | Chimique               | Oxydation par l'oxygène                                | -28%       |

Le procédé Microsludge™ est le plus efficace concernant la diminution de la quantité de boues résiduelles. Suivent les deux procédés d'hydrolyse thermique haute Cambi et Thélys®/Biothélys® avec des résultats supérieurs à -50%. Les procédés mécaniques sont assez homogènes dans leurs effets, les baisses de production de boues varient entre 10 et 20%. En revanche, les résultats des hydrolyses thermiques sont très hétérogènes et sont donc fortement influencés par la qualité du procédé commercialisé.

### **D.6 Synthèse**

- Les méthodes fortement consommatrices d'énergie présentent des résultats plus performants, c'est le cas en particulier de l'hydrolyse thermique.
- L'augmentation moyenne de la production de biogaz lors de la digestion des boues pré-traitées se situe entre 20 et 30%.
- Il existe une relation entre la hausse de la quantité de biogaz et la baisse de la quantité de boues résiduelles, sauf pour le procédé ASTM.
- Les procédés mixtes tels que Pondus process et Microsludge™ montrent de bons résultats dans tous les critères.
- L'âge de développement du procédé n'a pas d'influence majeure sur les résultats. Les résultats des nouveaux procédés (développés après 2000) sont assez similaires à ceux des plus anciens.

## **E.1 Les investissements et coûts d'exploitation nécessaires**

### **Les investissements**

Les investissements liés aux procédés de pré-traitement comprennent généralement les coûts suivants [3] :

- L'achat de l'équipement du pré-traitement
- Les connexions nécessaires à l'appareil (canalisation, ligne électrique)
- Les dispositifs pour séparer les éléments indésirables des boues à traiter
- etc.

Certains coûts d'investissement peuvent être spécifiques à certains procédés. Citons par exemple:

- L'installation d'un dispositif d'épaississement des boues
- L'adaptation du digesteur existant au procédé (agrandissement, etc.)

Les coûts d'investissement pour l'installation des procédés diminuent avec l'augmentation de la taille de la STEP.

### **Les coûts d'exploitation**

Les coûts d'exploitation sont directement liés au fonctionnement de la station d'épuration. L'acquisition d'un processus de pré-traitement dans une STEP engendre des coûts d'exploitation supplémentaires. Ceux-ci comprennent :

- l'énergie
- la maintenance
- l'entretien du matériel
- la réparation
- le personnel

Les coûts d'exploitation sont très variables pour chaque procédé. Il n'existe pas de données concernant les coûts d'exploitation spécifiques aux procédés, ceux-ci étant englobés dans l'ensemble des coûts d'exploitation de la STEP.

Les coûts d'exploitation sont très caractéristiques selon les STEP. Ils sont influencés par différents facteurs tels que la taille de la STEP, son degré d'entretien (minimal/maximal), sa charge moyenne, ou encore son nombre d'heures d'exploitation. Les coûts d'exploitation sont également fortement liés au montant des investissements engagés dans la STEP.

Il est par conséquent très difficile de comparer ou de généraliser ce genre de coûts. Pour les besoins de l'étude, les coûts d'exploitation moyens suivants ont été tout de même admis pour l'ensemble de la STEP :

Tableau E.1 : Coûts d'exploitation moyens des STEP suisses

| Taille de la STEP (EH) | Coûts (Fr/an) |
|------------------------|---------------|
| 10'000                 | 580'000       |
| 20'000                 | 1'000'000     |
| 50'000                 | 1'500'000     |

Les coûts énergétiques :

Le coût de l'électricité est en moyenne de 19ct /kWh pour les STEP suisses. Les STEP pratiquant la digestion anaérobie peuvent normalement s'auto-provisionner en énergie thermique. La consommation spécifique des méthodes de désintégration est très variable. Dans le chapitre D.1, la consommation spécifique de certains procédés a été donnée.

Les charges de personnel :

Les charges de personnel imputées aux procédés de pré-traitement des boues sont estimées comme suit :

Tableau E.2 : Les charges de personnel selon les classes de procédés [5]

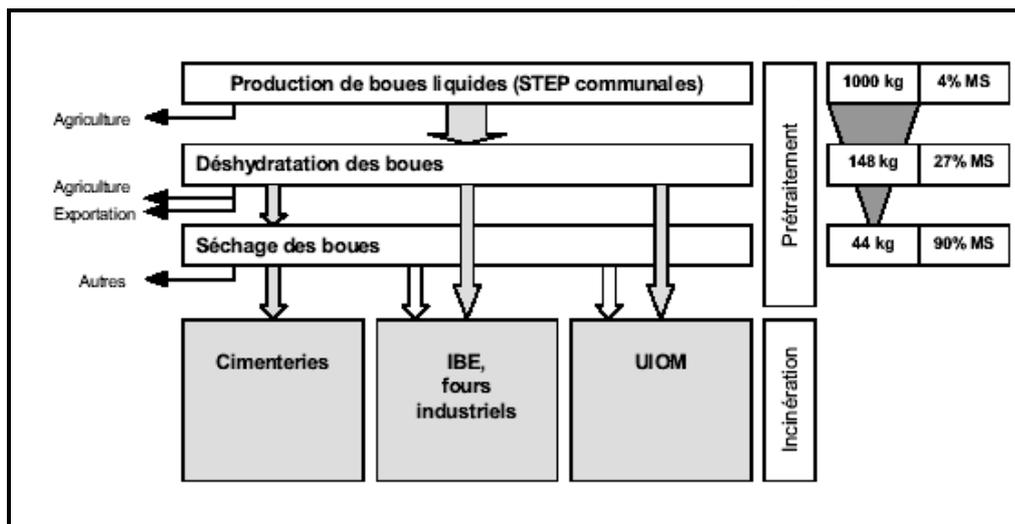
| Classe de désintégration         | unité       |
|----------------------------------|-------------|
| Centrifugeuse lytique            | aucun       |
| Homogénéisateur à ultrasons      | 50-100 h/an |
| Homogénéisateur à haute pression | 180 h/an    |
| Pulvérisateur à débit continu    | 50-100 h/an |
| Procédés mixtes thermo-chimiques | 50-100 h/an |

## E.2 L'élimination des boues

Depuis le 1<sup>er</sup> octobre 2006, l'épandage des boues d'épuration sur les terres agricoles est interdit. Les boues doivent être éliminées dans des installations d'incinération des boues (IBE), des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) ou des cimenteries.

Les procédés thermiques d'élimination des boues d'épuration exigent une déshydratation mécanique préalable. Pour leur incinération en cimenterie, les boues doivent impérativement être séchées jusqu'à atteindre une teneur en MS d'au moins 90%. Dans une certaine mesure les boues séchées peuvent aussi être incinérées dans une UIOM ou une IBE (illustration E.1).

Illustration E.1 : Filière d'élimination des boues en Suisse [10]



Les STEP suisses produisent chaque année 200'000 tonnes de MS contenues dans les boues d'épuration. Les coûts d'élimination des boues se situent entre fr. 608.- et fr. 802.- y compris le transport jusqu'à l'installation finale. Un facteur important des coûts est le degré de déshydratation des boues qui diminue la quantité de boues à transporter.

Un degré de déshydratation plus élevé diminue la quantité de boues à transporter. Certaines installations finales fixent les prix d'élimination des boues en fonction de leurs taux de déshydratation.

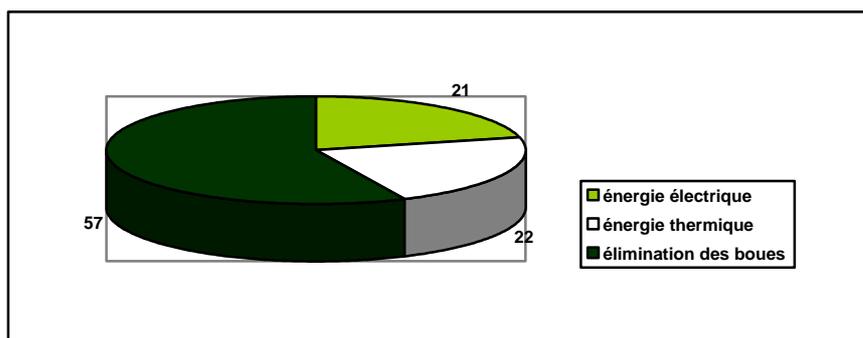
Tableau E.3 : Coûts moyens d'élimination des boues [10]

| Filière d'élimination | Coûts moyens (Fr./t <sub>MS</sub> ) |
|-----------------------|-------------------------------------|
| IBE                   | 752                                 |
| UIOM                  | 802                                 |
| Séchage/cimenterie    | 608                                 |

### E.3 Les recettes

Les coûts d'exploitation additionnels provoqués par le procédé de désintégration devraient pouvoir être compensés par une hausse des recettes additionnelles pour garantir la rentabilité de l'achat. Ces recettes proviennent essentiellement de la diminution de la quantité de boues à évacuer et de la hausse de la production de biogaz (énergie thermique et électrique) dans une moindre mesure. Elles sont réparties comme suit :

Graphique E.1 : Répartition des bénéfices provenant de la désintégration [18]



Pour en revenir à cette étude, les coûts économiques des procédés commercialisés sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau E.4 : Les coûts des procédés commercialisés [10]

| Procédé                                     | Taille des STEP (EH) | Mise en service | Investissement (€)     | Coûts d'exploitation (€/an) | Retour sur investissement (an) |
|---|----------------------|-----------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Bellmer/Sonotronic                          | 230'000              | 2004            | 220'000                | 20'000                      |                                |
| Biothelys <sup>®</sup> /Thelys <sup>®</sup> | 50'000               | 2004            | 1'200'000 <sup>1</sup> |                             |                                |
| Cambi                                       | 90'000               | 1997            | 2'300'000              |                             |                                |
| Crown <sup>®</sup>                          | 25'000               | 2004            | 170'000                | 2'500                       |                                |
|   | 30'000               | 2005            | 180'000                | 7'200                       |                                |
|   | 50'000               | 2002            | 100'000                | 2'000                       |                                |
| Lysatec process                             | 70'000               | 2001            | 35'000                 | 7'700                       | 1.4                            |
| Microsludge <sup>™</sup>                    | 1'000'000            | 2005            | 1'467'000              | 800'000                     |                                |
| Schwarting-Uhde                             | 60'000               | 1994            | 4'500'000              |                             |                                |
| VTA-GSD                                     | 120'000              | 2003            | 193'300                | 9'500                       | 3.5                            |
|   | 7'000                | 2006            | 93'750                 |                             |                                |

Vu la variabilité des investissements, des coûts d'exploitation des procédés et la diversité des STEP, il convient, pour le calcul des coûts économiques, de faire un bilan au cas par cas pour chaque STEP. Le tableau suivant donne un exemple de calcul de bilan.

### Exemple d'un calcul de coûts associés à un procédé

Procédé VTA-GSD pour une STEP de 120'000 EH :

Tableau E.5 : Bilan économique du procédé VTA-GSD pour une STEP de 120'000 EH

| Bilan   | Coûts                            | Recettes              |
|---|----------------------------------|-----------------------|
| Consommation d'électricité du procédé à ultrasons     | 245 kWh/j resp.<br>90'000 kWh/an |                       |
| Production d'électricité sans le procédé VTA-GSD      |                                  | 2'053'000 kWh/an      |
| Production d'électricité avec le procédé VTA-GSD      |                                  | 2'422'500 kWh/an      |
| <b>Gain</b>   |                                  | <b>369'500 kWh/an</b> |
| Consommation annuelle de courant                      | 4'000 €                          |                       |
| Contrat de maintenance et de remplacement du matériel | 4'500 €                          |                       |
| Coûts du personnel (25h/an)                           | 1'000 €                          |                       |
| Gain de la production d'énergie                       |                                  | 26'600 €/an           |
| Réduction de la quantité de boues à éliminer          |                                  | 25'500 €/an           |
| Economies sur l'achat de polymères                    |                                  | 8'000 €/an            |
| <b>Total des coûts d'exploitation</b>                 | <b>9'500 €/an</b>                |                       |
| <b>Total des économies</b>                            |                                  | <b>60'100 €/an</b>    |

<sup>1</sup> Digesteur inclus

## **E.4 Synthèse**

Aucune conclusion ne peut être faite sur les coûts économiques des procédés du fait entre autre que les coûts d'investissement et d'exploitation des procédés sont très spécifiques à chaque STEP. De plus, le nombre restreint de références d'installations ne permet pas de tirer quelque conclusion que ce soit.

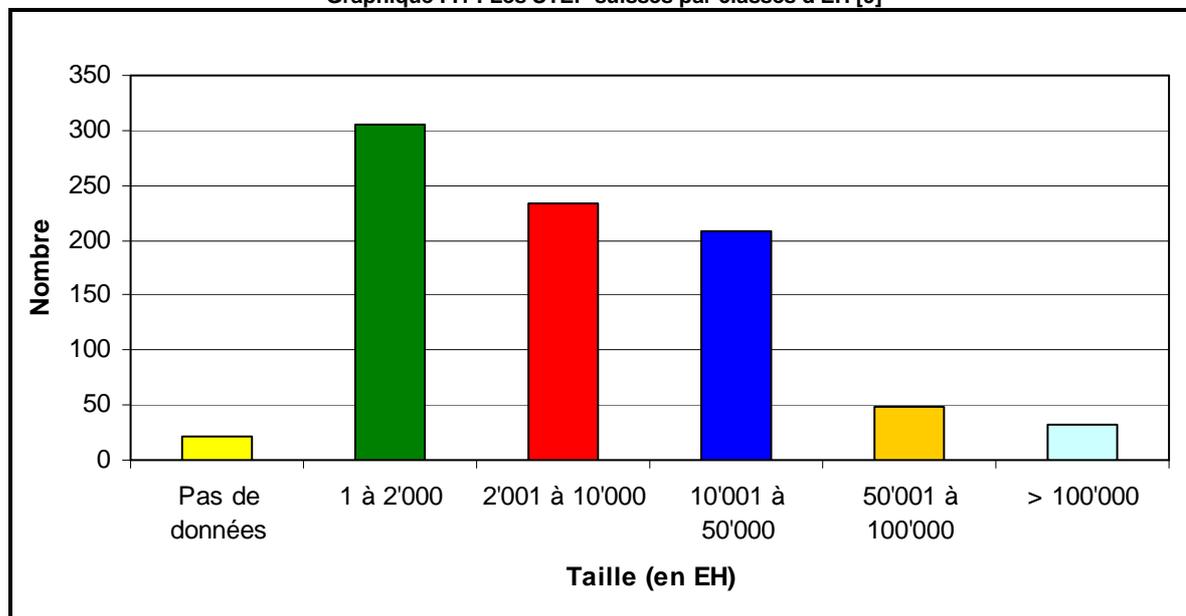
## F LES POSSIBILITES D'APPLICATION DES PROCEDES DANS LES STEP DE SUISSE

### F.1 Le parc suisse des stations d'épuration

#### F.1.1 La taille des STEP

En 2002 le nombre de STEP en Suisse s'élevait à 849. Parmi celles-ci 306 (36%) avaient un nombre d'EH inférieur à 2000, 233 (27%) avaient une taille comprise entre 2'001 et 10'000, 209 (25%) entre 10'001 et 50'00, 48 (6%) entre 50'001 à 100'000 et 32 (3.8%) étaient supérieures à 100'000 EH (graphique F.1), les données des 41 STEP restantes n'étaient pas disponibles. La taille moyenne des STEP était de 20'035 EH.

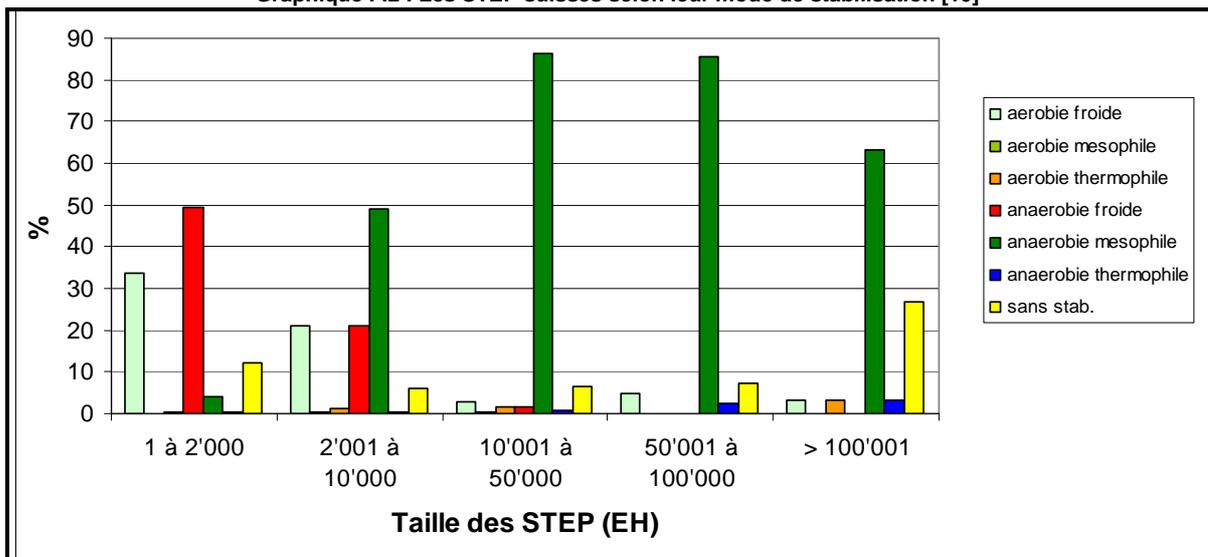
Graphique F.1 : Les STEP suisses par classes d'EH [9]



#### F.1.2 Le mode de stabilisation

577 STEP suisses pratiquent la digestion anaérobie, soit 68% de l'ensemble des STEP. 21% ont un mode de stabilisation aérobie, parmi lesquelles la plupart des petites STEP de moins de 10'000 EH. 11 % des STEP ne pratiquent pas de stabilisation, en majorité les grandes STEP de plus de 100'000 EH (graphique F.2)

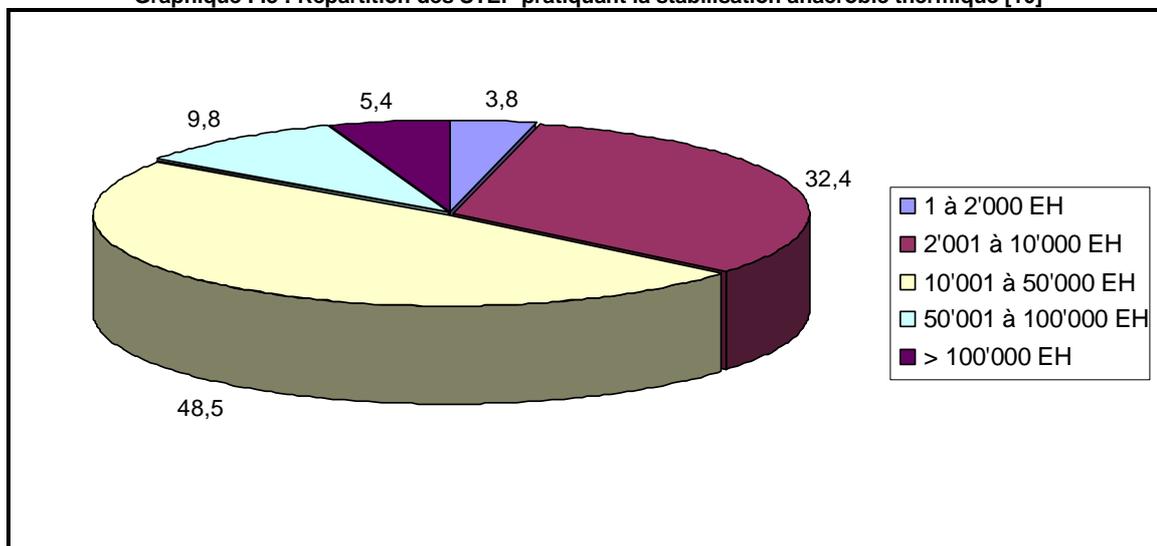
Graphique F.2 : Les STEP suisses selon leur mode de stabilisation [10]



### F.1.3 La stabilisation anaérobie thermique

Parmi les STEP pratiquant la digestion anaérobie, 368 stabilisent par voie anaérobie thermique (mésophile ou thermophile). La digestion mésophile représente le 98% de la stabilisation anaérobie thermique. La digestion anaérobie mésophile est surtout pratiquée dans la catégorie des STEP de 2'000 à 50'000 EH (graphique F.3).

Graphique F.3 : Répartition des STEP pratiquant la stabilisation anaérobie thermique [10]



### F.1.4 La répartition géographique

Le tableau F.1 énumère les 10 plus grandes STEP suisses. Celles-ci se situent à proximité des grandes villes du pays, à l'exception des stations valaisannes de Visp et de Monthey qui desservent leurs zones industrielles respectives. Une carte géographique de la Suisse avec la localisation des principales STEP se trouve en annexe 8 du document. La digestion thermique n'est pratiquée que dans la moitié des plus grandes stations d'épuration du pays, l'autre moitié ne pratique pas de stabilisation.

Tableau F.1 : Les 10 plus grandes STEP suisses et leurs modes de stabilisation

|    | Nom                   | Canton | Taille (en EH) | Stabilisation       |
|----|-----------------------|--------|----------------|---------------------|
| 1  | Aïre                  | GE     | 728'333        | Anaérobie mésophile |
| 2  | Herrenschwanden-Berne | BE     | 500'000        | Anaérobie mésophile |
| 3  | Zürich                | ZH     | 495'333        | Anaérobie mésophile |
| 4  | Bâle                  | BS     | 480'000        | Sans stabilisation  |
| 5  | Lausanne              | VD     | 466'667        | Sans stabilisation  |
| 6  | Viège                 | VS     | 388'850        | Sans stabilisation  |
| 7  | Monthey               | VS     | 373'333        | Sans stabilisation  |
| 8  | Emmen                 | LU     | 350'000        | Anaérobie mésophile |
| 9  | Pratteln              | BL     | 319'333        | Sans stabilisation  |
| 10 | Worblaufen            | BE     | 250'000        | Anaérobie mésophile |

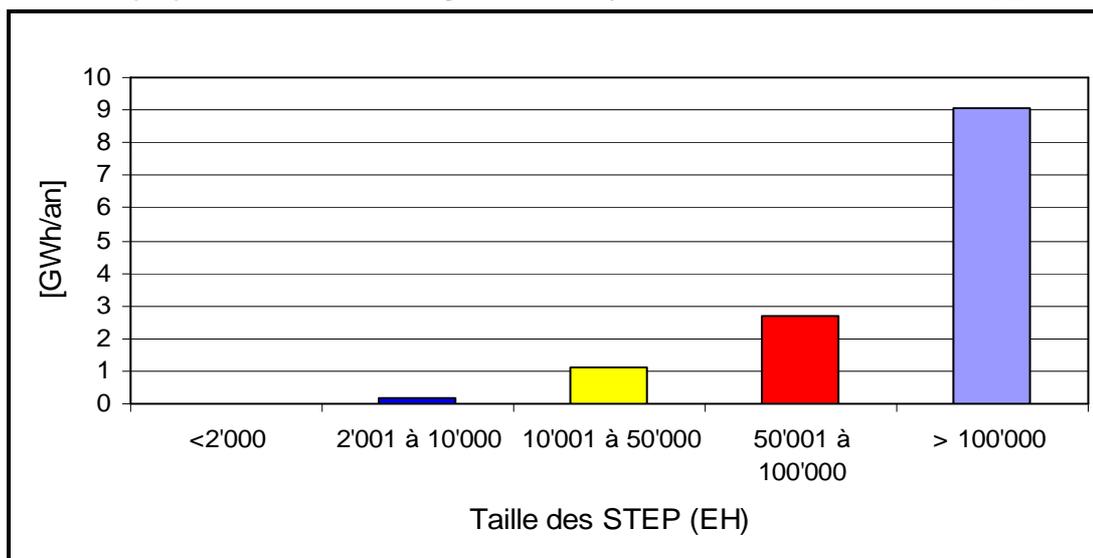
### F.1.5 La production de biogaz et d'électricité

En 2002 la production totale de biogaz des STEP en Suisse s'élève à 536.238 GWh (tableau F.2). La production moyenne des STEP par catégorie d'EH varie de 0.0021 à 9.04 GWh par an. Les 21 STEP de plus de 100'000 EH génèrent à elles seules près du 70% de la production totale de biogaz.

Tableau F.2 : Production de biogaz des STEP selon les classes d'EH [9]

|              | Classe des STEP | Biogaz (million de m <sup>3</sup> /an) | Biogaz (GWh/an) | Biogaz/ STEP (GWh/an) |
|--------------|-----------------|--|-----------------|-----------------------|
| 1            | > 100'000 EH    | 31.658                                 | 189.948         | 9.04                  |
| 2            | > 50'000 EH     | 17.150                                 | 102.899         | 2.7                   |
| 3            | > 10'000 EH     | 34.180                                 | 205.080         | 1.09                  |
| 4            | > 2'000 EH      | 6.333                                  | 37.996          | 0.2                   |
| 5            | < 2'000 EH      | 0.052                                  | 0.315           | 0.021                 |
| <b>TOTAL</b> |                 | <b>89.373</b>                          | <b>536.238</b>  | <b>13.051</b>         |

Graphique F.4 : Production de biogaz annuelle moyenne des STEP selon la classe d'EH [9]



## F.2 Conditions-cadres pour l'application des procédés dans les STEP suisses

Les méthodes de désintégration des boues pourraient être appliquées dans toutes les STEP stabilisant par digestion anaérobie, soit près du 70% des STEP suisses. Les STEP pratiquant la digestion anaérobie froide, nécessitent au préalable des investissements dans des équipements de chauffage pour le digesteur. C'est pour cela que dans l'étude, nous n'avons considéré que les STEP déjà pourvues de ces équipements, à savoir celles stabilisant par digestion thermique (mésophile ou thermophile). Il en existe 368 qui représentent le 43% de toutes les STEP du pays.

### F.2.1 Augmentation de la production de biogaz

L'augmentation moyenne de la production de biogaz obtenue par les méthodes de désintégration est de 25% (V. § D.3). Ce chiffre correspond à un potentiel global de production annuelle de biogaz de 670.3 GWh (tableau F.3).

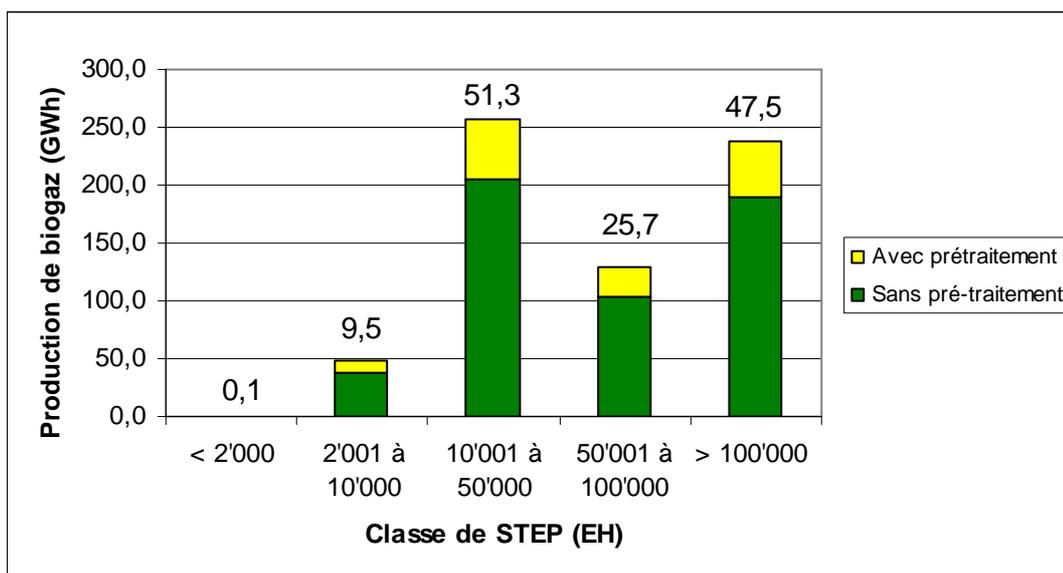
Tableau F.3 : Production de biogaz et d'électricité des STEP avec pré-traitement

|              | Classe       | Augmentation de la production de biogaz (GWh/an) | Production de biogaz (GWh/an) avec pré-traitement |
|--------------|--------------|--|---|
| 1            | > 100'000 EH | 47.5   | 237.4   |
| 2            | > 50'000 EH  | 25.7   | 128.6   |
| 3            | > 10'000 EH  | 51.3   | 256.4   |
| 4            | > 2'000 EH   | 9.5  | 47.5  |
| 5            | < 2'000 EH   | 0.1  | 0.4   |
| <b>TOTAL</b> |              | 134.062  | 670.3   |

Les valeurs totales de production de biogaz sont représentées par le graphique ci-dessous. Ce sont dans les STEP de la catégorie de 10'000 à 50'000 EH (42%), (où la proportion de

STEP effectuant la stabilisation anaérobie thermique est la plus grande), que l'augmentation de biogaz est la plus forte.

Graphique F.5 : Augmentation de la production d'électricité des STEP après pré-traitement



## F.2.2 La consommation énergétique

Comme vu au chapitre D, les méthodes de désintégration consomment des quantités d'énergie non négligeables pour le bilan énergétique final.

La consommation d'énergie du procédé nous est donnée par le pourcentage d'énergie consommée par le procédé par rapport à la quantité totale d'énergie produite par la STEP et ce grâce au biogaz produit.

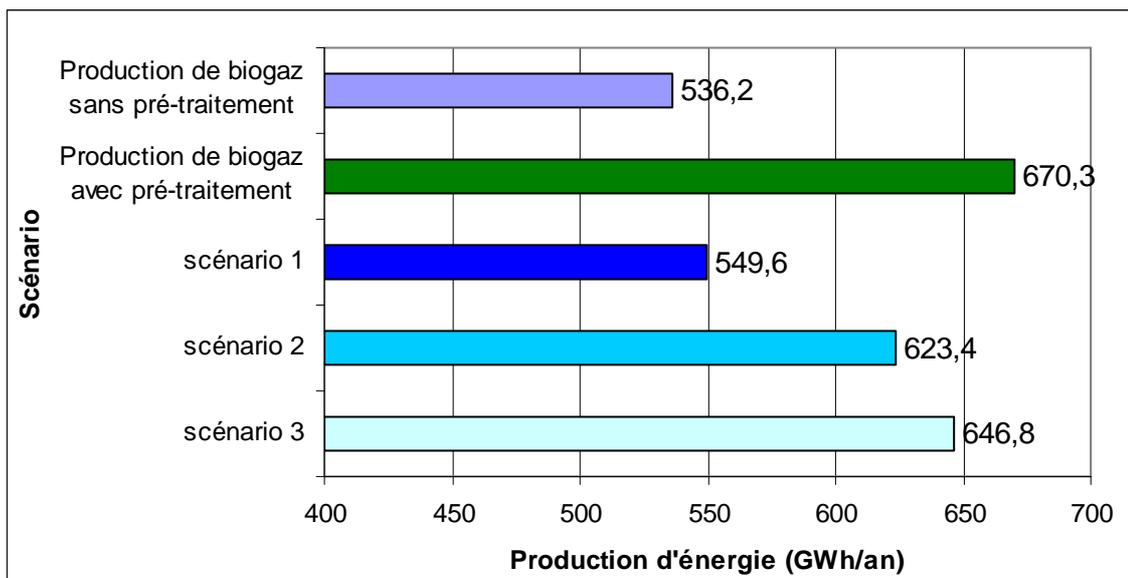
$$\frac{\text{Energie consommée par le procédé (kWh)}}{\text{Energie totale produite par la STEP (kWh)}} \cdot 100$$

La consommation énergétique des STEP suisses est d'environ de 390 GWh par an [11]. Elle s'élève à 405 MWh par an et par STEP. Cela fait pour les 368 STEP qui pratiquent la digestion thermique un total de 149'040 MWh par an.

Etant donné que les données sur la consommation des procédés de pré-traitement sont très rarement fournies par les constructeurs, les trois scénarios suivants ont été établis : Les scénarios 1, 2 et 3 correspondent respectivement à une utilisation de 18%, 7% et 3.5% de l'énergie totale produite dans une STEP.

Le scénario 1 est valable pour des procédés gourmands en énergie du type de l'hydrolyse thermique haute de Cambi. Le scénario 2 s'emploie pour les méthodes de désintégration mixtes du type Microsludge™ qui utilisent de l'énergie thermique à haute pression et de l'énergie mécanique. Le scénario 3 est applicable pour les procédés à faible consommation énergétique, tels les procédés mécaniques.

Graphique F.6 : Production d'énergie des STEP en considérant 3 scénarios de consommation d'électricité des STEP



### F.2.3 La réduction des quantités de boues résiduelles

Les STEP suisses produisent chaque année 200'000 tonnes de boues déshydratées à évacuer. Les recettes énergétiques provenant de la réduction des quantités de boues se mesurent à deux niveaux :

1. La baisse du volume de boues à déshydrater.
2. La diminution de la quantité de boues à éliminer

#### F.2.3.1 La baisse du volume des boues à déshydrater

En partant du principe que les paramètres de déshydratation restent inchangés (température, mode et temps de déshydratation), les gains énergétiques sont proportionnels à la diminution du volume de boues à déshydrater.

Une STEP modèle suisse de 20'000 EH qui traite 44m<sup>3</sup> de boues fraîches par jour (16'060 m<sup>3</sup>/an) et déshydrate au moyen d'une centrifugeuse consomme 45 kWh/m<sup>3</sup> de BD pour les besoins de la déshydratation, soit 722.7 GWh/an. Si l'on comptabilise les 367 STEP stabilisant leurs boues par digestion anaérobie thermique, on obtient les résultats figurant dans le tableau suivant :

Tableau F.4 : Economies d'énergie réalisées par la réduction des quantités de boues résiduelles

| Méthode de désintégration                        | Réduction moyenne de la quantité de boues à éliminer | Réduction de la consommation par STEP (GWh/an) | Réduction de la consommation pour l'ensemble des STEP (GWh/an) |
|--|--|--|--|
| Mécanique  | -15%   | 108.405  | 39'784.6   |
| Chimique et physique (hydrolyse thermique basse) | -30%   | 216.810  | 79'569.3   |
| Mixte et physique (hydrolyse thermique haute)    | -50%   | 361.535  | 132'615.4  |

### **F.2.3.2 La diminution de la quantité de boues à éliminer**

La réduction de la quantité des boues à évacuer engendre également une importante économie d'énergie et d'argent sur les transports des boues vers les installations finales de traitement en vue de leur séchage ou incinération.

Il n'est malheureusement pas possible d'avancer des chiffres concrets concernant les transports, étant donné que chaque STEP se situe à une distance très variable de son installation de traitement final.

On peut cependant raisonnablement penser que la baisse des coûts énergétiques pour le transport et l'élimination des boues est plus ou moins proportionnelle à la réduction des boues à éliminer.

## **F.3 Synthèse**

64% des STEP suisses qui digèrent les boues ont un mode de stabilisation anaérobie thermique (mésophile ou thermophile) et pourraient être actuellement équipées d'un procédé de pré-traitement. Le plus grand potentiel d'augmentation énergétique se concentre dans la classe des STEP de plus de 100'000 EH.

Parmi les 10 plus grandes STEP du pays, la moitié ne pratiquent pas de stabilisation. L'équipement de digesteurs anaérobies et de procédés de pré-traitement dans ces grandes STEP contribuerait à une hausse considérable de la production nationale d'énergie.

La production énergétique additionnelle obtenue par une généralisation de la désintégration pour ces deux catégories de STEP s'élèverait à 104,273 GWh par an soit +19,5% par rapport à la production actuelle qui est de 536 GWh.

La désintégration n'est en revanche pas judicieuse pour les STEP dont la taille est inférieures à 100'000 EH et ne pratiquant pas la stabilisation anaérobie thermique, compte tenu de leur faible potentiel énergétique.

## G CONCLUSION

L'étude a permis d'avoir un aperçu des différentes méthodes de désintégration commercialisées à ce jour. Les procédés sont très variés et utilisent un très grand nombre de technologies différentes. Aucun procédé ne se démarque par rapport aux autres.

La plupart de ces procédés ont été mis sur le marché les cinq dernières années. On peut donc penser que de nouvelles technologies sont encore à venir.

Les méthodes de désintégration peuvent contribuer de manière significative à l'augmentation de la production de biogaz et à la réduction de la quantité des boues résiduelles. L'amélioration de la déshydratation des boues n'a pas pu être démontrée de manière directe, mais seulement par la forte diminution de la quantité de boues à évacuer.

Le pré-traitement des boues par désintégration peut être une solution environnementale pour régler les problèmes liés à la hausse de la quantité des boues à éliminer suite entre autre à la restriction de l'épandage de celles-ci sur les terres agricoles. Le pré-traitement des boues contribue au développement des énergies renouvelables et à la diminution de la consommation énergétique du pays.

## H LISTE DES ABREVIATIONS

|       |   |
|-------|---|
| OFEN  | Office fédéral de l'énergie                                 |
| OFQC  | Office fédéral des questions conjoncturelles                |
| OFEFP | Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage |
| EH    | Equivalent habitant   |
| MS    | Matière sèche   |
| BF    | Boues fraîches  |
| BE    | Boues en excès  |
| BD    | Boues digérées  |
| V     | Volume  |
| MO    | Matière organique   |
| STEP  | Station d'épuration   |
| CCF   | Couplage chaleur-force                                      |
| IBE   | Installations d'incinération des boues                      |
| UIOM  | Usine d'incinération des ordures ménagères                  |
| T     | Température   |

# I ANNEXES

## **ANNEXE 1 : QUESTIONNAIRE ENVOYE AUX STEP**

| <b>CARACTERISTIQUES DE LA STEP</b>  | <b>REPONSE</b>      |                     | <b>UNITE</b>       | <b>COMMENTAIRE</b> |
|---|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Nom de l'installation   |                     |                     | -                  |                    |
| Nom de la personne de contact   |                     |                     | -                  |                    |
| Ville, Pays   |                     |                     | -                  |                    |
| Equivalent habitant de la STEP  |                     |                     | -                  |                    |
| Volume du digesteur   |                     |                     | m <sup>3</sup>     |                    |
| Température de digestion  |                     |                     | °C                 |                    |
| Temps de rétention hydraulique  |                     |                     | m <sup>3</sup>     |                    |
| <b>PROCEDE DE PRE-TRAITEMENT</b>  | <b>REPONSE</b>      |                     | <b>UNITE</b>       | <b>COMMENTAIRE</b> |
| Nom du procédé de pré-traitement <sup>1</sup>                                     |                     |                     | -                  |                    |
| Type de procédé <sup>2</sup>  |                     |                     | -                  |                    |
| Fabricant (constructeur) du procédé   |                     |                     | -                  |                    |
| Année de mise en service du procédé   |                     |                     | -                  |                    |
| <b>DONNEES TECHNIQUES</b>   | <b>REPONSE</b>      |                     | <b>UNITE</b>       | <b>COMMENTAIRE</b> |
|   | AVEC PRE-TRAITEMENT | SANS PRE-TRAITEMENT |                    |                    |
| Année de référence <sup>3</sup>   | 2006                |                     | -                  |                    |
| Boues primaires (quantité)  |                     |                     | t/an               |                    |
| Taux de matière sèche (MS)  |                     |                     | %                  |                    |
| Taux de matières volatiles sèches (MVS)   |                     |                     | %                  |                    |
| Taux de matières en suspension (MES)  |                     |                     | %                  |                    |
| Boues secondaires (quantité)  |                     |                     | t/an               |                    |
| Taux de matière sèche (MS)  |                     |                     | %                  |                    |
| Taux de matières volatiles sèches (MVS)   |                     |                     | %                  |                    |
| Taux de matières en suspension (MES)  |                     |                     | %                  |                    |
| Production de biogaz  |                     |                     | m <sup>3</sup> /an |                    |
| Production d'électricité  |                     |                     | kWh/a              |                    |
| Consommation propre d'électricité   |                     |                     | kWh/a              |                    |
| <b>DONNEES ECONOMIQUES</b>  | <b>REPONSE</b>      |                     | <b>UNITE</b>       | <b>COMMENTAIRE</b> |
| Nature des investissements nécessaires liés au procédé (description) <sup>4</sup> |                     |                     | -                  |                    |
| Coûts des investissements nécessaires liés au procédé                             |                     |                     | €                  |                    |
| Frais d'exploitation du procédé   |                     |                     | €/an               |                    |
|   | AVEC PRE-TRAITEMENT | SANS PRE-TRAITEMENT |                    |                    |
| Bénéfice sur la vente d'électricité   |                     |                     | €/an               |                    |
| Economie sur le coût d'élimination des boues                                      |                     |                     | €/an               |                    |

<sup>1</sup> Ex : (Bio)thelys, Cambi, Crown<sup>®</sup> Microsludge<sup>™</sup>, Sonix<sup>™</sup>, VTA-GSD, etc.

<sup>2</sup> Ex : ultrason, oxydation humide, hydrolyse thermique, ozone, centrifuge lysate, etc.

<sup>3</sup> Année précédant la mise en service du procédé de pré-taitement

<sup>4</sup> Ex : construction d'un digesteur, etc.

## **ANNEXE 2 : LISTE DES ILLUSTRATIONS**

- Illustration B.1 : Désintégration d'un floccule de boue puis destruction des cellules [12]
- Illustration B.2 : Intégration de la désintégration des boues dans une station d'épuration
- Illustration B.3 : Principe de la cavitation
- Illustration B.4 : Principe d'un homogénéisateur à ultrasons [8]
- Illustration B.5 : Principe d'un homogénéisateur à haute pression [12]
- Illustration B.6 : Principe d'une centrifugeuse lytique (fournie par Lysatec GmbH)
- Illustration B.7 : Principe d'un broyeur à bille [8]
- Illustration B.8 : Principe d'un pulvérisateur à débit continu [5]
- Illustration B.9 : Procédé mettant en jeu une hydrolyse thermique [4]
- Illustration B.10 : Principe du champ électrique pulsé [17]
- Illustration E.1 : Filière d'élimination des boues en Suisse [10]

### **ANNEXE 3 : LISTE DES GRAPHIQUES**

Graphique D.1 : MS maximum des boues avant pré-traitement

Graphique E.1 : Répartition des bénéfices provenant de la désintégration [18]

Graphique F.1 : Les STEP suisses par classes d'EH [9]

Graphique F.2 : Les STEP suisses selon leur mode de stabilisation [10]

Graphique F.3 : Répartition des STEP pratiquant la stabilisation anaérobie thermique [10]

Graphique F.4 : Production de biogaz annuelle moyenne des STEP selon la classe d'EH [9]

Graphique F.5 : Augmentation de la production d'électricité des STEP après pré-traitement

Graphique F.6 : Production d'électricité des STEP en considérant 3 scénarios de consommation d'électricité des STEP

## **ANNEXE 4 : LISTE DES TABLEAUX**

Tableau B.1 : Méthodes de désintégration

Tableau B.2 : Les degrés ultimes d'oxydation

Tableau D.1 : MS des boues avant pré-traitement selon les classes de désintégration [5]

Tableau D.2 : Consommation énergétique des classes de désintégration [5]

Tableau D.3 : Consommation énergétique de procédés commercialisés

Tableau D.4 : Amélioration de la production de biogaz selon les procédés commercialisés

Tableau D.5 : Principaux modes de déshydratation et leur consommation en électricité [5]

Tableau D.6 : Diminution de la quantité de boues à éliminer

Tableau E.1 : Coûts d'exploitation moyens des STEP suisses

Tableau E.2 : Les coûts de personnel selon les classes de procédés [5]

Tableau E.3 : Coûts moyens d'élimination des boues [10]

Tableau E.4 : Les coûts des procédés commercialisés [10]

Tableau E.5 : Bilan économique du procédé VTA-GSD pour une STEP de 120'000 EH

Tableau F.1 : Les 10 plus grandes STEP suisses et leurs modes de stabilisation

Tableau F.2 : Production de biogaz des STEP selon les classes d'EH [9]

Tableau F.3 : Production de biogaz et d'électricité des STEP avec pré-traitement

Tableau F.4 : Economies d'énergie réalisées par la réduction des quantités de boues résiduelles

## **ANNEXE 5 : RECAPITULATIF DES METHODES DE DESINTEGRATION**

| <b>Méthode de désintégration</b> | <b>Classe de désintégration</b>                           | <b>Nom du procédé</b>                  |
|----------------------------------|---|--|
| Mécanique                        | Homogénéisation par ultrasons                             | Sonotronic<br>Bellmer desintegrator BD |
|                                  |   | Sonix™                                 |
|                                  |   | DMS                                    |
|                                  |   | VTA GSD                                |
|                                  | Centrifugation lytique                                    | Lysatec process                        |
|                                  | Désintégration spécifique                                 | Crown®                                 |
|                                  |   | HSS                                    |
| Physique                         | Hydrolyse thermique haute                                 | Cambi THP                              |
|                                  |   | Thélys®/Biothélys®                     |
|                                  | Hydrolyse thermique basse                                 | ASTM                                   |
|                                  |   | Schwarting-Uhde<br>process             |
|                                  | Champs électriques pulsés                                 | Pulse power technology                 |
| Chimique                         | Oxydation   | Zimpro®                                |
| Mixte                            | Hydrolyse thermique et basique                            | Pondus process                         |
|                                  | Homogénéisation à haute<br>pression et traitement basique | Microsludge™                           |

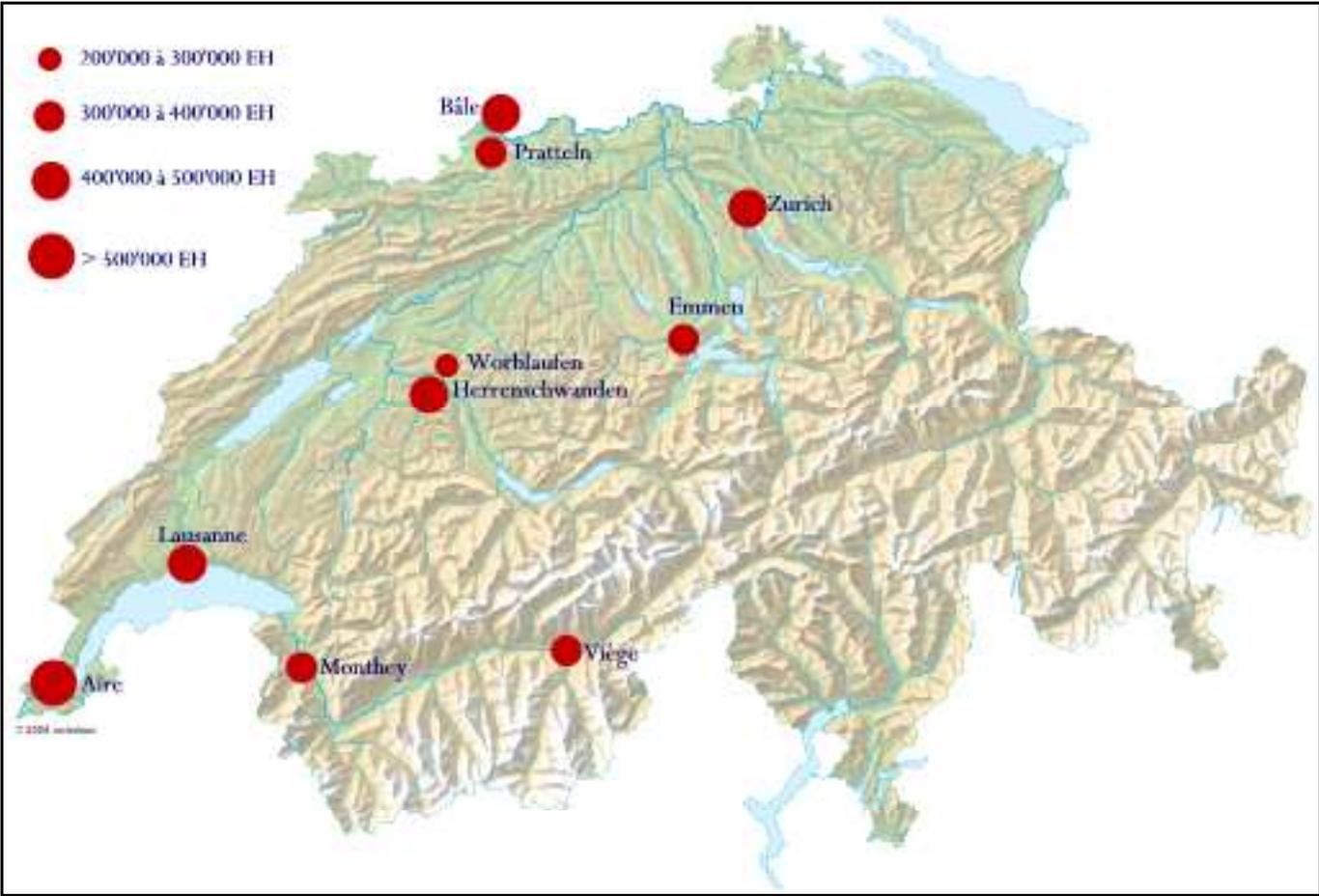
## **ANNEXE 6 : REFERENCES DES CONSTRUCTEURS POUR CHAQUE PROCEDE**

| <b>Nom du procédé</b>                  | <b>Constructeurs / Fournisseurs</b>  | <b>Ville</b>              | <b>Pays</b> | <b>Site internet</b>   | <b>Première installation</b> |
|--|--|---------------------------|-------------|--|------------------------------|
| Sonotronic<br>Bellmer desintegrator BD | Ultrawaves Wasser- & Umwelttechnologien GmbH   | Hamburg                   | Allemagne   | <a href="http://www.ultrawaves.de">www.ultrawaves.de</a>                         | 2004                         |
| Sonix™                                 | Sonico Ltd   | Kidderminster             | Royaume Uni | <a href="http://www.sonico.net">www.sonico.net</a>                               | 2002                         |
| DMS                                    | IKTS Fraunhofer IWE.tec GmbH   | Dresden Radebeul          | Allemagne   | <a href="http://www.ikts.fraunhofer.de">www.ikts.fraunhofer.de</a>               | 2000                         |
| VTA GSD                                | VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH   | Weibern                   | Autriche    | <a href="http://www.vta.cc">www.vta.cc</a>                                       | 2003                         |
| Lysatec process                        | Lysatec GmbH   | Marktredwitz              | Allemagne   | <a href="http://www.lysatec.com">www.lysatec.com</a>                             | 1997                         |
| Crown®                                 | Biogest AG   | Taunusstein               | Allemagne   | <a href="http://www.biogest.de/index.htm">www.biogest.de/index.htm</a>           | 2002                         |
| HSS                                    | Hans Huber AG  | Berching                  | Allemagne   | <a href="http://www.huber.de/hp1/Home.htm">www.huber.de/hp1/Home.htm</a>         | -                            |
| Cambi THP                              | Cambi AS   | Asker                     | Norvège     | <a href="http://www.cambi.no">www.cambi.no</a>                                   | 1995                         |
| Thélys®/Biothélys®                     | Veolia Water Solutions & Technologies  | Saint Maurice             | France      | <a href="http://www.veoliaeaust.com/fr/">www.veoliaeaust.com/fr/</a>             | 2003                         |
| ASTM                                   | Oswald Schulze GmbH & Co KG  | Gladbeck                  | Allemagne   | <a href="http://www.oswald-schulze.de">www.oswald-schulze.de</a>                 | 1986                         |
| Schwarting-Uhde process                | Schwarting Umwelt GmbH   | Flensburg                 | Allemagne   | -  | 1994                         |
| Pulse power technology                 | TZN Forschungs- und Entwicklungszentrum Unterlüss GmbH<br>Institut für Siedlungswasserwirtschaft TU Braunschweig | Unterlüss<br>Braunschweig | Allemagne   | <a href="http://www.tu-braunschweig.de/isww">www.tu-braunschweig.de/isww</a>     | recherche                    |
| Zimpro®                                | Siemens Water Technologies   | Rotschild                 | Etats-Unis  | <a href="http://www.usfilter.com/en/">www.usfilter.com/en/</a>                   | recherche                    |
| Pondus process                         | Pondus Verfahrenstechnik   | Teltow                    | Allemagne   | <a href="http://www.pondus-verfahren.de">www.pondus-verfahren.de</a>             | recherche                    |
| Microsludge™                           | Paradigm Environmental Technologies Inc.   | Vancouver                 | Canada      | <a href="http://www.paradigmenvironmental.com">www.paradigmenvironmental.com</a> | 2004                         |

## **ANNEXE 7 : STEP DE REFERENCE CONTACTEES**

| <b>Nom du procédé</b>                  | <b>STEP de référence contactées</b>  |                       |  |               |
|--|--|-----------------------|--|---------------|
| Sonotronic<br>Bellmer desintegrator BD | Bamberg  | D                     |  |               |
| Sonix™                                 | Mangere  | NZL                   | Kävlinge   | S             |
| DMS                                    | Helsingor<br>Mannheim<br>Wiesbaden   | DK<br>D<br>D          | Detmold<br>Rüsselsheim                                     | D<br>D        |
| VTA GSD                                | Traismauer<br>RHV Ager West<br>Villach<br>AZV Main-Mud Miltenberg<br>Eberstadt (Darmstadt süd) | A<br>A<br>A<br>D<br>D | AWV Oberes Pustertal I<br>Halle Nord<br>Penthaz<br>Obersee | D<br>CH<br>CH |
| Lysatec process                        | Prague   | CZ                    | Aachen-Soers   | D             |
| Crown®                                 | Taunusstein<br>Stockholm<br>Ginsheim   | D<br>S<br>D           | Oppenheim<br>Speyer<br>Münchwilen                          | D<br>D<br>CH  |
| HSS                                    |  |                       |  |               |
| Cambi THP                              | HIAS<br>Fredericia<br>Nasteded<br>Dublin   | N<br>DK<br>DK<br>IRL  | Bruxelles-Nord<br>Cherstey<br>Aberdeen                     | B<br>UK<br>UK |
| Thélys®/Biothélys®                     | Saumur   | F                     | Château-Gontier  | F             |
| ASTM                                   |  |                       |  |               |
| Schwarting-Uhde<br>process             |  |                       |  |               |
| Pulse power technology                 |  |                       |  |               |
| Zimpro®                                |  |                       |  |               |
| Pondus process                         | Gifhorn  | D                     | Waßmannsdorf   | D             |
| Microsludge™                           | Vancouver  | CDN                   | Los Angeles  | USA           |

**ANNEXE 8 : LOCALISATION DES PLUS GRANDES STEP SUISES**



- [1] Abwasserverband "An der Traisen", IWA TU Wien, WSB Labor GmbH, Verfahrenstechnische von Klärschlamm auf Kläranlagen, 2003, 117p, disponible par Internet sur :  
<http://gpool.lfrz.at/gpoollexport/media/file/Klaerschlammdesintegration031029.pdf>
- [2] Arbeitsgruppe AK-1.6 „Klärschlamm Desintegration“, Verfahren und Anwendungsgebiete der mechanischen Klärschlammdesintegration, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK), 14p, disponible par Internet sur :  
<http://www.klaerschlammdesintegration.de/Bericht1.pdf>
- [3] Arbeitsgruppe AK-1.6 „Klärschlamm Desintegration“, Verfahrenvergleich und Ergebnisse der mechanischen Klärschlammdesintegration, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK), 19p, disponible par Internet sur :  
<http://www.klaerschlammdesintegration.de/Bericht2.pdf>
- [4] Arbeitsgruppe AK-1.6 „Klärschlamm Desintegration“, Thermische, chemische und biochemische Desintegrationsverfahren, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK), 17p, disponible par Internet sur :  
<http://www.klaerschlammdesintegration.de/Bericht3.pdf>
- [5] BIRLE H., VDMA Einheitsblatt 24654 : Komponenten und Systeme zur Klärschlammdesintegration, Hinweise für die Auswahl, Projektierung und Ausführung, Novembre 2006
- [6] BOUGRIER C., Optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un co-traitement physico-chimique: Application au gisement de biogaz représenté par les boues d'épuration des eaux usées, [On line], Thèse : Institut National de Recherche Agronomique de Narbonne, 2005 [5 Octobre 2005], 276p, disponible par Internet sur :  
[http://www.inra.fr/ea/fichier\\_these/BOUGRIER2005.pdf](http://www.inra.fr/ea/fichier_these/BOUGRIER2005.pdf)
- [7] CHAIX O., SAUVIN C., MAGNOLLAY A., BIELSER S., Coûts de l'assainissement, BG Ingénieurs-conseil SA pour l'OFEFP, 2003, 48p
- [8] KAMPEN I., MICHEL S., Verfahrenstechnisches Laborpraktikum : Mechanischer Zellaufschluss, Institut für Partikeltechnik, 35p, disponible par Internet sur :  
<http://www.ipat.tu-bs.de/documents/labor/Zellaufschluss.pdf>
- [9] KAUFMANN U., Energienutzung in Abwasserreinigungsanlagen, Dr.Eicher + Pauli AG pour l'Office Fédéral de l'Energie, Bern, 2003, 90p
- [10] LAUBE A., VONPLON A., Elimination des boues d'épuration en Suisse – Recensement des quantités et des capacités, OFEFP, 2004, 47p
- [11] MÜLLER E.A., THOMMEN R., STÄHLI P., Manuel : L'énergie dans les stations d'épuration, CUB Zürich pour l'OFEN l'OFQC et l'OFEFP, BfK et BFE/PACER, 1996, 247p

[12] NICKEL K., NEIS U., Klärschlammdeintegration – Überblick über verschiedene Verfahren, 15. Kolloquium und Fortbildungskurs zur Abwasserwirtschaft. TU Hamburg-Harburg Reports on Sanitary Engineering, 2003, Vol. 41, 91-106

[13] ØDEGAARD H., Sludge minimization technologies – an overview, Water Science and technology, 2004, Vol. 49, No 19, 31p

[14] PANTER K., Heat treatment and thermal hydrolysis, disponible par Internet sur :  
<http://www.p2pays.org/ref/22/21790.pdf>

[15] PANTER K., KLEIVEN H., Ten years experiences of full scale thermal hydrolysis projects, 10th European Biosolids & Biowastes Conference, 13-16th November 2005, Wakefield, UK

[16] STARK O., Technologien zur Überschussschlammreduktion bei des biologischen Abwasserbehandlung, Zentrum für Entsorgungstechnik und Kreislaufwirtschaft, disponible par Internet sur : <http://www.stark-consult.de/pdf/Schlammreduktion.pdf>

[17] WEISE Th. H. G. G., DICHTL N., Klärschlammbehandlung mit der Hochleistungspulstechnik, Zentrum für Abfallforschung Zeminar : Klärschlammbehandlung und –entsorgung Erfahrungen und Perspektiven, 18-19 September 1997, disponible par Internet sur :  
<http://rzv075.rz.tu-bs.de/pubs/pubs.htm>

[18] WINTER A., MÜLLER J. A., Comparison of disintegration methods at full-scale anaerobic digestion plant, 7th Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion, Merida, Mexiko, octobre 2002, 596-602