

## Procédés de désintégration des boues

### Prétraitement des boues d'épuration et digestion anaérobie

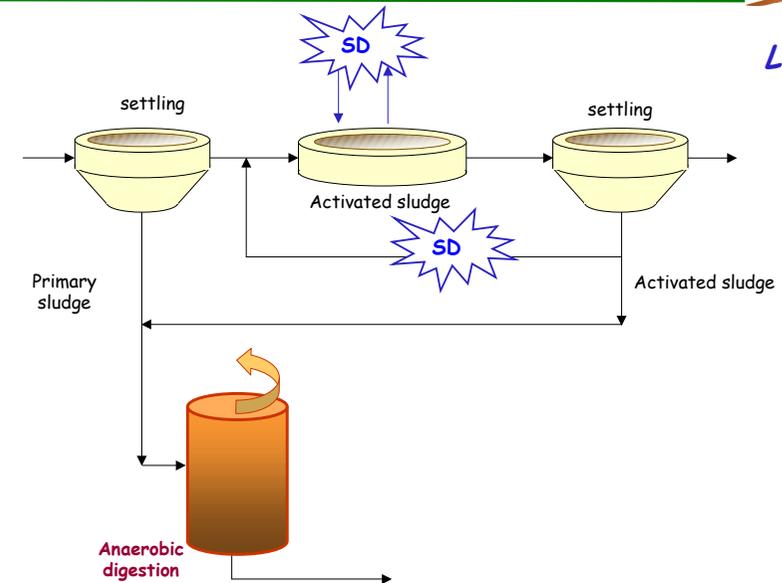
Hélène Carrère

Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement  
INRA- Narbonne

1

## Place des procédés de désintégration

Ligne Eau



2

## Conséquences des cotraitements sur la ligne eau

- => Moins de production de boues à la source
- => pas besoin de procédé de traitement des boues

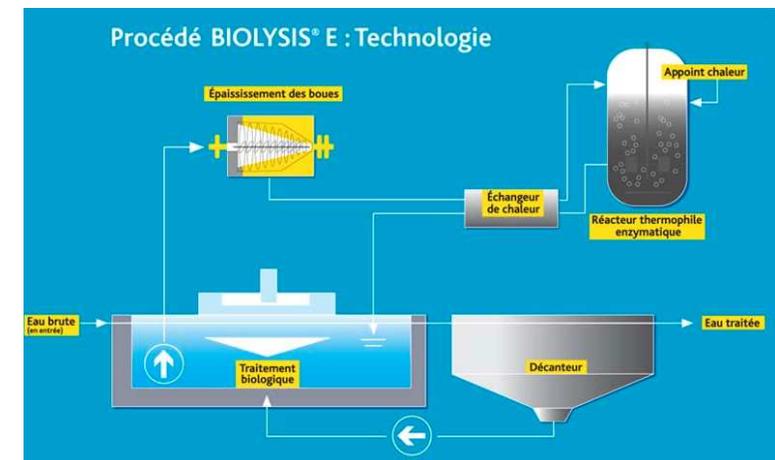
Mais

- => coûts plus élevés pour l'aération
- => problèmes pour l'élimination biologique du Phosphore
- => problèmes des polluants qui sont éliminés par sorption sur les boues

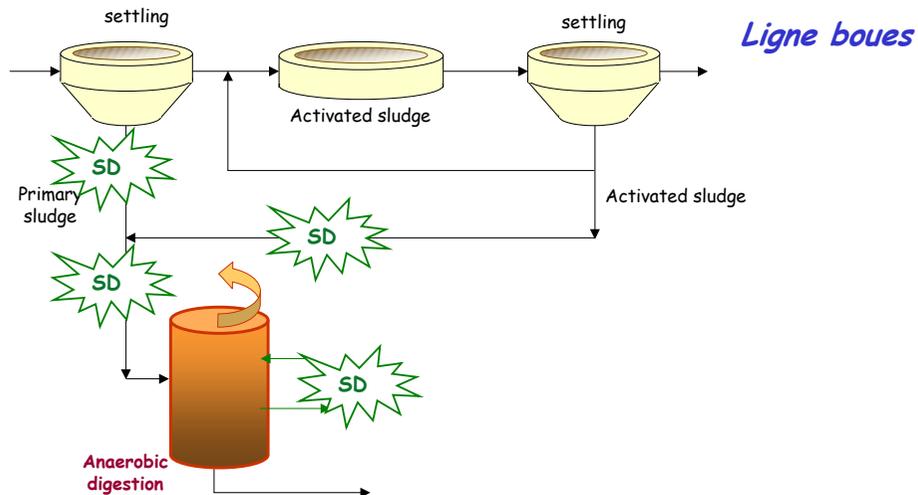
3

## Procédé industriel

Biolysis E, Ondeo-Degremont (Suez)

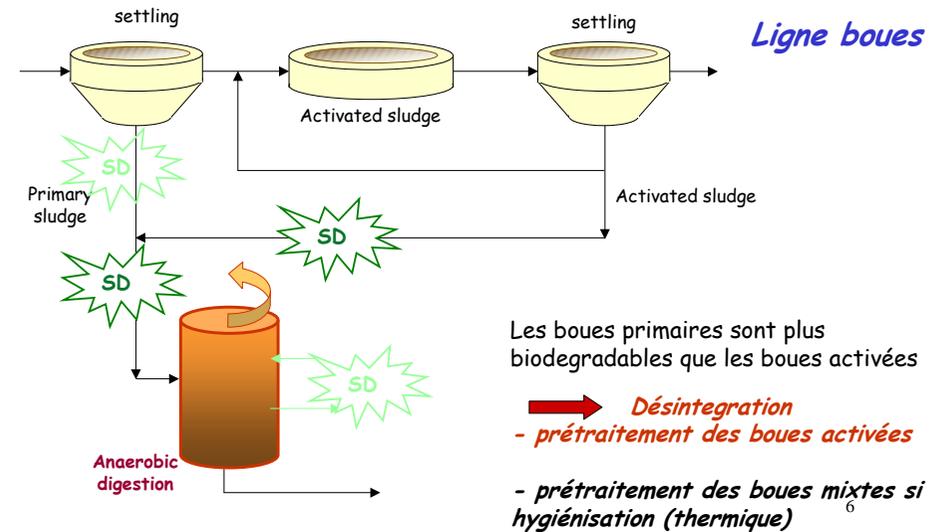


## Place des procédés de désintégration



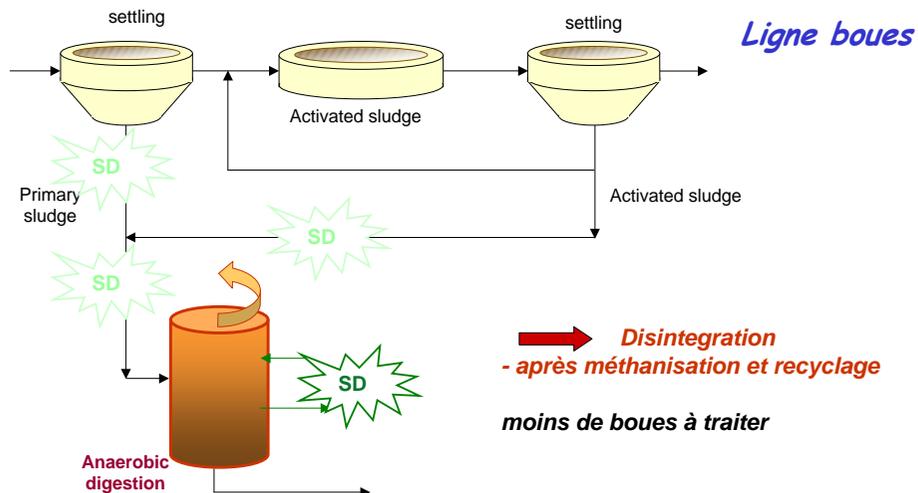
5

## Place des procédés de désintégration



6

## Place des procédés de désintégration



7

## Conséquences des cotraitements sur la ligne boue

- => augmenter la conversion des boues en biogaz
  - => plus de biogaz, moins de boues à éliminer
- => accélération de la méthanisation
  - => charge plus élevée dans un digesteur donné
  - => digesteur plus petit
- => modification des propriétés de la boue (dewaterability):
  - > 0 or < 0
- => impacts sur les polluants : > 0 or < 0

Mais coûts élevés

8

## Principe de la digestion anaérobie

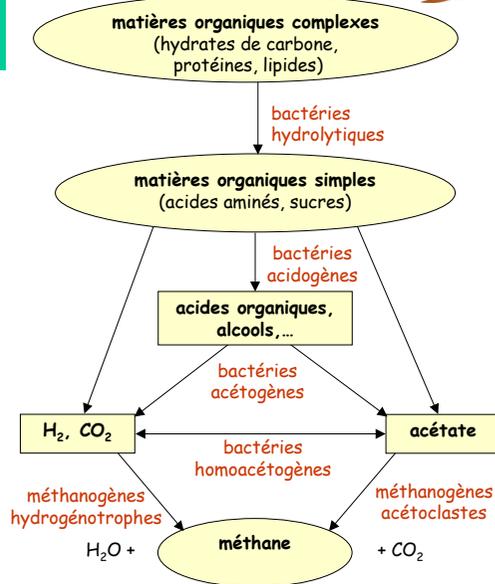
Etape limitante pour la digestion des boues

HYDROLYSE

ACIDOGENESE

ACETOGENESE

METHANOGENESE



9

## Prétraitement des boues

Etape limitante de la digestion anaérobie des boues :  
hydrolyse de la matière particulaire

But du pré-traitement  
rendre la matière organique accessible aux micro-organismes  
solubilisation, réduction de la taille des floccs

Conséquences  
accélération de la digestion anaérobie  
réduction du temps de séjour

augmentation du taux de conversion de la matière organique  
en biogaz à temps de séjour constant

10

## Digestion anaérobie batch

Tests de potentiel méthane : conditions favorables pour la digestion anaérobie

production maximale de biogaz à partir d'un substrat.  
⇒ Comparaison de différentes conditions de prétraitements



Durée : 20-30 jours

11

## Digestion anaérobie semi-continue

Détermination des performances du couplage  
⇒ Dimensionnement

Durée : 4 Temps de Séjour Hydrauliques (3 mois environ)

Résultats :  
taux d'abattement  
MS, MO, DCO  
rendement méthane



T < 100°C



T = 110-210°C

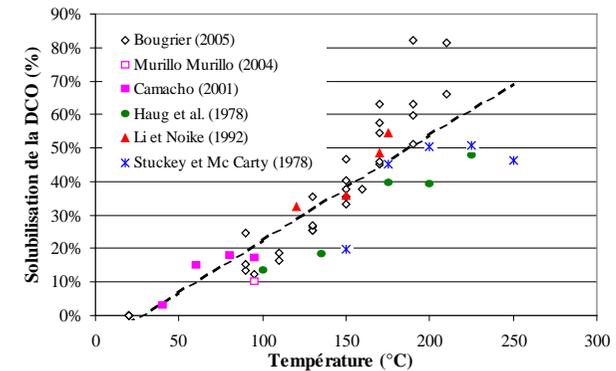


Microondes (Eskicioglu et al., 2008)

Echelle industrielle : injection de vapeur

13

## Solubilisation de la DCO des boues secondaires



Solubilisation ↗ avec la température

Peu d'impact de la durée

14

Température optimale : 160 -180 °C

T > 190°C: production de composés réfractaires

Durée du traitement de 1 à 60 min, peu d'influence

Résultats études de laboratoire :

↗ production de CH<sub>4</sub> de 40 à 100% (réacteurs continus)

↗ cinétique : ↘ TSH des boues (15 à 5 jours)

↗ déshydratabilité (si T > 150°C)

↘ viscosité

↗ DCO soluble après digestion des boues

⇒ surcharge à traiter en tête de STEP

Impact sur boues peu biodégradables > boues facilement biodégradables  
aération prolongée                      boues primaires

15

Procédé Cambi (Norvège) (Panter et Kleiven, 2005, Kopp et al., 2007)

> 10 installations en Europe du Nord, Japon, Australie

de 1 000 à 35 000 tonnes de boues (MS)/an

abattement de la MO : environ 60%

siccité des boues : environ 30%

charge 5-6 kgMO. m<sup>-3</sup> j<sup>-1</sup>                      TSH=15 jours

boues pasteurisées

Exemples

STEP Hamar : production d'électricité + 20%

STEP Dublin : production d'électricité + 38%

Allemagne 2007 :

Traitement des boues activées puis mélange aux boues primaires

↘ coûts investissement -25%

16

**Procédé Cambi** (Norvège) (*Panter et Kleiven, 2005, Kopp et al., 2007*)  
STEP Hamar : production d'électricité + 20%

50 000 habitants + 125 000 EH issus d'industries alimentaires

Traitement de l'eau : Prétraitements , dégraisseur, décanteur primaire  
Boues activées  
Précipitation des phosphates

Boues : 1/3 primaires, 1/3 secondaires, 1/3 tertiaires

boues centrifugées : 15-20% MS  
Hydrolyse Cambi: 10-12% MS puis méthanisation

« Indoor air » chargé en odeurs utilisé pour aérer les boues activées  
désodorisation

17

**Procédé Cambi** (Norvège) (*Panter et Kleiven, 2005, Kopp et al., 2007*)  
STEP Dublin : production d'électricité + 38%

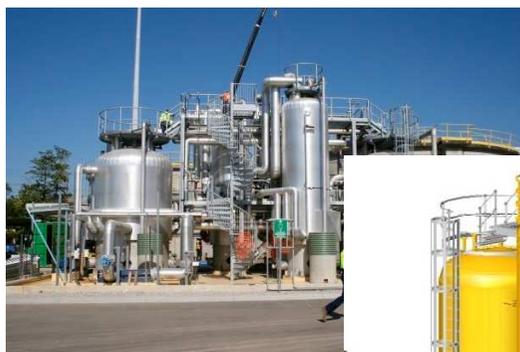
1,6 millions EH dont 0,5 million EH issus d'industries (bière, cosmétiques)

Traitement de l'eau : dégrillage 6 mm , dégraisseur, décanteur primaire  
Boues activées technologie SBR avec traitement N

Boues mixtes ( primaires + secondaires) tamisées à 10mm  
déshydratation: 15-18% MS  
dilution à l'eau chaude : 14% MS  
Hydrolyse Cambi puis méthanisation (TSH=15j)

Chauffage du digesteur par boues hydrolysées

18



**Procédé Biothélyls** (Véolia Waters, *Chauzy et al., 2007*)

2 installations en France  
Saumur (62 000 EH) et Château Gontier (38 000 EH)

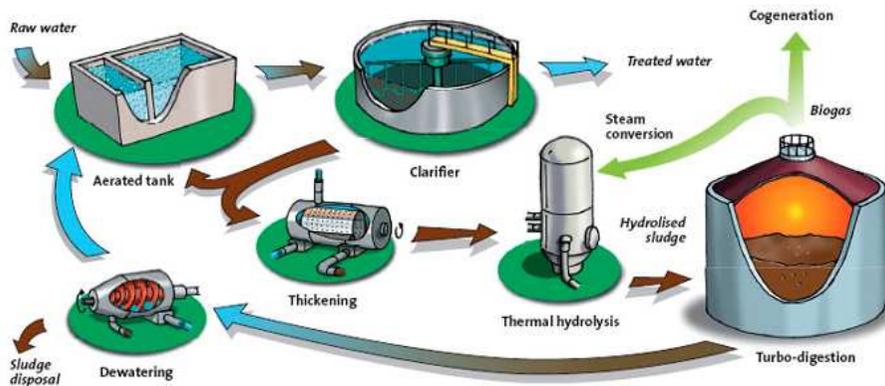
**Résultats sur Saumur** : boues aération prolongée sans décantation primaire

Biothélyls sur boues centrifugées 12-16% MS  
méthaniseur TSH=15 jours  
abattement des MS : 45% (contre 25% sans prétraitement)  
siccité des boues : 30% (contre 22% sans prétraitement)

Economiquement plus intéressant de traiter les boues concentrées

20

## Procédé Biothelys, Veolia



[http://www.veoliawaterst.com/biothelys/en/technical\\_details.htm](http://www.veoliawaterst.com/biothelys/en/technical_details.htm)

21

## Hydrolyse thermo-alkaline



Meilleures solubilisations avec agents monobasiques



Problèmes d'inhibition de la méthanisation  $\text{Na}^+ > \text{K}^+$

L'ajout de base permet d'abaisser la température de traitement thermique

Meilleures biodégradabilités après faible concentration en base  
 $\text{pH}=10$  meilleur que  $\text{pH}=12$

traitement  $130^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}=10$  production de  $\text{CH}_4$  légèrement  $>$  traitement  $170^\circ\text{C}$

**mais ajout de base pénalisant pour l'abattement des matières totales  
minéralisation des boues résiduelles**

Résultats études de laboratoire :

➤ production de  $\text{CH}_4$  de +75-79% (réacteurs continus et 2 phases)

Détérioration de la déshydratabilité des boues

22

## Hydrolyse thermo-acide



Peu d'études de l'hydrolyse acide (Stuckey et McCarty, 1978)

Problèmes de corrosion

Amélioration de la déshydratabilité des boues

23

## Ultrasons



Mécanismes

Phénomènes de cavitation : fortes P et T locales

favorisés aux faibles fréquences 20-40 kHz

Production de radicaux libres  $\Rightarrow$  réactions d'oxydation

favorisée aux fréquences élevées 500-1000 kHz

$$E_s = \frac{\text{power} \times \text{time of treatment}}{\text{volume} \times \text{total solids}}$$

Application aux boues

Meilleurs résultats - avec faibles fréquences 20-40 kHz

- pour les concentrations de boues élevées

Désintégration des floccs et lyse des micro-organismes

énergie seuil (1 000 à 16 000 kJ/kgMS) pour solubilisation des boues

Production de  $\text{CH}_4$  ➤ avec l'énergie appliquée jusqu'à un seuil fonction de la concentration des boues

24

## Ultrasons



### Résultats études de laboratoire :

- production de CH<sub>4</sub> de +10 à 40% (réacteurs continus)
- cinétique : ⚡ TSH des boues (jusqu'à 5 jours)

Résultats divers sur la déshydratabilité

Réduction des problèmes de foisonnement  
(élimination bactéries filamenteuses)

25

## Ultrasons, procédés industriels



Plusieurs équipements commercialisés:

Heilscher, Sonertec, Sonico, Sonotronic, Ultrasonus, VoR Environmental...

Plusieurs STEP équipée en Europe et dans le monde

Singapour (200 m<sup>3</sup> boues/jour)

Mangère-Nouvelles Zélandes (800 000 EH)

Coton-Valley-Grande Bretagne (300 000 EH)

Bamberg-Allemagne (230 000 EH)

Kavelinge-Suède (70 000 EH)

### Résultats sur STEP de Bamberg (Neis et al., 2007)

Capacité 230 000 EH, charge 330 000 EH

boues primaires et boues activées

Sonication de 25% des boues activées épaissies

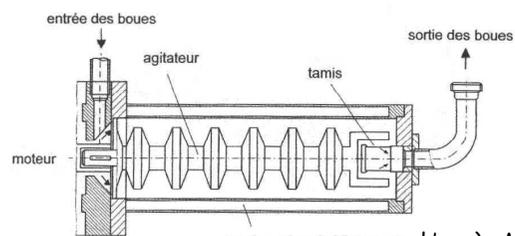
Temps séjour des boues dans digesteur : 18 jours

Production de CH<sub>4</sub> + 30%

abattement de la MO 54%

26

## Broyeur à billes



d'après Müller et Pelletier, 1998

Diamètre billes 0,25-0,35 mm

Vitesse billes 6m/s - 14 m/s (4200tr/min)

### Résultats études de laboratoire :

- abattement MO +12% à TSH=7j
- + 88% à TSH=2j (cellules fixées)

27

## Centrifugeuse-lyseuse



Adaptation d'un système de lyse cellulaire sur centrifugeuse classique  
lames fixées sur rotor et sur paroi interne de la centrifugeuse

Installée sur plusieurs stations en république Tchèque et en Allemagne

### Résultats

- production de CH<sub>4</sub> de +15 à 30% (réacteurs continus)
- ⚡ TSH des boues
- ⚡ viscosité des boues
- déshydratabilité

Dohanyos et al, 1997,2006

28

## Centrifugeuse-lyseuse



### Résultats sur STEP de Liberec (République Tchèque)

Capacité: 100 000 EH

2 digesteurs de 4 400 m<sup>3</sup>, TSH= 40 j

désintégration des boues activées à 3140 rpm ; débit 39 m<sup>3</sup>/h

➤ production de CH<sub>4</sub> de 0,335 à 0,422 m<sup>3</sup>/kg MO introduite (+26%)

➤ viscosité des boues, pompage des boues à 9-11% MS (au lieu de 6%)

### Résultats sur STEP de Furstenfelbruck (Allemagne)

Capacité: 70 000 EH (domestique et industriel (bière, Coca-cola))

2 digesteurs de 3 500 m<sup>3</sup>, TSH= 35 j

désintégration des boues à 2250 rpm ; débit 12 m<sup>3</sup>/h

➤ production de CH<sub>4</sub> de 0,432 à 0,529 m<sup>3</sup>/kg MO introduite (+15%)

➤ de la dégradation de la MO de 58,5 à 62%

<sup>29</sup>  
*Zabranska et al, 2006*

## Hautes pressions- collision sur plaques



La boue pressurisée par une pompe haute pression traverse une vanne et une buse et est projetée sur une plaque

ΔP= 30-50 bar

vitesse de projection: 30-100 m/s

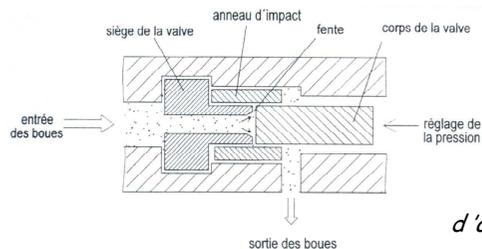
### Résultats études de laboratoire :

➤ abatement de la MO de 35 à 50% (réacteurs continus)

➤ cinétique : ➤ TSH des boues (jusqu'à 6 jours)

*Choi et al, 1997, Nah et al. 2000* <sup>30</sup>

## Hautes pressions- homogénéisateur



*d'après Müller et Pelletier, 1998*

Résultats études de laboratoire : ΔP= 150-600 bar

➤ production CH<sub>4</sub> : + 20 à +90% (réacteurs continus)

➤ cinétique : ➤ TSH des boues (meilleurs résultats en biomasse fixée TSH=2,5 j)

➤ Déshydratabilité des boues

<sup>31</sup>

## Hautes pressions- homogénéisateur



### Résultats démonstration sur boues de STEP de Scharzfeld (Allemagne):

Capacité 35 000 EH

Boues mixtes (primaires + secondaires épaissies)

Boues digérées par 2 méthaniseurs en série, épaissies à 35 g MES/L puis désintégrées à ΔP= 150 bar et réintroduites dans le 1er digesteur

➤ production CH<sub>4</sub> : + 30%

Dégradation totale de la MO en suspension: 70%

*Onyeche et Sievers, 2007* <sup>32</sup>

## Hautes pressions- homogénéisateur



### Procédés industriels

Procédé Crown (Biogest)  $\Delta P = 12$  bar  
installé sur +/-20 STEP en Allemagne, Suisse, Pologne, Pays Bas  
de 18 000 à 650 000 EH

➔ production CH<sub>4</sub> : + 30%

### Procédé Microsludge (Paradigm Environmental)

pH=11 puis  $\Delta P = 830$  bar  
essai sur STEP Los Angeles  
Hydrolyse de boues secondaires : 192 m<sup>3</sup> /jour

Méthanisation des boues secondaires hydrolysées (25%)  
avec des boues primaires (75%)

➔ dégradation de la MO des boues mixtes de 50 à 57%  
des boues secondaires de 28 à 50%

33  
*Stephenson et al, 2007*

## Pression/décompression



### Procédés industriels

Procédé Rapid non Equilibrium Decompression RnD (Eco-solids)  
P > 1 bar, un gaz soluble pénètre dans les cellules  
puis décompression  
Essai sur STEP Chesterfield (2007)

Procédé Anaerobic pump (Technology Matrix Corporation)  
Alternance de cycles  
P=1,5 bar par accumulation du biogaz, 1 heure  
P=0,5 bar par pompe à vide, 7 heures

➔ cinétique de production de biogaz

*Schimel, 2007* 34

## Oxydation



Peroxyde d 'hydrogène : 2g/g MOS, 90°C, 24 h

➔ dégradation de la MO +30-40%

Ozone : 0,05 à 0,2 g/g MS

➔ dégradation de la MO +40-50%

Abattement des MS: 85%

impact sur la déshydratabilité fonction de la dose

➔ DCO soluble en sortie de digesteur

Meilleurs résultats si oxydation sur une boucle de recirculation  
quantité d 'oxydant inférieure

35

## Hydrolyse enzymatique



### Pré-traitement

5 kg/tMS glucosidases, 55°C, 30 min

➔ production de CH<sub>4</sub> : +14 à 20%

*Recktenwald et al, 2007*

### Enzymes introduites dans le digesteurs

#### Essai laboratoire en batch

0,1 %  $\alpha$ -amylase + 0,1%  $\beta$ -glucanase

➔ production CH<sub>4</sub> (+100%)

#### Essai sur STEP Soest, Allemagne, 95 000 EH

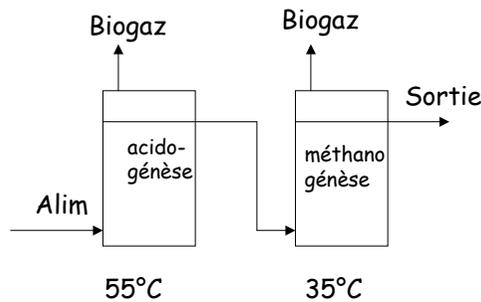
cellulases 1 : 70%, cellulases 2 : 10%, protéases: 20%

➔ production de CH<sub>4</sub> non significative : - 3% à +10%

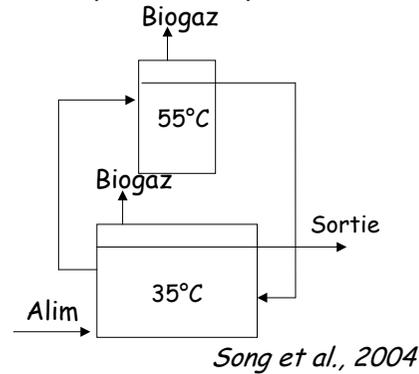
*Ayol et al., 2007, Schmelz et al, 2007* 36

## Procédés deux étapes

### TPAD : Temperature phased anaerobic digestion



### Système « cophase »



Song et al., 2004

Procédés plus stables que 1 étape 35°C ou 55°C  
Charge appliquée plus importante

37

## Pré-traitement des boues

Pré(co)-traitements de la digestion anaérobie des boues	déshydratation	Performances biogaz	Procédés industriels
<b>Thermique</b> 160-180°C, 1-60 min solubilisation hygiénisation	+ si > 150°C	Batch : +20 à 90% CSTR : + 0% (boues primaires) à + 100% (boues secondaires, TSH=5j)	Cambi (Europe du Nord) Biothélys (France)
<b>Thermo-alkalin</b> NaOH ou KOH en quantité limitée 120-130°C, 5 à 60 min solubilisation hygiénisation base ajoutée non dégradée : augmentation des MS résiduelles	-	Batch : +38 à 127% CSTR +75 % 2 étapes +79 %	
<b>Thermo-acide</b> HCl, 175°C Problèmes de corrosion	+	Batch +56%	
<b>Peroxyde d'hydrogène</b> 2 g H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /gMOS 90°C, 24 h		Batch +16% CSTR +34 à 43%	
<b>Ozonation</b> Prétraitement : 0,1 à 0,2 gO <sub>3</sub> /gMS Recirculation 0,05 gO <sub>3</sub> /gMS	+ ou -	Batch +100 à 145% CSTR + 90% Recirculation +53%	
<b>Enzymes</b> Diverses enzymes utilisées : αamylase, βglucanase, glucosidase, cellulase, protéase 0,5 à 5 kg/tMS		Batch +100% STEP -3 à +14%	Essais sur STEPs en Allemagne

38

## Pré-traitement des boues

Pré(co)-traitements de la digestion anaérobie des boues	Déshydratation	Performances biogaz	Procédés industriels
<b>Ultrasons</b> 20-40 kHz conditions appliquées diverses : 5000 à 10000 kJ/kgTS 180 à 3600 W 1 à 150 min	+ ou -	Batch +138% CSTR + 9% (TSH=22j) STEP +30%	Nombreuses références en Europe mais pas en France
<b>Broyage</b> Broyeur à billes Db=0,35 mm Vb=6m/s 2000 kJ/kgTS		CSTR (TSH=7j) +12% Cellules fixées (TSH=2j) +88%	
<b>Centrifugeuse-lyseuse</b> Système de lyse cellulaire adapté sur centrifugeuse	+	Batch : +24 à 85% STEP : +15 à +26%	Références en Allemagne et république Tchèque
<b>Hautes pressions</b> Collision sur plaque ΔP=30 b Homogénéisateur ΔP=400-600 b	-	Batch +43% CSTR (TSH=20j) +18% Biomasse fixée (TSH = 2,5 j) +87%	Crown® RnD® Microsludge® Anaerobic pump

39

## Pré-traitement des boues

### Résultats inter-publications difficilement comparables

-performances exprimées différemment

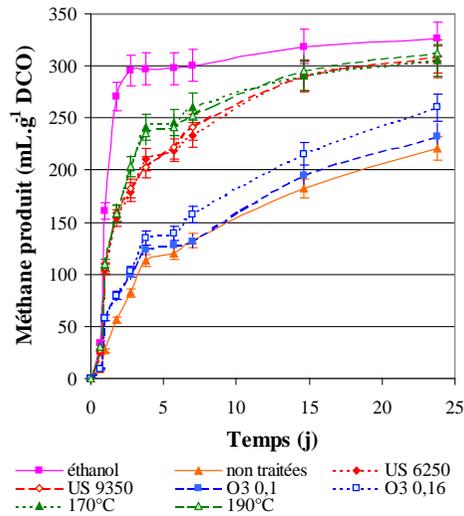
- dépendent du procédé de digestion anaérobie continu, batch  
meilleures performances aux faibles TSH (accélération /amélioration)

- dépendent de la nature de la boue  
meilleurs résultats sur boue faiblement biodégradable (boues biologiques, âge de boue élevé)

Quelques publications comparent plusieurs techniques dans les mêmes conditions ...

40

## Comparaison ultrasons, ozone, thermique



Digestion anaérobie en batch:  
Résultats équivalents pour  
ultrasons et thermique

Bougrier et al., 2006

41

## Comparaison ultrasons, ozone, thermique

	Ultrasons	Ozonation	Thermique
Solubilisation	↗	↗	↗↗
Viscosité	↘	↘	↘↘
Taille flocs	↘	-	↗
Déshydratabilité	↘↘	↘	↗↗
Biodégradabilité	↗↗	↗	↗↗
Hygiénisation	-	-	+
Mécanismes	Faible solubilisation et meilleure biodégradabilité particulaire Relargage EPS	Oxydation des molécules des flocs	Forte solubilisation pas d'effet sur la biodégradabilité des particules Rupture des cellules

Bougrier et al., 2006

42

## Comparaison thermique, enzymatique, hautes pressions

Digestion anaérobie continue TSH=20 j

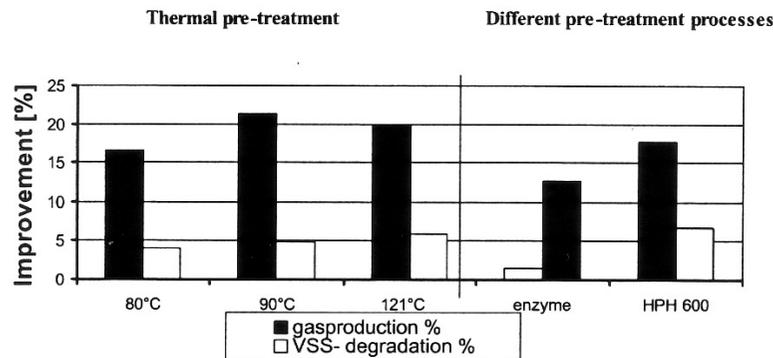


Fig. 4. Improvement in anaerobic degradation compared to the control reactor.

Barjenbruch et Kopplow., 2006

## Comparaison broyage, ozone, centrifugeuse lyseuse, ultrasons

Essais sur STEP (Allemagne)

Comparaison sur STEP virtuelle 250 000 EH

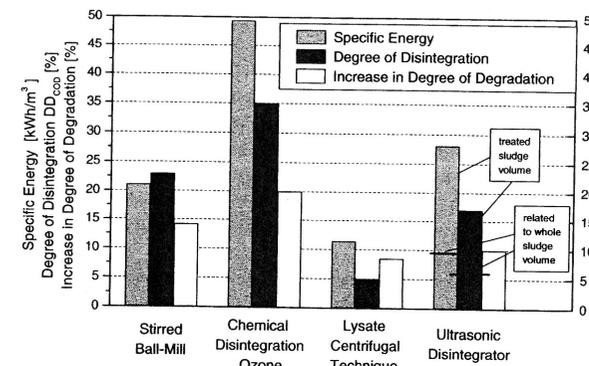


Figure 2 Performance of various disintegration methods and their influence on the degree of degradation (in ultrasonic disintegrator only one third of the excess sludge was treated) (Winter, 2003)

44

Muller et al., 2004

## Essais sur STEP (Allemagne)

Comparaison sur STEP virtuelle 250 000 EH

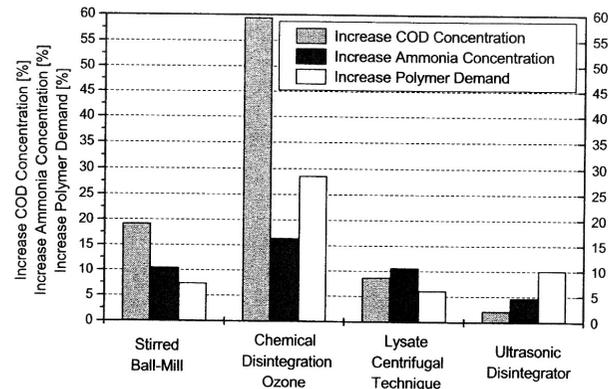


Figure 3 Influence of disintegration on pollution of process water after dewatering and polymer demand (Winter, 2003)

45

Muller et al., 2004

## Conclusions

Nombreux travaux sur l'étude des prétraitements des boues mais données difficilement comparables

### Impacts sur les STEP

- ⇒ accélération des cinétiques de méthanisation 😊
- ⇒ augmentation de la conversion de la MO en biogaz 😊
- ⇒ impact sur la qualité du déchet final (déshydratabilité) 😞 😊
- ⇒ libération dans phase liquide de la pollution azotée et phosphorée et de DCO soluble à traiter dans bassin aérobie 😞
- ⇒ problèmes d'odeur (éventuellement) 😞

46

## Conclusions

Nombreux travaux sur l'étude des prétraitements des boues mais données difficilement comparables

### Impacts sur les coûts

- ↗ production de méthane 😊
- ↘ quantité de boues à éliminer 😊
- ↗ investissement et coûts supplémentaires d'exploitation 😞
- ↗ consommation d'énergie d'aération 😞
- ↗ consommation de réactifs (éventuellement) 😞

47