

Journée technique GRESE
YVERDON, le 23 septembre 2004

LA DIGESTION ANAEROBIE DES BOUES D'EPURATION

par

Jean Paul CHABRIER

Ingénieur Consultant en traitement et séchage thermique
des boues



Programme de la journée

1. **Présentation de la digestion anaérobie des boues**
2. **Les technologies**
3. **Les paramètres de bon fonctionnement**
4. **L'exploitation et le contrôle**
5. **Les indicateurs et les analyses**
6. **Liste des différentes opérations à effectuer**
7. **L'utilisation du biogaz**
8. **Quelques données économiques**
9. **Conclusion**



1 - LA DIGESTION ANAEROBIE *GENERALITES*



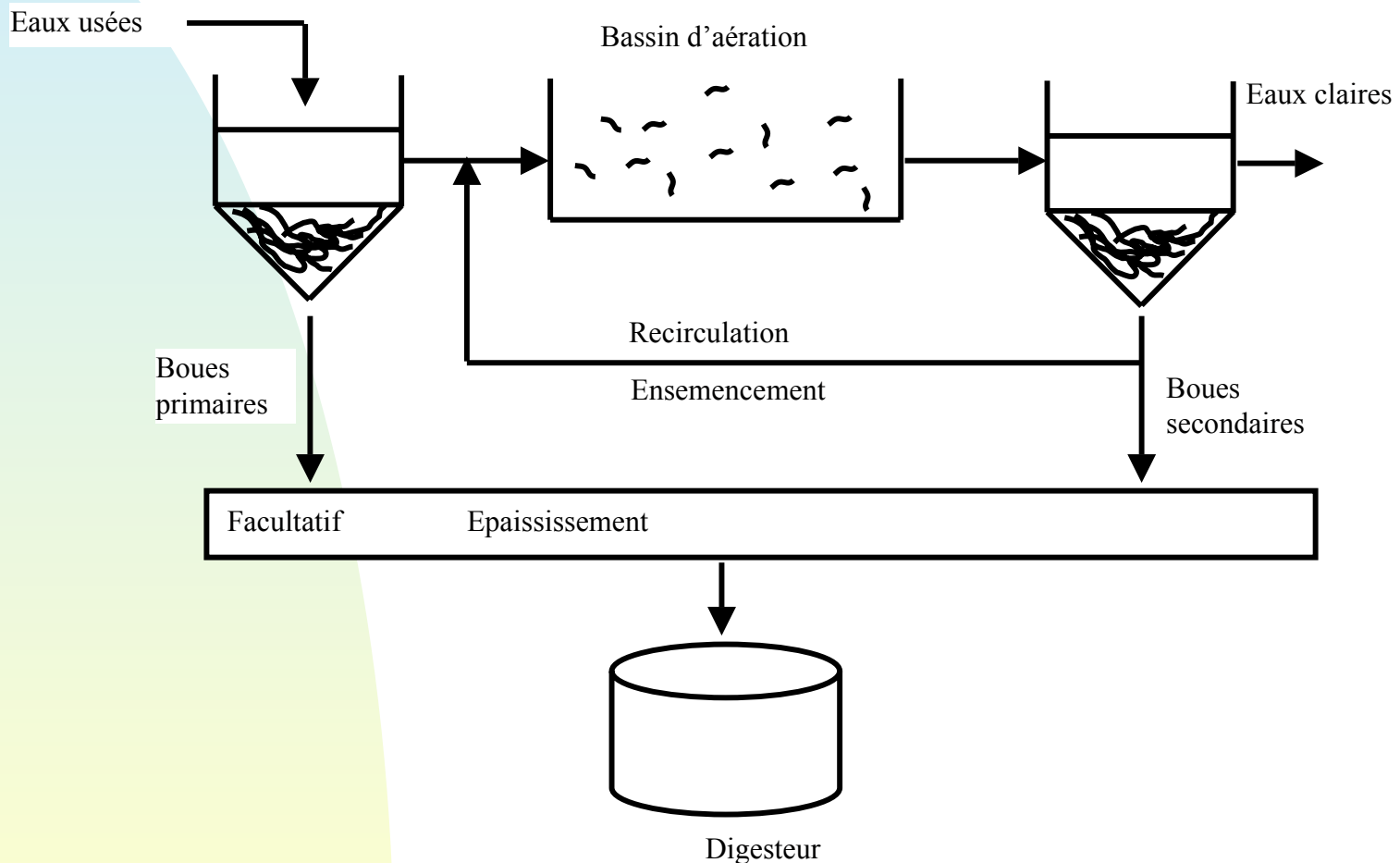
Panorama du procédé

- Procédé très ancien : ville EXETER (UK) en 1895
- Stabilisation poussée de la matière organique
- 967 STEP : 762 pratiquent la digestion et 294 produisent de l'électricité - principale source de biogaz
- Recourir à l'énergie renouvelable (biogaz) : ordonnance sur l'énergie du 01/01/1999 – programme suisse Energie 2001 – 2010
- Diminution de la quantité de boues à éliminer : cadre de l'interdiction d'épandage au 01/10/2005



Place dans la chaîne de traitement des boues

- Premier maillon du traitement, après décantation, voire épaissement



Mécanismes réactionnels

Etape 1 : Hydrolyse et acidogénèse

Molécules complexes
Sucres, protéines,
lipides

Dépolymérisation en monomères

Formation d'acides
gras volatils

Etape 2 : Acétogénèse

Transformation en acide acétique, hydrogène
et CO₂

H ₂ , CO ₂	CH ₃ COO ⁻
----------------------------------	----------------------------------

30 %

70 %

Etape 3 : Méthanogénèse

CH₄, CO₂



Quels types de boues digérées ?

- **Evaluation de la « digestibilité » ou fermentescibilité des boues**
 - Boues de décantation primaire : plus justifié
 - Boues en excès biologiques : dépend de la charge massique de la STEP : $FC > f_c$
 - Boues mixtes
- **Boues concentrées préalablement par épaissement dynamique, flottation, centrifugation**
- **Autres résidus à digérer : graisses (sous conditions), sang et en co-digestion : lisiers, déchets organiques...**



Quel type de digestion anaérobie ?

➤ 2 types principaux :

- **La digestion anaérobie mésophile :**
température de 33 à 35°C
- **La digestion anaérobie thermophile :**
température > 50°C

Remarque : la digestion aérobie thermophile peut être implantée avant une digestion anaérobie thermophile



Les atouts de la digestion

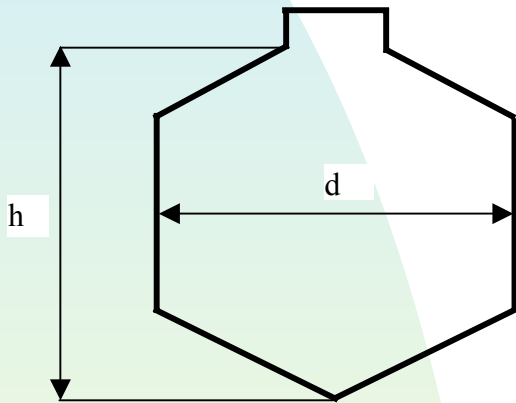
- Réduction de la masse (matières sèches) des boues à éliminer : de 35 à 40 % MS – 40 à 50 % MV
- Stabilisation de la matière organique :
 - Boues moins malodorantes que les boues fraîches
 - Amélioration des conditions de travail
 - Réduction des nuisances
- Production d'énergie valorisable : biogaz
- Diminution de la concentration en germes pathogènes (10 à 100 fois inférieure) : technique d'hygiénisation
- Réduction des risques de toxicité : ETM (blocage) et CTO (dégradation)



2 - LES TECHNOLOGIES

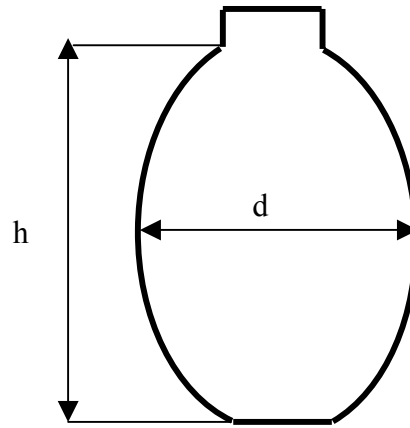


Forme des digesteurs



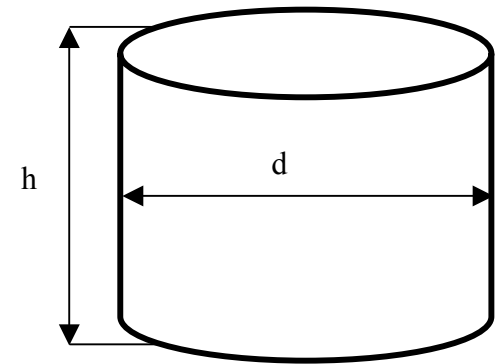
$$h/d = 1$$

Type commun
continental (France,
Suisse)



$$H > d \cong 2$$

Ovoïde ou
citron
(Allemagne)



$$d > h$$

cylindrique
(UK,
Scandinavie)



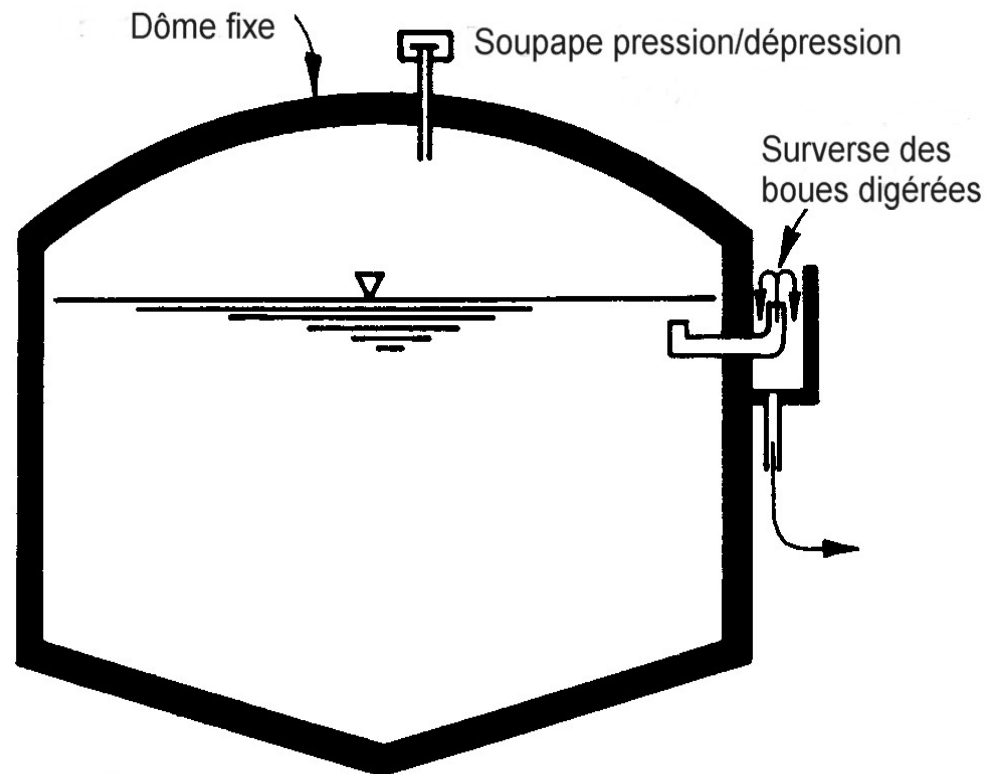
Digestion à simple ou double étages

- **À simple étage** : un digesteur chauffé et brassé
- **À double étage** : chaîne de digestion composée de :
 - ✓ Digesteur primaire chauffé et brassé
 - ✓ Digesteur secondaire non chauffé et brassé séquentiellement ayant comme rôle de :
 - Stocker les boues avant déshydratation
 - Supporter la cloche gazométrique
 - Achever le dégazage des boues



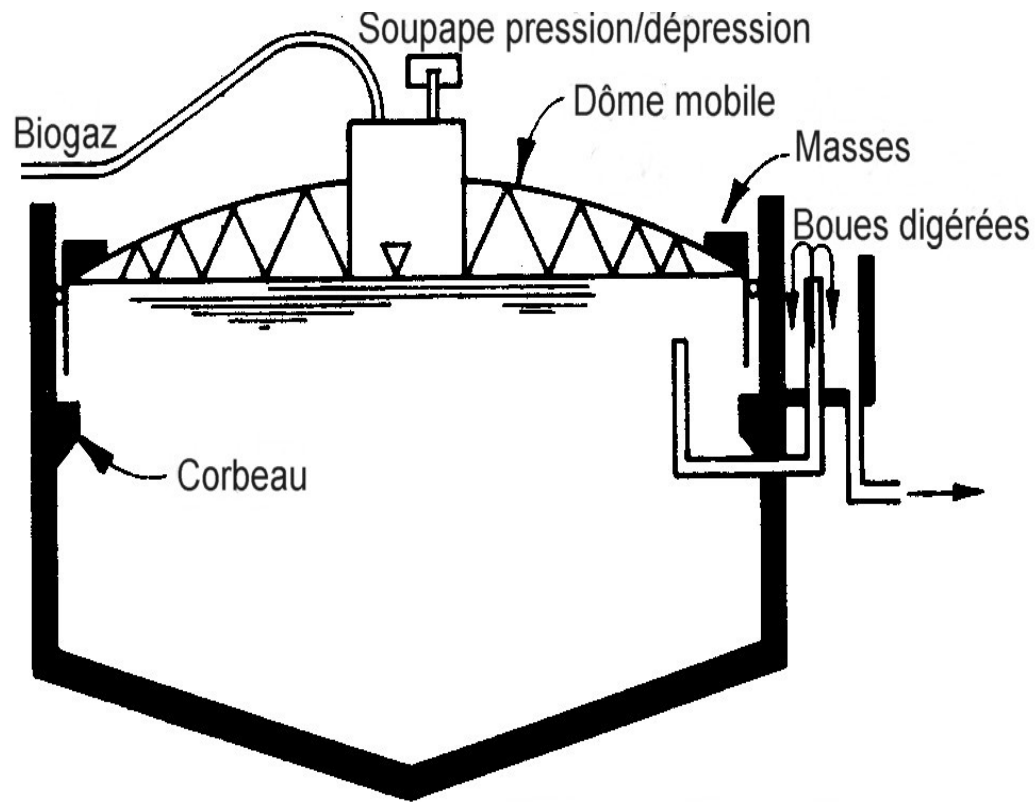
Digester à dôme fixe

- Dôme bombé en BA : résistance à la pression
- Etanchéité vis à vis du gaz : protection



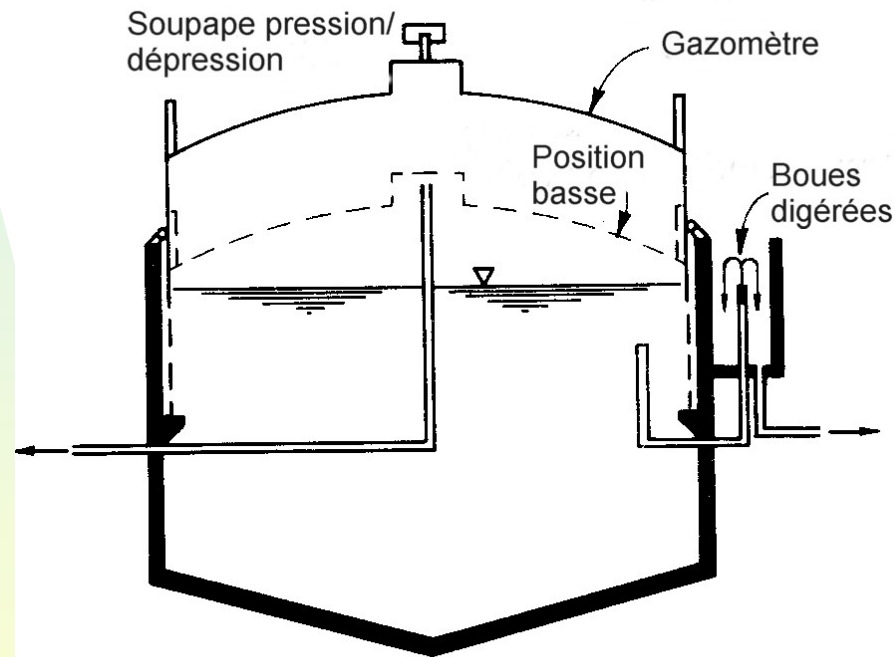
Digesteur à dôme mobile

- Dôme métallique se déplace sur l'axe vertical
- Difficultés rencontrées par période de froid (blocage)

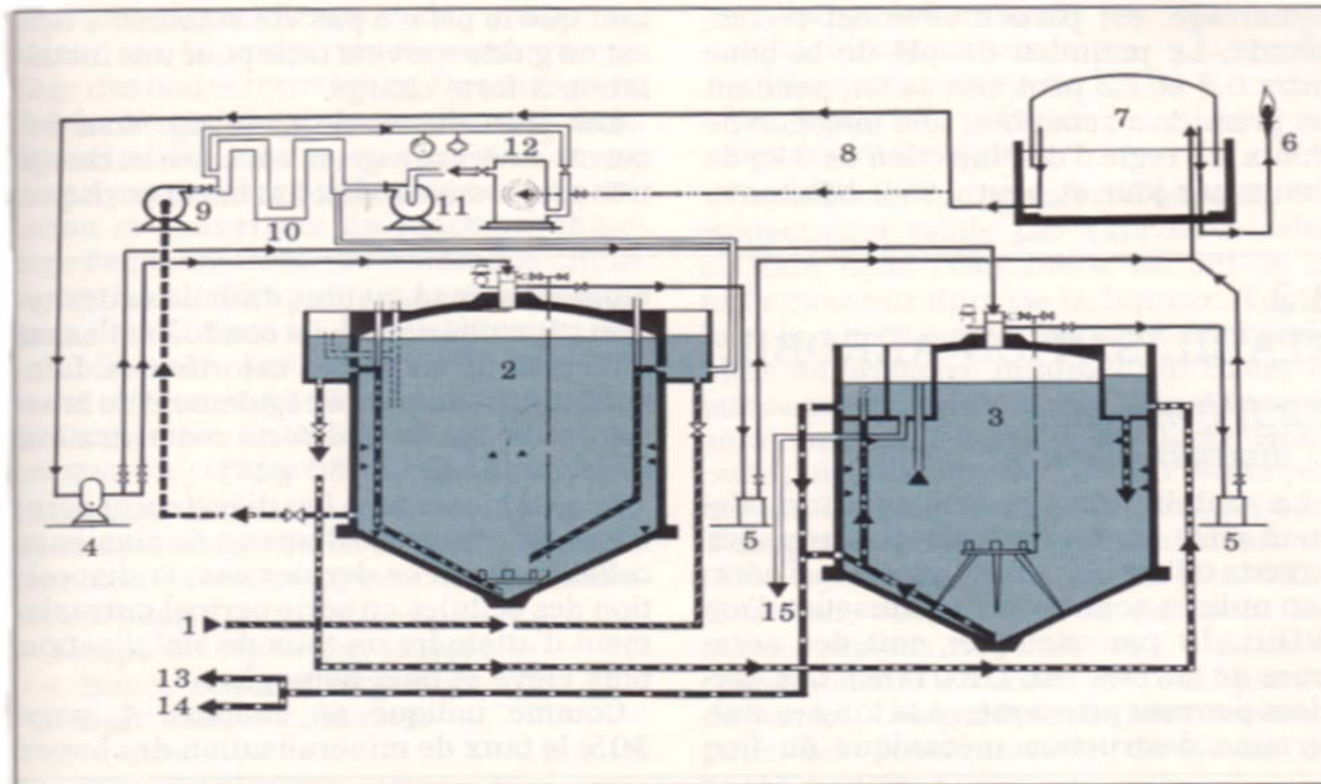


Digesteur à cloche gazométrique

- Double fonctionnalité : digesteur et stockage biogaz
- Utilisé quelquefois uniquement pour le stockage du biogaz
- Niveau d'eau ajustable : augmentation capacité stockage biogaz



Les équipements annexes de digestion



- 1 - Arrivée des boues fraîches.
- 2 - Digesteur primaire.
- 3 - Digesteur secondaire.
- 4 - Compresseur de gaz.
- 5 - Pots de purge.
- 6 - Torchère.
- 7 - Gazomètre.

- 8 - Vers la chaufferie et les surpresseurs.
- 9 - Pompe de circulation des boues.
- 10 - Échangeur de chaleur.
- 11 - Pompe à eau chaude.
- 12 - Chaudière.
- 13 - Vers le traitement terminal.
- 14 - Vers le lagunage.
- 15 - Surnageant éventuel.

L'amenée des boues fraîches

- **Pompes volumétriques à débit variable**
- **Régularité de débit**
- **Pompage de boues à des concentrations en matières sèches élevées : 5 à 8 %**
- **Débitmètre placé sur la conduite : fonction totalisateur**
- **Préleveur de boues épaissies asservi au débit des boues : échantillonnage env. 5 litres / journée de 24 h**
- **Déversement en vasque (observation qualité des boues)**



Modes de chauffage des digesteurs

- **Plus courant : chauffage par échangeur de chaleur placé à l'extérieur du digesteur (local chaufferie)**
 - **Échangeur eau chaude/boue de type tubulaire à vitesse élevée de passage : eau env. 2 m/s – boue env. 1 à 1,5 m/s**
 - **Echangeur de type spirale**
 - **Préchauffage possible des boues fraîches à digérer par les boues digérées.**



Autres modes de chauffage des digesteurs

- **Echangeurs internes de chaleur**
 - ✓ placés à l'intérieur du digesteurs dans une enceinte spéciale
 - ✓ placés autour d'une cheminée d'aspiration
- **Brûleurs immergés**
- **Injection de vapeur**
 - **Conséquence dilution des boues**

Toutes ces modes de chauffage sont moins sécuritaires et moins fiables que le chauffage par échangeurs extérieurs.



Le brassage des digesteurs

- Principalement par injection de biogaz en pied de digesteurs (shearffusers, helixors)
- Technique appelé aussi bullage de gaz
- Biogaz extrait du gazomètre est comprimé par compresseur rotatif à palette (2 à 3 bars)
- Injecté par des canalisations au pied de chaque distributeur (contrôle par des indicateurs à boules)
- Le but est de créer un spiral flow dans la masse
- Débit minimum en biogaz: $1\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$
- Peut être complété par une recirculation par pompe centrifuge placée à l'extérieur du digesteur



Transport du gaz - Canalisations

- **Canalisations PEHD – résistance à la corrosion pour le biogaz**
- **Autre matériau : acier INOX 1.4404 (316L)**
- **À l'origine des constructions, choix de la fonte pour les canalisations placées à l'intérieur du digesteur**
- **Précautions d'installation : manchettes de liaison en fonte traversante des voiles BA**
- **Déshumidification partielle par la mise en place de pot de purge (risque de condensation et de blocage dans les points bas).**



Sécurité

- **Sécurité principale : soupape pression/dépression placée au sommet du dôme du digesteur**
 - maintenir une pression inférieure à celle supportée par la coupole (généralement 10 à 20 g/cm²)
 - permettre une entrée d'air en cas de dépression brutale sous la coupole – conception du réseau et de l'utilisation du biogaz
- **Rôle secondaire de pare-flamme, en cas de déclenchement d'une combustion**
- **Détecteur de biogaz en galerie et d'H₂S.**



Principales mesures à enregistrer

- **Débit et totalisation des boues à traiter**
- **Débit et totalisation du biogaz (by pass nécessaire pour maintenance)**
- **Niveau liquide et présence de mousses ou écumes.**
- **Température des boues**



3 - LES PARAMETRES DE BON FONCTIONNEMENT DE LA DIGESTION



L'épaississement avant digestion

- **Objectif : produire des boues suffisamment concentrées :**
 - Moyenne : 40 à 50 g/l
 - Optimum : 55 à 65 g/l
- **Mélange BP + BS se situe dans cette fourchette**
- **4 solutions d'épaississement**
 - Décantation / Epaississement dynamique / Epaississeurs
 - Drainage* / Tambour, grille / 2 000 à 20 000 EH
 - Flottation/ flottateur direct ou indirect / 40 000 EH
 - Centrifugation* / Centrifugeuse / 20 à 100 000 EH

* Utilisation de polymère nécessaire



Le temps de réaction

- TRH = temps de rétention hydraulique
- TRH = volume digestion / volume des boues à traiter journallement.
- **20 < TRH < 30 j** minimum : 14 jours
- TRH diminue lorsque la concentration des boues diminue
- TRM = temps de rétention massique
- TRM = masse boue / concentration boue entrante
- réensemencement par les boues digérées sortantes (cas d'une digestion à double étages.



La température

- **Digestion naturelle : 15 – 20°C**
- **Digestion mésophile : 33 à 37°C – moyenne 35°C**
- **Digestion thermophile : env. 55°C**
- **Influence la production de gaz**
- **L'abatement des MV augmente avec la digestion thermophile**



La charge organique

- Exprimée en kg MV/m³/j
- Valeur moyenne observée : 1,5 ± 0,5 kg MV/m³/j
- Valeur maximum : 2,2 kg MV/m³/j
- Calcul de la charge en MV

Charge en MV = (concentration x % MV x m³/j)/volume digesteur

- 1 000 m³ digestion = 2 000 kg MV soit env. 3 000 kg MS



4 - EXPLOITATION ET CONTRÔLE DE LA DIGESTION



Les questions à se poser

- **Quels indicateurs dispose-t-on pour gérer la digestion ?**
 - Diminution de la production de biogaz et augmentation du pourcentage de CO₂
 - Augmentation du rapport AGV/TAC
 - Diminution du pH (0,1 à 0,2 unités)
 - Diminution de la teneur en MV des boues digérées
 - Difficulté de décantation : augmentation en MS dans le supernatant
 - Mauvaise déshydratation : collage sur les toiles de filtration
 - Les boues deviennent malodorantes : odeurs



Les questions à se poser

➤ **Comment dois t'on alimenter le digesteur ?**

- Vérifier la compatibilité du TRH et de la charge en MV
- Maintenir la concentration des boues fraîches la plus élevée possible ($\geq 33\text{g/l}$)
- Meilleure alimentation : continuer à un débit le plus faible possible 24 h/24
- Alimentation discontinue : grand nombre de séquences de courtes périodes – 30 minutes toutes les heures
- Mauvaise alimentation : 1 x/jour à un débit élevé



Les questions à se poser

➤ Comment contrôler la charge organique ?

- Détermination de la teneur en MV des boues : quelles variations (échantillons ponctuels fréquents ou moyens)
- Détermination de la capacité utile de digestion : y a-t-il ensablement ? Comment l'évaluer ?
- Excès de charge hydraulique diminution de la concentration en bactéries méthanogènes
- Détermination des variations de concentrations des boues selon l'origine et les conditions de mélange des boues (primaires, en excès, mixtes)
- Contrôle de l'efficacité du dessableur (pouvoir de coupure)



Les questions à se poser

- **Comment contrôler la température de digestion ?**
 - Objectif : maintenir une température constante
 - S'assurer que la température est constante dans le digesteur – pas de passage préférentiel
 - Contrôler les boues en entrée d'échangeur, lors de l'extraction (surface, fond) que les températures sont équivalentes
 - Faire attention lors du chauffage
 - Vérifier plus fréquemment en période de froid (variation maximum $0,5^{\circ}\text{C}/\text{jour}$) – conséquence sur la microbiologie des boues



Contrôle des conditions de brassage

- **But** : maintenir l'activité bactérienne dans toutes les zones du digesteur et diminuer les risques de sédimentation et de formation d'un chapeau
- **Le brassage dépend** :
 - de la forme du digesteur
 - des techniques utilisées
- **Problème fréquent rencontré avec l'insufflation de biogaz** : la formation d'écume – gestion par la diminution du niveau hydraulique dans le digesteur



Contrôle de la qualité du supernatant

- **Crée de nombreux problèmes dans le process biologique de la STEP, à cause d'une concentration élevée en MeS ($> 5 - 7,5$ g/l)**
- **Conditions opératoires à adapter pour les installations qui permettent ce mode de fonctionnement (2e étage de digestion) – arrêt brassage dans le second digesteur – conséquences**
- **Sélection du point de soutirage : vanne télescopique**
- **Méthode curative : addition de polymère en sortie de digestion avant épaissement**



Consignes standard d'exploitation

- **Contrôle des indicateurs de bon fonctionnement (cf slide 30)**
- **Importance des échantillons prélevés : points de prélèvement, nature des échantillons**
- **Autres tests et fréquence :**
 - **Aspect visuel de la combustion du gaz :**
 - *flamme jaune, bleue à la base = normal*
 - *couleur bleue prépondérante = essais CO₂*
 - *flamme orange = teneur en H₂S élevée*
 - **Présence de sables : évaluation par un lavage des boues**
 - **Prélèvement si envisageable dans le digesteur : profil du risque de sédimentation**



5 – LES INDICATEURS ET ANALYSES AU LABORATOIRE

Détermination de l'alcalinité des boues / Mesure du TAC

- Sur le surnageant après centrifugation
- Dosage acido/basique : $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0,1 \text{ N}$
- Echantillon $V = 100 \text{ ml}$
- pHmètre
- Addition d'acide jusqu'à $\text{pH} = 4,5$
- **$\text{TAC (CaCO}_3) = \text{Vol H}_2\text{SO}_4 \times 0,1 \times 50\,000 / 100$**



Détermination des AGV

- Continuer l'addition d'acide sulfurique sur l'échantillon précédent jusqu'au pH 3,5 - 3,3
- Porter à ébullition l'échantillon pendant 3 min.
- Addition de soude 0,05 N jusqu'à pH 4.00 : noter V1 ml, puis jusqu'au pH 7 : noter V2 ml
- Résultat R (CaCO_3) = $(V2 - V1) \times 0,05 \times 50\ 000 / 100$
- Si résultat est > 180 mg/l, $AGV = R \times 1,5$
 < 180 mg/l $AGV = R$
- Evaluer le rapport AGV/TAC : il doit être inférieur à 0,05



Analyse du gaz

- Méthode par l'appareil d'orsat
- Méthode par l'absorption de CO_2 (peu pratique)
- Autre méthode calorimétrique
- Résultat exprimé en pourcentage :

65 % CH_4 – 35 % CO_2



Taux de réduction en MV

- Masse des MV dans les boues à traiter et les boues digérées
- $TR\ MV = 1 - \frac{m1 (100 - m2)}{m2 (100 - m1)} \quad \%$
 - $m1 = \% MV$ boues à traiter
 - $m2 = \% MV$ boues digérées
- Bilan MV entrée – bilan MV sortie
- Masse biogaz = matières sèches entrée – matières sèches sortie



Matières décantables / Concentration du supernatant

- **Prélever le supernatant (digesteur secondaire)**
- **Remplir une éprouvette de 100 ml**
- **Laisser sédimenter 1 heure**
- **Relever l'indication de la décantation (pied d'éprouvette)**
- **Si $> 5 \%$, risque de surcharge des décanteurs primaires**



Aptitude à la filtrabilité

- **Méthode visuelle**

- ✓ basée sur l'adhérence des particules de boues sur une éprouvette et la formation d'interstices remplis d'eau

- **Méthode par filtration sur lit de sable**

- ✓ cône Imhoff de 1 litre rempli à 50 % sable
- ✓ complété avec ½ litre boues digérées
- ✓ filtration pendant 24 heures
- ✓ mesure du volume écoulé

La bonne filtrabilité est > 100 ml / 24 heures



Courbes de suivi des paramètres

A partir des résultats précédents, tracer les courbes en fonction du temps (base mensuelle) :

- **Ratio AGV/TAC**
- **Température du digesteur**
- **pH**
- **Teneur en CO₂ du gaz (base annuelle)**
- **Quantité de boues introduites (m³ et MS)**
- **Quantité de MV détruites**
- **Production de biogaz**



6 - Liste des différentes opérations d'exploitation et de maintenance des digesteurs



Alimentation des boues fraîches

ITEM	OPERATIONS	FREQUENCE
1	Enregistrement du débit journalier des boues fraîches	Journalière
2	Contrôle de la concentration des boues	Journalière
3	Contrôle de la concentration en MV	2 x/semaine
4	Contrôle de la pompe d'alimentation : presse étoupe, variateur, pression aspiration et refoulement	Journalière
5	Mesure du temps de pompage, si séquençement de l'alimentation	journalière



Alimentation des boues fraîches

ITEM	OPERATIONS	FREQUENCE
1	Enregistrement du débit journalier des boues fraîches	Journalière
2	Contrôle de la concentration des boues	Journalière
3	Contrôle de la concentration en MV	2 x/semaine
4	Contrôle de la pompe d'alimentation : presse étoupe, variateur, pression aspiration et refoulement	Journalière
5	Mesure du temps de pompage, si séquençement de l'alimentation	journalière



Contrôle du digesteur (suite)

ITEM	OPERATIONS	FREQUENCE
7	Enregistrement des températures et du compteur totalisateur de biogaz	Journalière
8	Contrôle de l'évacuation de la boue digérée ou du supernatant (vanne télescopique)	Journalière
9	Contrôle du niveau d'écume ou du chapeau au travers du hublot de contrôle – enregistrement éventuel de la hauteur d'écume	Journalière
10	Evacuation des sédiments déposés en fond du digesteur	de 1 x/jour à 1 x/semaine
11	Vidange du digesteur	entre 5 et 8 ans, maxi 10 ans



Contrôle de l'évacuation des boues digérées

ITEM	OPERATIONS	FREQUENCE
1	<p>Selon principe d'évacuation des boues :</p> <ul style="list-style-type: none"> • par surverse permanente : contrôle bon fonctionnement <p>ou</p>	journalière
2	<ul style="list-style-type: none"> • par séparation du supernatant contrôle de la concentration en MS (< 5 g/l) 	À chaque opération
3	<ul style="list-style-type: none"> • par extraction en pied d'ouvrage : contrôle des MS (< 50 – 55 g/l), contrôle des MV (env. 50 %) 	À chaque opération



Equipements : compresseurs, pompes

ITEM	OPERATIONS	FREQUENCE
1	- Contrôle de la lubrification des compresseurs de gaz	Journalière
	- Contrôle de la température, pression	Journalière
	- Contrôle de la tension des courroies	Tous les mois
2	- Contrôle des pompes : presse étoupes, débit, pression	Journalière
	- Contrôle de la tension des courroies	Tous les mois



Dispositifs de sécurité

ITEM	OPERATIONS	FREQUENCE
1	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle de la présence des extincteurs - Contrôle et vérification de bon fonctionnement 	<p>1 x/mois</p> <p>1 x/an</p>
2	<ul style="list-style-type: none"> - Détection présence gaz - contrôle de bon fonctionnement - Etalonnage 	<p>1 x/semaine</p> <p>Env. 1 x tous les 2/3 mois</p>



7 - L'UTILISATION DU BIOGAZ



8 - QUELQUES DONNEES ECONOMIQUES



CONCLUSION



- Avec la digestion des boues la chaîne infernale de l'élimination des boues est un peu mieux contrôlé si vous avez été convaincu
- JE VOUS REMERCIE DE VOTRE ATTENTION